



Leonardo Nogueira Finamore

**Aplicação de modelagem matemática na
otimização da distribuição de asfaltos no Brasil:
um estudo de caso**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Fabricio Oliveira

Rio de Janeiro

Agosto de 2014



Leonardo Nogueira Finamore

**Aplicação de modelagem matemática na
otimização da distribuição de asfaltos no Brasil:
um estudo de caso**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Fabricio Oliveira

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Hugo Repolho

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Leonardo Nogueira Finamore

Graduou-se em Engenharia Química pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2005. Iniciou suas atividades na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em outubro de 2002, no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, CENPES (Rio de Janeiro, RJ), onde atuou na aplicação de técnicas analíticas para caracterização química de diferentes produtos da cadeia de suprimentos de petróleo e derivados. Desde julho de 2011, trabalha como Engenheiro de Processamento na área de Abastecimento/Logística, atuando no planejamento e programação da logística de produtos especiais, incluindo os produtos asfálticos.

Ficha Catalográfica

Finamore, Leonardo Nogueira

Aplicação de modelagem matemática na otimização da distribuição de asfaltos no Brasil: um estudo de caso / Leonardo Nogueira Finamore ; orientador: Fabricio Oliveira. – 2014.

81 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Otimização. 3. Modelagem matemática. 4. Redes de distribuição. 5. Asfalto. I. Oliveira, Fabricio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida, e por permitir que eu concluísse mais esta importante etapa da minha vida profissional.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pela atenção, carinho e compreensão em todos os momentos. A vocês, a minha eterna gratidão.

À minha avó, pelo exemplo de vida, e pelo carinho constante.

À minha querida e amada Amanda, pela paciência e compreensão durante o tempo ausente na fase de elaboração deste trabalho.

Aos demais familiares, tios e primos, pelo incentivo na minha jornada acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Professor Fabrício Oliveira, pelas valiosas sugestões, e pela confiança e estímulo na condução deste trabalho.

À Petrobras, pela oportunidade e pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao gerente do Planejamento e Programação de Produtos Especiais (PPPE), Eng. Attila Luiz Pinho de Almeida, pela confiança em mim depositada ao indicar-me para a vaga do curso de mestrado.

Aos colegas da gerência PPPE, pelo apoio e colaboração nas informações.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio, pelo auxílio durante todo o curso.

A todos aqueles que de alguma forma me incentivaram para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Finamore, Leonardo Nogueira; Oliveira, Fabricio (Orientador). **Aplicação de modelagem matemática na otimização da distribuição de asfaltos no Brasil: um estudo de caso**. Rio de Janeiro, 2014. 81p. Dissertação de Mestrado (Opção profissional) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A demanda por asfaltos vem crescendo fortemente no Brasil por conta do ciclo vigoroso de expansão e recuperação de obras viárias de novos empreendimentos em rodovias, portos e aeroportos, que compõem o PAC – Programa de Aceleração do Crescimento. Neste cenário, a otimização da distribuição de asfaltos faz-se necessária para garantir o abastecimento do produto no país. Diante deste contexto, foi desenvolvido um modelo de programação linear que permite avaliar as alternativas de atendimento ao mercado de asfaltos, considerando minimizar os custos operacionais envolvidos na entrega aos polos de venda, a partir das refinarias produtoras. O modelo proposto foi aplicado em um estudo de caso que considerou a necessidade da criação de um novo polo de venda, em complemento aos polos atualmente existentes. O resultado obtido permite fundamentar a tomada de decisão na escolha da alternativa que garanta o atendimento ao mercado do país com o menor custo.

Palavras-chave

Otimização; modelagem matemática; redes de distribuição; asfaltos.

Abstract

Finamore, Leonardo Nogueira; Oliveira, Fabricio (Advisor). **Application of mathematical modeling to optimize asphalt distribution in Brazil: a case study**. Rio de Janeiro, 2014. 81p. MSc. Dissertation (Professional options) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The demand for asphalt has been growing strongly in Brazil because of the vigorous cycle of expansion and recovery of roadworks and new projects in roads, ports and airports which comprises the PAC – National Growth Acceleration Program. Given this context, the optimization of asphalt distribution is needed to ensure the supply of the product in the country. In this context, we propose a linear programming model that allows to evaluate alternative services for the asphalt market, considering the minimization of operational costs involved in delivering asphalt from the refineries to the selling locations. The proposed model was evaluated through a case study that addressed the need of creating a new center for delivery, in addition to the currently existing poles. Results obtained were able to support the decision making in choosing the alternative that ensures compliance with the country's market at the lowest cost.

Keywords

Optimization; mathematical modeling; distribution networks; asphalt.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Objetivo	14
1.2. Metodologia	15
1.3. Estrutura do trabalho	15
2. Revisão bibliográfica	16
2.1. Planejamento de redes logísticas	16
2.2. Otimização do planejamento de redes logísticas	19
2.3. Planejamento da distribuição nas redes logísticas	22
2.4. Contextualização	24
3. Descrição do problema	26
3.1. A pavimentação e os ligantes asfálticos no Brasil	26
3.2. Processos de obtenção dos ligantes asfálticos	27
3.3. Cadeia produtiva do segmento de asfaltos no Brasil	29
3.4. Panorama atual	31
3.4.1. Cesta de produtos asfálticos	31
3.4.2. Localização das refinarias e das distribuidoras	32
3.4.3. Limitações das bases operacionais de distribuição de asfaltos	34
3.4.4. Perfis de produção e de sazonalidade da demanda	35
3.4.5. Estratégias logísticas para atendimento da demanda	37
3.5. Considerações adicionais	39
4. Modelo matemático para otimização da distribuição de asfaltos no Brasil	40
4.1. Objetivo do modelo	40
4.2. Descrição do modelo	41
4.2.1. Premissas	41
4.2.2. Índices, parâmetros e variáveis	42

4.2.3. Função objetivo e restrições	44
4.3. Modelo matemático completo e sua implementação	46
5. Estudo de caso: aplicação do modelo matemático na localização de um novo polo de venda de asfaltos	48
5.1. Delimitações consideradas para o novo polo de venda	48
5.1.1. Localização geográfica	51
5.1.2. Modal de transporte	51
5.1.3. Origem do produto	52
5.1.4. Destino do produto	52
5.1.5. Demanda a ser atendida	52
5.2. Análise dos resultados	53
5.2.1. Apoio à tomada de decisão para localização do novo polo	54
5.2.1.1. Análise do custo total	57
5.2.1.2. Análise do custo de produção	61
5.2.1.3. Análise do custo de transporte	62
5.2.1.4. Análise do custo de estoque	63
5.2.2. Análise de resultados por semestre	64
5.2.2.1. Resultados do 1º semestre	64
5.2.2.2. Resultados do 2º semestre	67
5.2.3. Comportamento individualizado das parcelas de custos de transporte e de estoque	69
5.2.4. Resumo dos resultados das análises	71
6. Conclusão	72
6.1. Trabalhos futuros	73
7. Referências bibliográficas	75

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema de uma rede de distribuição física genérica	16
Figura 2 – Representação esquemática do processo de produção de asfaltos em dois estágios	28
Figura 3 – Arquitetura da cadeia de suprimento de asfaltos	29
Figura 4 – Localização das refinarias brasileiras produtoras de asfaltos	33
Figura 5 – Produção anual de asfaltos no Brasil, de 2000 a 2013	35
Figura 6 – Produção mensal de asfaltos no Brasil, de 2011 a 2013	36
Figura 7 – Produção anual de asfaltos por Estado brasileiro, de 2011 a 2013	37
Figura 8 – Importação anual de asfaltos, de 2009 a 2013	38
Figura 9 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos no Brasil, de 2010 a 2013, em relação a 2009	48
Figura 10 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos na região Norte/Nordeste, de 2010 a 2013, em relação a 2009	50
Figura 11 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos na região Sul/Sudeste, de 2010 a 2013, em relação a 2009	50
Figura 12 – Fluxos de entrega para atendimento ao mercado na configuração atual	54
Figura 13 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela <i>Refinaria B</i>	55
Figura 14 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela <i>Refinaria A</i>	56
Figura 15 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela entrega simultânea das <i>Refinarias A+B</i>	56
Figura 16 – Variação do custo total anual, para a <i>Refinaria A</i> , em função do percentual de demanda transferida	57
Figura 17 – Variação do custo total anual, para a <i>Refinaria B</i> , em função do percentual de demanda transferida	57
Figura 18 – Variação do custo total anual, para as <i>Refinarias A+B</i> , em função do percentual de demanda transferida	58

Figura 19 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas <i>Refinarias A+B</i>	59
Figura 20 – Variação do custo anual de produção, para as <i>Refinarias A+B</i> , em função do percentual de demanda transferida	61
Figura 21 – Variação do custo anual de transporte, a partir das <i>Refinarias A+B</i> , em função do percentual de demanda transferida	62
Figura 22 – Variação do custo anual de estoque, a partir das <i>Refinarias A+B</i> , em função do percentual de demanda transferida	63
Figura 23 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 1</i>	64
Figura 24 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 2</i>	65
Figura 25 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 3</i>	65
Figura 26 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas <i>Refinarias A+B</i> , no 1º semestre	66
Figura 27 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas <i>Refinarias A+B</i> , no 2º semestre	67
Figura 28 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 1</i>	68
Figura 29 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 2</i>	68
Figura 30 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o <i>Porto 3</i>	69
Figura 31 – Variação do custo de transporte para os diferentes horizontes de tempo avaliados	70
Figura 32 – Variação do custo de estoque para os diferentes horizontes de tempo avaliados	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distribuição geográfica das bases distribuidoras de asfaltos e das refinarias produtoras no Brasil, por Região	33
Tabela 2 – Distribuição geográfica das bases distribuidoras de asfaltos e das refinarias produtoras no Brasil, por Estado	34
Tabela 3 – Custos obtidos para a configuração atual e para o cenário base	54
Tabela 4 – Conjunto de opções avaliadas para localização do novo polo	55
Tabela 5 – Custos obtidos para o cenário otimizado, e a variação em relação à configuração atual e ao cenário base	60
Tabela 6 – Configuração dos cenários otimizados para cada horizonte temporal avaliado	71

1

Introdução

O Brasil concentra grande parte do transporte de mercadorias e de passageiros no modal rodoviário. Analisando sua evolução histórica, percebe-se que a situação apresentada pelo setor de transportes sempre foi um potencializador para o crescimento econômico nacional. A extensão e a infraestrutura da malha rodoviária influenciam os fluxos e direcionamentos adotados pelo comércio entre empresas e consumidores espalhados pelas regiões brasileiras. Dessa forma, a retomada do crescimento econômico chama atenção para o contínuo melhoramento da infraestrutura de transportes, principalmente com relação às rodovias federais. Para potencializar o desempenho dos modais de transporte e, ainda, para que a economia do país possa crescer em ritmo mais acelerado e eficiente, são necessárias adequação e ampliação da infraestrutura atual, com aplicação de recursos financeiros na execução de projetos urgentes para o Brasil (BRASIL, 2007).

Diante da necessidade de investimentos e permanente manutenção da qualidade e da eficiência das estradas, no sentido de atender as necessidades desse crescimento econômico, a Presidência da República do Brasil lançou, no ano de 2007, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), um programa de investimentos em obras de infraestrutura que destinou R\$ 37,1 bilhões ao setor de transportes. Em 2010, o governo federal lançou o PAC 2, que prevê mais R\$ 50,4 bilhões em obras rodoviárias (Campos Neto et al., 2011). Adicionalmente, o Programa Nacional de Logística e Transportes (PNLT), elaborado pelo Ministério dos Transportes, apresenta a necessidade de uma média anual de investimentos da ordem de R\$ 2,5 bilhões entre 2012 e 2023 para alcançar suas metas de melhoria no setor rodoviário (BRASIL, 2012).

Conforme apontado pelo Plano CNT de Transporte e Logística, elaborado em 2011 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), as intervenções apresentadas para os projetos de infraestrutura no setor de transporte rodoviário contemplam basicamente propostas de construção e adequação de rodovias (CNT, 2011). Nos casos de construção de rodovias, há necessidade de implantação de novos trechos rodoviários ou pavimentação de trechos não pavimentados, enquanto nos casos de adequação de rodovias, faz-se

necessária a duplicação das vias, a implantação de faixa adicional ou a recuperação do pavimento. Em ambos os casos, serviços de pavimentação são fortemente demandados.

Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (Bernucci et al., 2008). As principais razões para o uso intensivo do asfalto na pavimentação são: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, com ou sem aditivos.

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. Atualmente, a única empresa produtora de ligantes asfálticos no Brasil é a Petrobras.

Comprometida com o crescimento do país, a empresa tem ampliado, de forma significativa, a produção e a comercialização de ligantes asfálticos. As vendas de asfaltos em território nacional nos últimos oito anos cresceram cerca de 260% (IBP, 2011). Em 2010, a produção de asfaltos alcançou a marca de 2,763 milhões de toneladas, superando o ano de 2009 em 32%. O principal aumento ocorreu no mercado interno, cujas vendas atingiram 3 milhões de toneladas, 43% a mais em relação a 2009 (PETROBRAS, 2011). Esses resultados são frutos dos esforços e do trabalho integrado da companhia com os clientes, fornecedores e parceiros da cadeia produtiva da pavimentação.

Diante deste contexto, a otimização da cadeia de suprimentos de asfaltos, em especial no elo de fornecimento do produto, ganha particular importância, e o uso de uma ferramenta que comporte sua complexidade passa a ser fundamental.

Desde a década de 60, modelos e sistemas para a otimização e planejamento das atividades de refino e da logística de petróleo, gás e derivados vem sendo desenvolvidos. A Petrobras possui diversos exemplos de aplicações bem sucedidas para o planejamento e otimização de processos baseados em programação matemática, dentro os quais se destaca o sistema de Planejamento do Abastecimento (PLANAB), que fornece as diretrizes básicas de operação da área de Abastecimento da Petrobras. Entretanto, no caso de produtos especiais como os ligantes asfálticos, cujo nível de detalhamento necessário é bem específico e os fluxos financeiros representam uma parcela

muito pequena em relação aos demais derivados de petróleo, o uso desse modelo para o planejamento operacional não é adequado (Duarte, 2002).

Para solucionar esse problema, são utilizados modelos de otimização específicos, elaborados em planilhas eletrônicas. Tais modelos guardam um vínculo com o modelo de programação linear corporativo, no que diz respeito aos dados de aquisição de matérias-primas e preços dos derivados. Porém, se por um lado a utilização desses modelos específicos contribui no planejamento como instrumento de trabalho, por outro lado gera alguns inconvenientes, como a proliferação de planilhas eletrônicas e dados replicados em diferentes tipos de planilhas sem atualização simultânea. Isto dificulta o processo de tomada de decisão, uma vez que não há garantia de que os resultados obtidos por esses modelos são aqueles que apresentam o mínimo custo operacional, além de restringir estudos detalhados envolvendo comparação de cenários.

1.1. Objetivo

Visando auxiliar a otimização da atual rede de distribuição de asfaltos no Brasil, a presente dissertação propõe um modelo de programação linear, que permite avaliar as alternativas de atendimento ao mercado de asfaltos em um horizonte de 12 meses, considerando as restrições nas capacidades de produção, estoque e entrega de cada refinaria produtora de ligantes asfálticos.

O modelo desenvolvido busca, através de parâmetros determinísticos, minimizar os custos totais envolvidos na disponibilidade de asfaltos para atendimento ao mercado, sendo considerados os custos de produção e de armazenamento em cada refinaria e o custo de transporte entre as refinarias e os polos de venda. As variáveis do modelo contemplam o nível de decisão tática, apoiando a tomada de decisão na alocação dos fluxos das refinarias produtoras para os polos de venda, de forma a garantir o atendimento da demanda, bem como na indicação da quantidade de asfaltos a ser produzida por cada refinaria e o estabelecimento dos níveis de estoque.

A cadeia de suprimentos avaliada por este modelo é tipicamente formada por refinarias e polos de venda. Os nós que formam esta rede estão conectados através de arcos que representam os fluxos de asfaltos para garantir o atendimento ao mercado.

Além do desenvolvimento de um modelo matemático que contempla a realidade logística da distribuição de asfaltos, esta dissertação contribui com um

estudo de caso que busca, em nível de decisão estratégica, avaliar a necessidade de implantação de um novo polo de venda, tendo em vista o atendimento da demanda em um horizonte de planejamento de 12 meses. Busca ainda, diante da previsão de vendas, estabelecer o percentual da demanda que será atendido pelo novo polo e definir, dentre um conjunto de polos candidatos, a melhor localização desse novo polo.

1.2. Metodologia

O estudo realizado para esta dissertação compreendeu primeiramente o mapeamento das características da cadeia de suprimentos de asfaltos, em especial do elo produtor, caracterizado pela Petrobras. Esta etapa envolveu o levantamento dos dados que serviram de parâmetros para o modelo proposto.

Em seguida, utilizando o *software* AIMMS, foi desenvolvido o modelo matemático condizente com a realidade específica da rede de distribuição de asfaltos no Brasil. Como a modelagem completa do modelo é uma informação restrita à Petrobras, foi aplicada uma abordagem simplificada e os dados utilizados neste trabalho foram baseados na demanda real do ano de 2013.

Finalmente um estudo de caso foi abordado utilizando o modelo proposto. Diferentes combinações de cenários foram elaboradas, e seus resultados foram analisados e comparados, de modo a permitir a avaliação do modelo e a aderência dos objetivos propostos.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo este primeiro dedicado à introdução, apresentação do objetivo e metodologia. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca dos assuntos aqui tratados, enquanto o Capítulo 3 contém a apresentação do problema. Na sequência, o Capítulo 4 aborda a descrição do modelo. Já o estudo de caso é descrito e analisado no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6, o trabalho se encerra com as conclusões do autor e sugestões de trabalhos subsequentes.

2

Revisão bibliográfica

Esta revisão bibliográfica apresenta o contexto científico no qual este trabalho está inserido, abordando os problemas de planejamento de redes logísticas, bem como sua otimização e o planejamento da distribuição dentro dessas redes.

2.1. Planejamento de redes logísticas

Segundo Ballou (2001a), os problemas de planejamento de redes logísticas consistem em especificar a estrutura através da qual os produtos fluirão de seus pontos de origem até os pontos de demanda. Envolvem, portanto, a determinação das instalações a serem utilizadas e suas localizações, dos produtos e clientes a serem atendidos e dos serviços de transportes a serem utilizados dentro da rede.

A Figura 1 mostra uma rede de distribuição física genérica, com fluxos de produtos entre diversos elos da cadeia logística, conforme mostrado em Ballou (2001a).

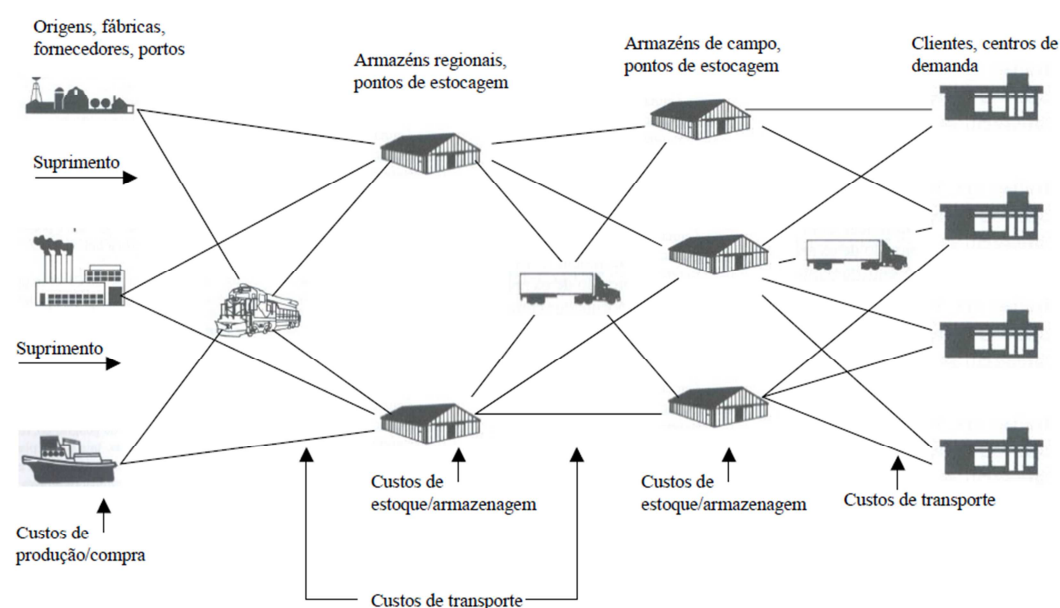


Figura 1 – Esquema de uma rede de distribuição física genérica. Fonte: Ballou (2001a)

Segundo Shapiro (2006), o projeto de redes logísticas faz parte da formação da estratégia logística. O elemento estratégico que direciona o projeto e a operação da companhia é o nível de serviço, a partir do qual a rede logística poderá ser desenhada e sua estratégia estabelecida, sendo definidos os elementos funcionais que dizem respeito a processos e sistemas para gestão de fluxos e de estoques de matéria prima, embalagens e produtos ao longo da rede. É necessário ainda estabelecer os recursos humanos, de tecnologia e de infraestrutura necessários para a execução da estratégia. De acordo com Bowersox (2006), a logística visa prover um melhor nível de serviço, reduzindo custos operacionais e contribuindo com a prosperidade do negócio, através do planejamento, organização e controle efetivo das atividades corporativas.

Goetschalckx et al. (1994) descrevem quatro etapas tradicionais para o projeto do sistema logístico estratégico, iniciando pelo estabelecimento do nível de serviço, necessário para alcançar as estratégias de marketing e vendas estabelecidas pela companhia. Em seguida, é definida a alocação de produção e são tomadas decisões do tipo “fazer ou comprar”. A terceira etapa consiste em selecionar a rede de distribuição, decidindo o número e a localização dos centros de distribuição. Por último, é feita a alocação de clientes aos centros de distribuição segundo um modal de transporte.

Como objetivos para a configuração da rede de distribuição, Ballou (2001a) cita as seguintes estratégias:

- Minimizar todos os custos logísticos relevantes enquanto são satisfeitas as restrições da logística de serviço ao cliente;
- Maximizar o nível de serviço logístico ao cliente enquanto o custo logístico total é mantido alinhado;
- Maximizar a contribuição do lucro feita pela logística através da maximização da margem entre as receitas geradas pelo nível de serviço logístico ao cliente e os custos de fornecê-lo.

Segundo Chopra & Meindl (2001), tais estratégias são definidas através do planejamento integrado de redes logísticas, processo pelo qual a empresa determina os níveis de capacidade de produção e estoque, sobre um horizonte de tempo específico. Seu objetivo é determinar os níveis de produção, estoque e entrega que atendam a previsão de demanda em cada período ao longo do horizonte de planejamento, de modo a minimizar custos logísticos ou maximizar lucros ou nível de serviço logístico, mantendo o alinhamento do custo logístico

total. As seguintes informações são necessárias para criação de um planejamento integrado:

- Previsão de demanda;
- Custos de produção
- Capacidades de produção;
- Tempos de produção;
- Custos de manutenção de estoques
- Custos de atrasos;
- Restrições operacionais e organizacionais.

De acordo com Garcia et al. (2006), a gestão de estoques em uma cadeia logística tem como objetivo encontrar o ponto ótimo para os níveis de estoques, considerando as incertezas associadas tanto à previsão de demanda de produtos finais, quanto ao plano de produção e fornecimento destes produtos e da matéria-prima. Se por um lado o excesso de produto resulta em custos extras de manutenção de estoques (custos operacionais e de oportunidade do capital empatado), por outro lado a falta de estoques de segurança leva a perdas de venda, com consequente prejuízo e deterioração do nível de serviço ao cliente.

Com relação à previsão de demanda, Shapiro (2006) afirma que métodos quantitativos para a previsão de demanda futura, baseados em técnicas estatísticas, são essenciais para a construção de um modelo de gestão da cadeia logística. A análise de séries temporais é uma grande classe de métodos para o desenvolvimento de previsões simplesmente a partir de bases de dados históricos, considerando padrões apresentados em anos anteriores, tais como tendências ou sazonalidades.

Ainda segundo Shapiro (2006), os modelos de otimização para planejamento de produção e os sistemas de modelagem para escalonamento de produção, no nível operacional, devem ser personalizados para as peculiaridades do ambiente de produção, enquanto nos níveis do planejamento tático e estratégico, onde detalhes de tempo são menos importantes, as várias classes de problemas de planejamento de produção, muitas vezes podem ser modeladas com precisão através de modelos de uso geral e sistemas de modelagem que lidam com decisões de planejamento multi-período. Ainda assim, a coordenação intertemporal dos planos de produção estratégico, tático e operacional é muito importante, pois permite ligar coerentemente modelos operacionais detalhados com modelos táticos agregados.

A qualidade de um planejamento integrado exerce um impacto significativo sobre a lucratividade da empresa. Um planejamento deficiente pode resultar em perda de vendas e perda de lucros, caso o estoque e a produção disponíveis forem insuficientes para atender à demanda; pode ainda resultar em um nível de estoque excessivo, elevando os custos.

Dentre as parcelas de custos, o custo de transporte é frequentemente o mais visível no planejamento de redes logísticas, podendo atingir até cerca de 30% do total, segundo Bowersox et al. (2006), enquanto, de acordo com Wanke (2001), os custos de armazenagem muitas vezes estão relacionados aos custos fixos de abertura e operação das instalações.

Quando uma empresa inicia sua atuação em novos mercados ou em novos segmentos de produtos, faz-se necessário o planejamento de uma nova rede de distribuição. Ocorrendo alterações no perfil do mercado, como variações nos níveis de demanda e no perfil de distribuição geográfica, bem como variações nos custos operacionais, a estrutura física da rede logística precisa ser readequada. Além disso, fusões, aquisições e parcerias estratégicas também provocam a necessidade de expansão ou de reconfiguração da rede logística, a fim de explorar os benefícios e as sinergias da integração das operações adquiridas.

2.2.

Otimização do planejamento de redes logísticas

Técnicas de modelagem através da Pesquisa Operacional são cada vez mais utilizadas para definir o arranjo da cadeia de suprimento a fim de proporcionar não apenas uma solução viável, mas, em muitos casos, uma solução ótima para o problema de planejamento de redes logísticas (Farias & Borenstein, 2012). Na literatura é possível encontrar diversos modelos matemáticos, principalmente de programação linear, para o projeto de cadeias de suprimentos que incorporam diversos aspectos das esferas estratégica, tática e operacional.

Segundo Marcellino (2012), as ferramentas encontradas na literatura para otimização da cadeia de suprimentos de petróleo estão concentradas em partes específicas desse processo, levando à conclusão de que somente subsistemas da cadeia de suprimentos têm sido estudados em um nível razoável de detalhe.

De forma geral, o planejamento é dividido em três horizontes de tempo: estratégico, tático e operacional, conforme Leiras et al. (2013). O planejamento

estratégico relaciona-se com objetivos de longo prazo e determina a estrutura da cadeia de abastecimento (por exemplo, a localização de instalações), enquanto o planejamento tático apresenta médio prazo e foca em decisões como a atribuição de metas de produção para as instalações e o transporte de equipamentos para centros de distribuição. A distribuição de tarefas a cada elo da cadeia, considerando recursos e restrições de tempo, são resultados do planejamento operacional, de curto prazo. O horizonte de longo prazo abrange o período de tempo de um a vários anos, intervalos com horizonte de médio prazo varia de alguns meses a um ano, e horizonte de curto prazo cobre até 3 meses.

Como exemplos de aplicações recentes envolvendo otimização em nível de planejamento estratégico podem ser citados os trabalhos de Leão et al. (2011) e Oliveira et al. (2013). O primeiro apresenta uma análise integrada da cadeia de suprimentos de óleos vegetais para a produção de biodiesel, proveniente de fazendas familiares, e propõe um modelo matemático de otimização como ferramenta de análise para tomada de decisões estratégicas, enquanto o segundo aborda decisões no nível estratégico, como investimento em tanques e expansões das opções de transporte, objetivando redução dos custos logísticos e de investimento para um sistema de *downstream*. Uma revisão abrangente dos trabalhos publicados nas últimas três décadas sobre o uso de modelos de programação matemática no âmbito dos planejamentos estratégico e tático, aplicados ao contexto da cadeia de suprimentos de petróleo, foi realizado por Sahebi et al. (2014).

Outros trabalhos recentes também abordam o uso de modelos matemáticos de planejamentos estratégico, tático e operacional para a cadeia de suprimento de petróleo. Enquanto An et al. (2011) avaliam diferentes tipos de modelos para aplicação na indústria de biocombustíveis, Leiras et al. (2011) categorizam os modelos de planejamento da cadeia de petróleo por seu segmento (*upstream*, *midstream*, ou *downstream*), pelo nível de planejamento (estratégico, tático ou operacional), pelo tipo de problema (linear, não linear e linear inteiro-mista, ou não linear inteiro-mista), e pelo tipo de modelo (determinístico ou estocástico). Shah et al. (2010) abordam as metodologias utilizadas no estudo da programação, do planejamento e da gestão da cadeia de suprimento nas operações de refino de petróleo. Fernandes et al. (2013) revisaram a literatura disponível sobre cadeia de suprimento de petróleo. O trabalho analisou diversas publicações na área e identificou os desafios futuros a serem abordados: melhoria de modelos de operações de refino e modelos

integrados para a gestão da cadeia de suprimentos, dando origem a uma proposta de planejamento colaborativo, no trabalho de Fernandes et al. (2014).

Joly & Pinto (2003) propõem o emprego das técnicas matemáticas do tipo inteiro-mista para solução de problemas de programação de curto prazo na produção de combustíveis e asfaltos, resultando numa solução complexa devido ao grande número de alternativas de decisões operacionais para satisfazer as demandas de todos os produtos. Ainda no âmbito dos produtos especiais, que são os derivados de petróleo com aplicações diferentes de combustíveis, Casas-Liza & Pinto (2005) apresentam modelos de programação linear inteiro-mista para a programação ótima de uma planta de produção de óleos lubrificantes e parafinas, considerando produção contínua e produção em bateladas, para um horizonte de 30 dias. Mais recentemente, trabalho similar a esse foi desenvolvido por Yadav (2014).

Dentro da atividade de exploração e produção de petróleo no segmento *offshore*, Serpa & Hamacher (2012) apresentam um modelo de programação linear inteiro-mista de apoio à decisão de compra e distribuição de dutos flexíveis e umbilicais. Já o trabalho de Aires et al. (2004) aborda especificamente a otimização da cadeia de suprimento de petróleo na Petrobras e descreve como a modelagem matemática é utilizada para solucionar problemas de alocação de petróleos nas refinarias, dentro de um horizonte de tempo de 60 períodos. Rocha et al. (2009), além de estudarem métodos de otimização da alocação de petróleos, implementam um algoritmo que indica o agendamento da descarga de cada plataforma, a ser combinada com as campanhas de processamento de petróleo bruto planejadas nas refinarias.

Em se tratando do problema de transporte dentro da cadeia de suprimento de petróleo, modelos de planejamentos táticos foram estudados por Aizemberg et al. (2014) para o transporte de petróleo em navios-tanque, que compararam diferentes formulações matemáticas para o problema, considerando o nível de estoque diário em cada ponto de armazenamento. Os trabalhos de Felizari (2009), Boschetto et al. (2010) e Souza Filho et al. (2011) abordam um modelo de programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos, no âmbito do planejamento operacional, através do desenvolvimento de uma estrutura de otimização que auxilia a tarefa de escalonamento das atividades de transporte.

Considerando a análise de investimentos na cadeia de suprimentos *downstream* da indústria petrolífera, Fiorencio et al. (2012) propuseram e avaliaram as funcionalidades de um modelo matemático aplicado como

instrumento de análise no apoio à tomada de decisões nas alternativas de investimento na rede logística, sejam elas de expansão das capacidades de transporte, de movimentação ou de estocagem, mostrando ainda a sinergia no caso de ampliação do terminal e do duto.

2.3.

Planejamento da distribuição nas redes logísticas

Conforme Ballou (2001a), a distribuição física é o ramo da logística empresarial que trata da movimentação, estocagem e processamento de pedidos dos produtos finais da empresa. O objetivo geral da distribuição física, como meta ideal, é o de levar os produtos acabados para os lugares certos, no momento certo e com o nível de serviço desejado, pelo menor custo possível.

O planejamento da distribuição física é um problema de pesquisa referenciada no domínio das redes logísticas para atender as necessidades dos clientes, melhorando a eficiência do desempenho das operações. Segundo Mula et al. (2010), com a decisão da alocação do fluxo de produtos, é possível um equilíbrio integrado entre a oferta e a demanda, em um curto período de tempo.

Para o planejamento da distribuição, Ivanov et al. (2014) afirmam que os seguintes dados são necessários:

- Localização das instalações e suas capacidades de armazenamento;
- Demanda dos clientes a partir de previsões;
- Políticas de controle de estoque;
- Capacidades de transporte para a rede logística considerada.

Segundo Manzini & Bindi (2009), os objetivos da otimização são geralmente orientados a minimização de custos, através do uso de programação linear ou programação linear inteiro-mista. Com isso, é garantido o atendimento ao mercado, além de haver aumento na receita. Através desse planejamento, os gargalos podem ser identificados, e a necessidade de investimento em novas instalações ou expansão de capacidade pode ser indicada.

Proto (2006) propôs um modelo de planejamento agregado de produção e distribuição, com múltiplas localidades. Tal modelo consiste em determinar os níveis de produção, estoque e mão-de-obra necessários para atender a demanda ao menor custo possível, agregando parâmetros como demanda dos produtos e capacidades dos centros de produção.

Ainda segundo Proto (2006), o horizonte do planejamento agregado de produção e distribuição pode variar de 6 a 24 meses, sendo o mais comum de 12 meses. Os principais fatores que determinam o horizonte de planejamento são perfil de demanda, características e custos do processo produtivo e custos de mão-de-obra. Esse tipo de planejamento é particularmente importante quando existem variações significativas nos parâmetros custos de produção, custos de mão-de-obra, capacidade produtiva e demanda dentro do horizonte de planejamento. O principal objetivo é elaborar um plano de produção que atenda a demanda futura ao menor custo possível, sujeito a variações na demanda e possíveis limitações na capacidade produtiva em função de restrições de capacidade dos equipamentos ou de mão-de-obra.

O trabalho de Mula et al. (2010) apresenta uma revisão dos estudos mais recentes abordando o planejamento integrado de produção e distribuição, usando diferentes tipos de modelagem matemática, divididos de acordo com a estrutura da cadeia de suprimentos, o nível de decisão e a aplicação prática, dentre outros critérios. Os autores concluíram que muitos dos trabalhos revisados apresentaram problemas de planejamento no nível tático, usando principalmente programação linear inteiro-mista para minimizar os custos totais na cadeia de suprimentos.

As decisões que envolvem o planejamento de redes de distribuição estão fortemente relacionadas com as decisões sobre a localização de facilidades, seja pela necessidade de se construir uma nova rede logística, seja pela adequação de uma rede que já está em vigor. Como destacado por Ballou (2001b) e Harrison (2004), decisões de readequações em redes de distribuição podem resultar em uma redução de 5 a 15% dos custos logísticos totais.

De forma geral, os problemas de localização de facilidades são definidos em termos de dois elementos: espaço e tempo, sendo indicados no planejamento o local geográfico onde as novas instalações ficarão localizadas e o período em que deverão ter suas operações iniciadas. Tanto a variável espaço quanto a variável tempo podem ser analisadas por aspectos discretos e contínuos. Assim, se a variável espaço é considerada discreta, a localização de uma instalação será indicada apenas em alguns pontos específicos, enquanto para um espaço contínuo a instalação é permitida em qualquer lugar da área de delimitação do planejamento. Além disso, definir a variável tempo como discreta significa estabelecer que uma nova instalação ou modificação das instalações existentes é permitida em determinados períodos, enquanto para o tempo

contínuo essa restrição não existe. Arabani & Farahani (2012) apresentam uma revisão que aborda a dinâmica dos problemas de localização.

Adicionalmente, as organizações buscam vantagem competitiva em aspectos que envolvem as questões ambientais e sociais. Chen et al. (2014) apresentam uma revisão da literatura sobre a abordagem da sustentabilidade nas decisões de localização de facilidades.

2.4. Contextualização

Os estudos recentes disponíveis na literatura sobre a otimização da cadeia de suprimentos de produtos asfálticos baseiam-se na melhoria da gestão do processo e estão concentrados nos países da Europa. Para o abastecimento da Zona Mediterrânea da Europa, Silva (2008) propôs melhorias no contrato de compra e venda estabelecido com empresas concorrentes, o que é especialmente relevante em casos de força maior, sendo possível recorrer a contratos de emergência. Cabe ressaltar que essa estratégia não é possível de ser adotada no Brasil, visto que, há apenas uma empresa produtora de ligantes asfálticos no país, a Petrobras. Já Oliveira (2008) analisou o abastecimento de asfaltos na Zona Noroeste da Europa e identificou, como principais entraves para a otimização da cadeia, problemas na gestão da informação, como o controle da entrega de produtos e o cumprimento das quotas diárias acertadas com os clientes; estudou ainda a viabilidade de implementação do transporte marítimo massivo a longo prazo, como forma de melhorar o atendimento ao mercado e obter melhores margens. Ainda na Zona Noroeste da Europa, Amorim (2009) avaliou as possibilidades de exportação de asfaltos, sugerindo mudanças nos níveis operacional, tático e estratégico; nesse último nível, foi realizado um estudo baseado na implantação de um novo ponto de carregamento do produto para atendimento a diferentes níveis de demanda, a partir da reativação da produção de asfaltos em uma das refinarias da região.

Nesta dissertação, será abordado o problema do planejamento da distribuição de produtos asfálticos no Brasil, baseado no uso otimizado da rede logística atualmente existente. Para isso, serão utilizadas as estratégias de planejamento integrado de redes logísticas, definidas por Chopra & Meindl (2001), como a determinação dos níveis de produção, estoque e entrega, dada as restrições das capacidades de produção e estoque, que atendam a previsão

de demanda em cada período ao longo do horizonte de planejamento, de modo a minimizar os custos logísticos, sobre um horizonte de tempo específico.

Dado o tipo de modelagem necessária para solução do problema, o modelo matemático aqui proposto será elaborado baseado na programação linear, que utiliza sistemas de equações lineares compostos por variáveis contínuas não negativas.

Já o planejamento da distribuição otimizada envolverá, como estudo de caso, a proposição de criação de um novo polo de venda, baseado na garantia do atendimento à demanda ao menor custo possível, como os trabalhos apontados na revisão elaborada por Mula et al. (2010).

3

Descrição do problema

Neste capítulo serão apresentados os aspectos relevantes sobre a pavimentação asfáltica e a cadeia produtiva do segmento de asfaltos, bem como o problema a ser abordado através deste estudo.

3.1.

A pavimentação e os ligantes asfálticos no Brasil

Segundo Bernucci et al. (2008), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, enquanto os pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos.

No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são constituídas de pavimentos flexíveis, ou seja, utilizam revestimento asfáltico na camada mais externa. Essa camada é destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas mais internas, além de impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, e o seu uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também; apenas uma pequena parte da produção é destinada às aplicações industriais, como impermeabilizantes, isolantes etc. (Santos, 2002). Pode ser definido como uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequenas proporções.

No que diz respeito à terminologia, há uma preferência dos europeus em utilizar o termo betume para designar o ligante obtido do petróleo, enquanto os americanos, inclusive os brasileiros, utilizam mais comumente o termo asfalto para designar o mesmo material. Os europeus utilizam às vezes o termo *asphalt* para designar a mistura dos agregados com o asfalto (Shell, 2003), o que se designa atualmente no Brasil genericamente de mistura asfáltica e nos Estados Unidos de *asphalt mixture* ou *asphalt mix*. Neste trabalho, os termos asfaltos, ligantes asfálticos e produtos asfálticos serão utilizados como sinônimos para designar o produto obtido do refino de petróleo que possui características que permitem seu uso como matéria-prima dos revestimento asfálticos.

3.2.

Processos de obtenção dos ligantes asfálticos

De acordo com Bernucci et al. (2008), quase todo o asfalto em uso hoje em dia é obtido do processamento de petróleo bruto em plantas especiais denominadas refinarias. Muitas refinarias são localizadas próximas a locais com transporte por água, ou são supridas por dutos a partir de terminais marítimos.

A escolha do petróleo que pode resultar em um asfalto dentro da especificação para uso em pavimentação é feita através de avaliação de resíduos de vácuo de petróleos (Leite, 1999). Atualmente, os asfaltos venezuelanos, denominados por Boscan e Bachaquero, são os que produzem asfaltos de melhor qualidade para uso na pavimentação (Nogueira, 2008). Um exemplo de petróleo extra pesado produzido no Brasil é o do campo de Fazenda Alegre, no Espírito Santo.

O refino é o conjunto de processos de separação e/ou transformação dos constituintes do petróleo. Existem diferentes processos de refino de petróleo que produzem os ligantes asfálticos, sendo o da destilação direta o mais antigo, podendo ser realizado em um ou dois estágios, de acordo com as características do petróleo. Quando o petróleo é de base asfáltica, designado por petróleo pesado (isto é, tem muito asfalto, proporcionalmente a outras frações ou petróleos), é necessário apenas um estágio de destilação a vácuo e este processo produz um ligante asfáltico de consistência adequada para a pavimentação. Para os petróleos que não são de base asfáltica, são necessários dois estágios de destilação: atmosférica e a vácuo. Petróleos ditos intermediários são processados em dois estágios, resultando no chamado resíduo de vácuo, cujas condições de pressão e temperatura definem o atendimento às

especificações para uso em pavimentação. Quando o petróleo processado é leve ou intermediário, pode ser ainda empregada a desasfaltação por solvente, que consiste em um processo em que os asfaltenos são extraídos dos resíduos de vácuo utilizando solventes de baixa massa molar (ex. propano/butano) dos resíduos de vácuo (Leite, 1999; Shell, 2003).

A Figura 2 apresenta o esquema de produção de asfaltos em dois estágios de destilação, que é o mais comum nas refinarias brasileiras, comumente utilizado para petróleos que não são de base asfáltica.

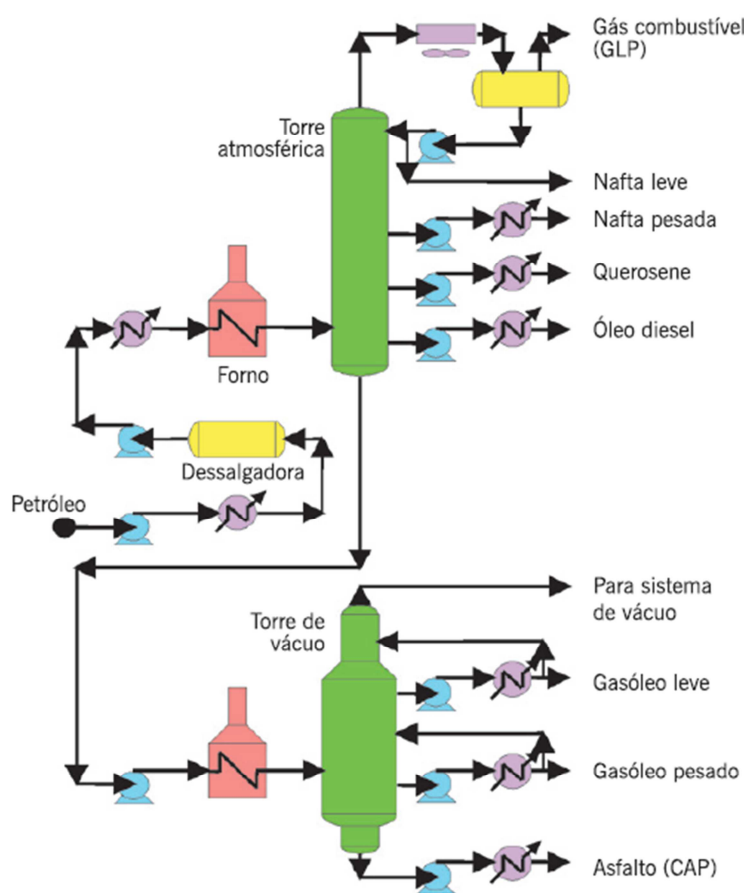


Figura 2 – Representação esquemática do processo de produção de asfaltos em dois estágios.
Fonte: Tonial & Bastos, 1995

Por ser um produto ultraviscoso e termossensível, o ligante asfáltico exige transporte e armazenamento adequados que o mantenha aquecido entre 140°C e 177°C (Tonial, 2001). Tal característica implica um controle constante durante todas as etapas da logística e do manuseio do produto, tanto pelo produtor, quanto pelos distribuidores e consumidores, de forma a manter a temperatura adequada em cada situação, viabilizando seu escoamento de um local para

outro (por exemplo, do tanque para o caminhão), além de evitar perda de qualidade do produto (principalmente não se permitindo ultrapassar a temperatura máxima). Os ligantes asfálticos podem ser mantidos estocados por um tempo considerável nos tanques das refinarias sem que sejam afetados adversamente, desde que haja um controle de temperatura.

3.3.

Cadeia produtiva do segmento de asfaltos no Brasil

No segmento de pavimentação atuam muitos agentes que detêm responsabilidade em relação ao asfalto aplicado nas obras, tais como: produtor, distribuidor, transportador, construtor, fornecedores de materiais, projetistas, fiscais de obra, etc. e que configuram um grande elenco de atores na obtenção da qualidade ao longo do processo construtivo (FIESP, 2009).

Na Figura 3 está ilustrado o relacionamento entre os principais envolvidos na cadeia produtiva do segmento de asfaltos, sendo identificados cinco grupos de agentes.

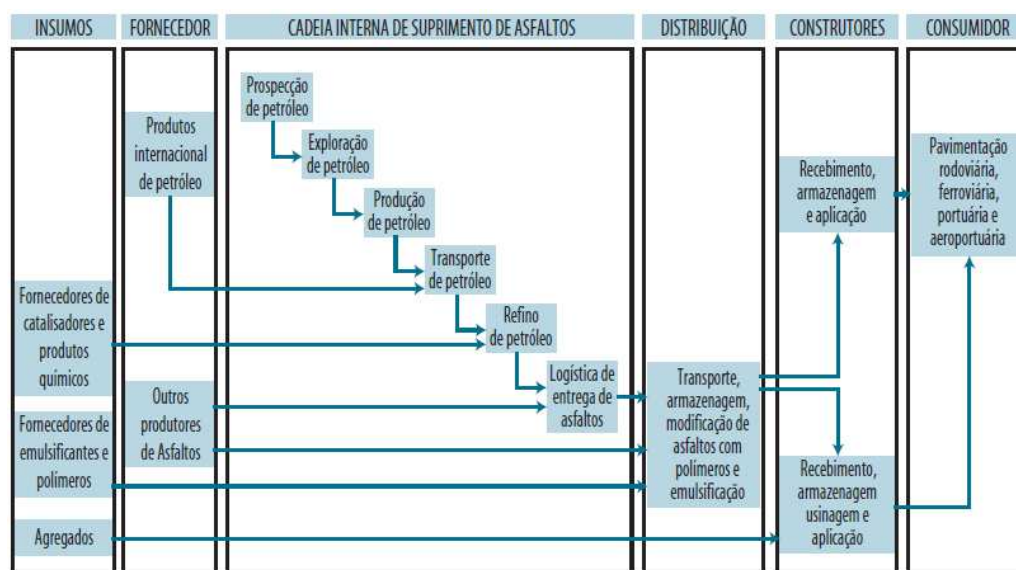


Figura 3 – Arquitetura da cadeia de suprimento de asfaltos. Fonte: FIESP, 2009

O primeiro grupo de agentes refere-se às empresas que fornecem insumos que podem ser usados na etapa de refino de petróleo, na etapa de distribuição de asfaltos e na própria aplicação.

Os dois elos seguintes formam o segundo grupo de agentes: fornecedor e cadeia interna de suprimento de asfaltos. No caso brasileiro, são representados

basicamente por uma única empresa, a Petrobras. Como refinadora de petróleo, a Petrobras produz o ligante asfáltico, que se divide em os utilizados em obras de pavimentação e os preparados para aplicações industriais (asfaltos para impermeabilização).

Ao deixar a refinaria, inicia-se a atuação do terceiro grupo de agentes: as distribuidoras. O ligante asfáltico é predominantemente transportado por distribuidoras credenciadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que as autoriza não só a realizarem serviço de transporte dos asfaltos para as suas áreas de aplicação, mas também de executarem modificações no produto. Nesse segmento da cadeia também aparecem as transportadoras com autorização específica da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). As transportadoras podem ser contratadas por consumidores finais que comprem asfaltos diretamente das refinarias ou são subcontratadas por distribuidoras. As transportadoras têm autorização apenas para transportar o produto asfalto, sendo vedada a possibilidade de realizarem qualquer outro tipo de serviço relacionado à transformação do produto.

O asfalto é entregue por uma transportadora ou distribuidora aos construtores, que são responsáveis pelas execuções de obras de pavimentação, públicas ou privadas, e constituem o quarto grupo de agentes na cadeia logística do segmento asfáltico. As construtoras recebem também os materiais pétreos e os fileres industriais para comporem as chamadas misturas asfálticas, cuja agregação ao ligante se faz em usinas apropriadas, que podem ser da própria construtora ou de terceiros. O conjunto de agregados usinado com o asfalto constitui a massa asfáltica que será utilizada durante a fase final de pavimentação de vias urbanas, rurais, pátios, terminais e aeroportos compondo os revestimentos mais nobres. Podem-se empregar outros tipos de revestimentos asfálticos, constituídos por misturas a frio realizadas em equipamentos especiais e aplicadas diretamente na pista ou ainda tratamentos superficiais, onde o ligante asfáltico é aplicado na pista, seguidos do espalhamento dos agregados sobre a camada de ligante.

Por fim, a cadeia do segmento de asfalto encerra-se com o consumidor final, que pertence ao quinto grupo de agentes. Os consumidores finais, como o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), os DER's de cada estado (Departamentos de Estradas de Rodagem), prefeituras e concessionárias, são demandantes finais que definem os procedimentos e especificação de serviços para aplicação do asfalto, e contratam os projetistas para definirem as estruturas dos pavimentos e os materiais a serem utilizados

nas obras de pavimentação sob sua responsabilidade. Também podem ser os compradores diretos de produtos asfálticos nas refinarias.

Existem aplicações de asfaltos para fins de impermeabilização industrial, por exemplo, mas o principal uso é na pavimentação rodoviária, portuária e aeroportuária. Isto faz com que o consumidor final seja, quase sempre, uma instância do governo (federal, estadual ou municipal), seguido das concessionárias privadas. As concessionárias são responsáveis por cerca de 10% da malha rodoviária em relação ao total da malha pavimentada em extensão, mas que corresponde a trechos duplicados ou até com várias faixas de tráfego, portanto consomem bastante material asfáltico visto que também fazem manutenções mais frequentes por força dos contratos.

3.4. Panorama atual

Com a necessidade de melhoria da qualidade das rodovias brasileiras e a importância da ampliação da infraestrutura de transportes, a demanda por asfaltos vem crescendo fortemente. Por conta do ciclo vigoroso de expansão e recuperação de obras viárias recém-concedidas a concessionárias privadas e, sobretudo, por conta de novos empreendimentos em rodovias, aeroportos e portos, que compõem o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), as vendas de asfaltos cresceram cerca de 260% entre 2003 e 2010 (IBP, 2011).

A possibilidade de aumento de consumo de asfalto não se limita apenas à necessidade de novas rodovias. A demanda por asfalto encontra-se reprimida também para a conservação da malha viária já existente no país, ainda mais quando esta apresenta elevadas necessidades de melhorias, como apontam as pesquisas realizadas anualmente pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2013), admitindo critérios que incluem vários aspectos das vias, inclusive a condição dos pavimentos.

3.4.1. Cesta de produtos asfálticos

Por se tratar de produto derivado do petróleo, as atividades relativas ao abastecimento de asfaltos no Brasil são regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Dentre os produtos definidos pela ANP em sua cesta de produtos asfálticos, a Petrobras comercializa os

seguintes (ANP, 2008): cimento asfáltico CAP 30/45, cimento asfáltico CAP 50/70, asfalto diluído CR-250 e asfalto diluído CM-30.

Cada tipo de cimento asfáltico de petróleo (CAP) tem um uso mais apropriado, consideradas as características do terreno de fundação no qual o pavimento vai se apoiar (subleito), a temperatura do ambiente, o nível de carregamento de tráfego previsto e velocidade média dos veículos que utilizarão o pavimento construído ao longo da sua vida útil. Já o asfalto diluído de petróleo (ADP) resulta da diluição do CAP por nafta em processo simples de homogeneização; o resultado são produtos menos viscosos que podem ser aplicados a temperaturas próximas da ambiente, e que após a evaporação de seus componentes de diluição deixa como resíduo o próprio CAP. No Brasil, os asfaltos diluídos são classificados nas categorias de cura rápida (CR) e de cura média (CM).

Outros produtos pertencentes à cesta de produtos asfálticos da ANP, como as emulsões asfálticas e os asfaltos modificados por polímeros, são fabricados pelos distribuidores a partir dos cimentos asfálticos comercializados pela Petrobras.

Neste trabalho, adotou-se como premissa que os diferentes tipos de produtos que são fornecidos pela Petrobras e que fazem parte da cesta de produtos asfálticos serão considerados como um único produto: asfaltos.

3.4.2.

Localização das refinarias e das distribuidoras

A Figura 4 aponta a localização das refinarias que produzem asfaltos, atualmente existentes no Brasil, todas pertencentes à Petrobras. São nove refinarias produtoras de asfaltos, e estão localizadas nos seguintes estados: Amazonas, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo (dois), Paraná e Rio Grande do Sul. A Petrobras possui ainda uma unidade de exploração de xisto, localizada no Paraná, que produz insumos para pavimentação. Possui também fábricas de emulsões asfálticas pertencentes à Petrobras Distribuidora, e laboratórios de análise em todas as suas refinarias.

As Tabelas 1 e 2 apresentam a distribuição geográfica das 40 bases operacionais autorizadas a exercerem a atividade de distribuição de asfaltos no Brasil, bem como das 9 refinarias produtoras de asfaltos, separadas por Regiões e por Estados, respectivamente.

O transporte entre as refinarias produtoras e as bases operacionais de distribuição de asfaltos se dá através de uma frota de caminhões especialmente desenvolvidos e com dedicação exclusiva, providos de maçaricos de aquecimento e isolamento térmico, necessários para a manutenção da temperatura do produto durante o transporte. Por este motivo, as distribuidoras atuam, prioritariamente, nos Estados em que estão sediadas, de forma a evitar longos trajetos para transporte do produto.



Figura 4 – Localização das refinarias brasileiras produtoras de asfaltos. Fonte: Bernucci et al., 2008

Região	DISTRIBUIDORAS		REFINARIAS
	Nº	%	Nº
Sudeste	10	25,0%	4
Centro-Oeste	9	22,5%	-
Sul	8	20,0%	2
Norte	7	17,5%	1
Nordeste	6	15,0%	2
TOTAL	40	100,0%	9

Tabela 1 – Distribuição geográfica das bases distribuidoras de asfaltos e das refinarias produtoras no Brasil, por Região. Fonte: ANP, 2014

Região	Estado	DISTRIBUIDORAS		REFINARIAS
		Nº	%	Nº
Sudeste	São Paulo	5	12,5%	2
	Minas Gerais	3	7,5%	1
	Rio de Janeiro	2	5,0%	1
Centro-Oeste	Mato Grosso	5	12,5%	-
	Goiás	3	7,5%	-
	Distrito Federal	1	2,5%	-
Sul	Paraná	7	17,5%	1
	Santa Catarina	1	2,5%	-
	Rio Grande do Sul	-	-	1
Norte	Pará	3	7,5%	-
	Amazonas	2	5,0%	1
	Tocantins	2	5,0%	-
Nordeste	Bahia	3	7,5%	1
	Ceará	3	7,5%	1
TOTAL		40	100,0%	9

Tabela 2 – Distribuição geográfica das bases distribuidoras de asfaltos e das refinarias produtoras no Brasil, por Estado. Fonte: ANP, 2014

3.4.3.

Limitações das bases operacionais de distribuição de asfaltos

De acordo com a ANP (2014), quatorze Estados brasileiros não possuem distribuidoras de asfaltos operacionalmente instaladas, sendo eles: Acre, Amapá, Rondônia, Roraima, Alagoas, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Sergipe, Rio Grande do Norte, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo e Rio Grande do Sul. Tais restrições dificultam o fornecimento do produto para obras nestes estados, demandando maiores distâncias de transporte e previsões antecipadas das necessidades de produtos. Estados que não possuem base de distribuição dependem da retirada de asfalto em Estados vizinhos ou da retirada direta em refinarias. As retiradas de asfalto nas regiões Norte e Nordeste, por exemplo, estão limitadas a três refinarias. Logo, qualquer problema relacionado ao transporte ou à retirada do asfalto em refinarias e nas bases de distribuição de asfalto nos Estados vizinhos pode ocasionar paralisação de obras e consequentemente atrasos no cronograma de entrega.

Além da quantidade limitada de bases operacionais de distribuição de asfaltos, restritas a 12 Estados brasileiros e ao Distrito Federal, algumas

distribuidoras possuem tancagem limitada, atendendo apenas às exigências mínimas da ANP. A inexistência de bases de distribuição de asfaltos em alguns Estados do país faz necessária a avaliação se tais Estados realmente possuem uma demanda insuficiente para que nenhum deles tenha ao menos uma base de distribuição, ou se a própria ANP deveria impor maiores obrigações às distribuidoras quanto ao atendimento obrigatório de todos os Estados por tancagens mínimas (FIESP, 2009).

Adicionalmente, por não possuir tancagem suficiente, a construtora e/ou o consumidor final se utilizam das carretas dos distribuidores para manter um estoque sobre rodas, reduzindo drasticamente a quantidade de carretas disponíveis, justamente quando são mais necessárias. Dessa forma, durante os meses de pico o sistema de transporte passa a sofrer com a retenção das carretas nos clientes finais.

3.4.4.

Perfis de produção e de sazonalidade da demanda

A Figura 5 apresenta a produção anual de asfaltos no Brasil nos últimos 13 anos.

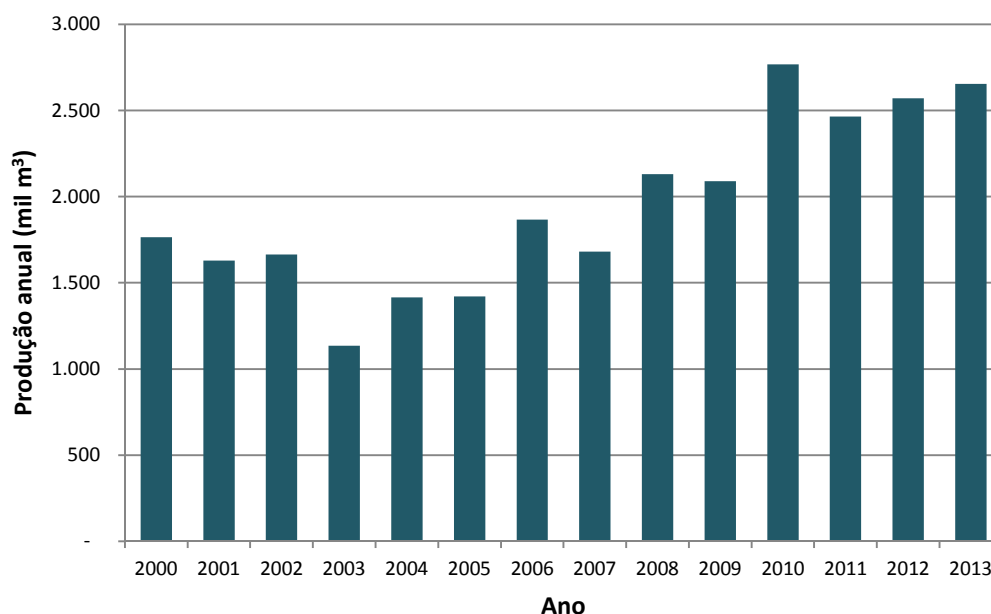


Figura 5 – Produção anual de asfaltos no Brasil, de 2000 a 2013. Fonte: ANP, 2014a

Observa-se que a produção vem aumentando desde 2003, quando teve início a retomada dos investimentos em obras de infraestrutura no setor de

transporte. A partir de 2007, quando o governo federal lançou o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), a produção alcançou um novo patamar, da ordem de 2 milhões m³, e bateu recorde em 2010, quando superou a marca dos 2,7 milhões m³.

Observa-se ainda que em anos eleitorais, correspondentes aos anos pares, existe uma elevação na produção, evidenciando a influência do calendário eleitoral na demanda de asfaltos no Brasil, conforme apontado pela FIESP (2009), haja vista que o consumidor final, na maioria das vezes, é o governo (federal, estadual ou municipal). Outro fator que gera sazonalidade na demanda de asfaltos é o período de chuvas, quando as empreiteiras interrompem as obras em andamento, dada a dificuldade em prosseguir com o serviço, e as distribuidoras deixam de retirar o produto das refinarias, uma vez que possuem capacidade de tancagem bastante limitada. Adicionalmente, o ciclo de contratação de obras e liberação de verba estabelecido pelo governo também contribui para o perfil sazonal característico da demanda de asfaltos no Brasil.

A Figura 6, onde é mostrada a produção mensal de asfaltos no Brasil, de 2011 a 2013, evidencia essa característica sazonal, mostrando que o pico de produção acontece no início do 2º semestre, nos meses que antecedem as eleições, enquanto os meses de dezembro, janeiro e fevereiro apresentam as menores demandas em função do período de chuvas.

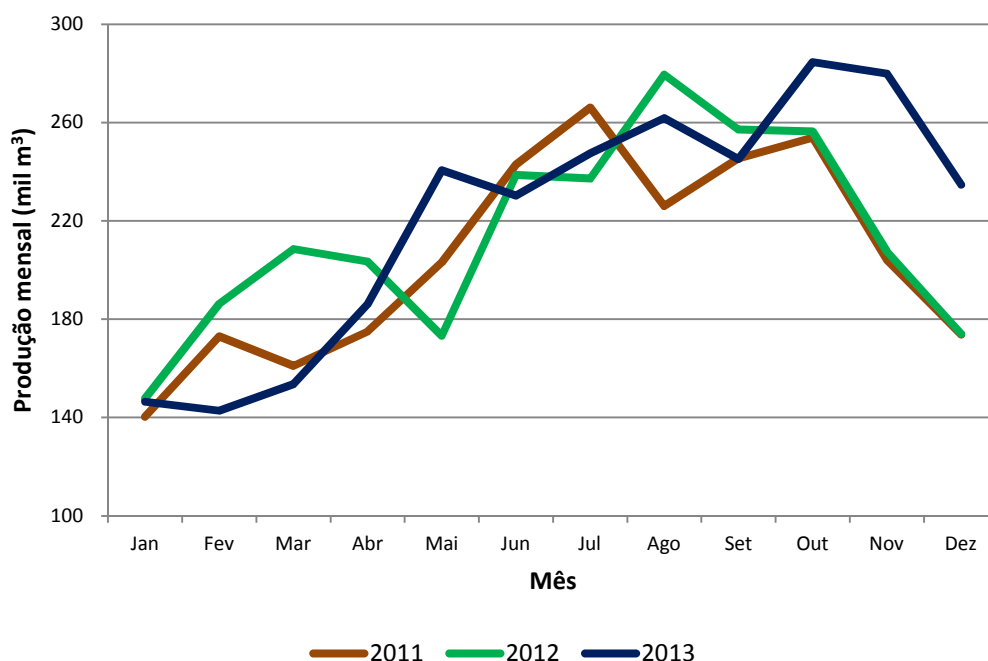


Figura 6 – Produção mensal de asfaltos no Brasil, de 2011 a 2013. Fonte: ANP, 2014a

A Figura 7 apresenta a produção de asfaltos por Estado brasileiro para os anos de 2011 a 2013, bem como o percentual de participação na produção de cada estado, ano a ano.

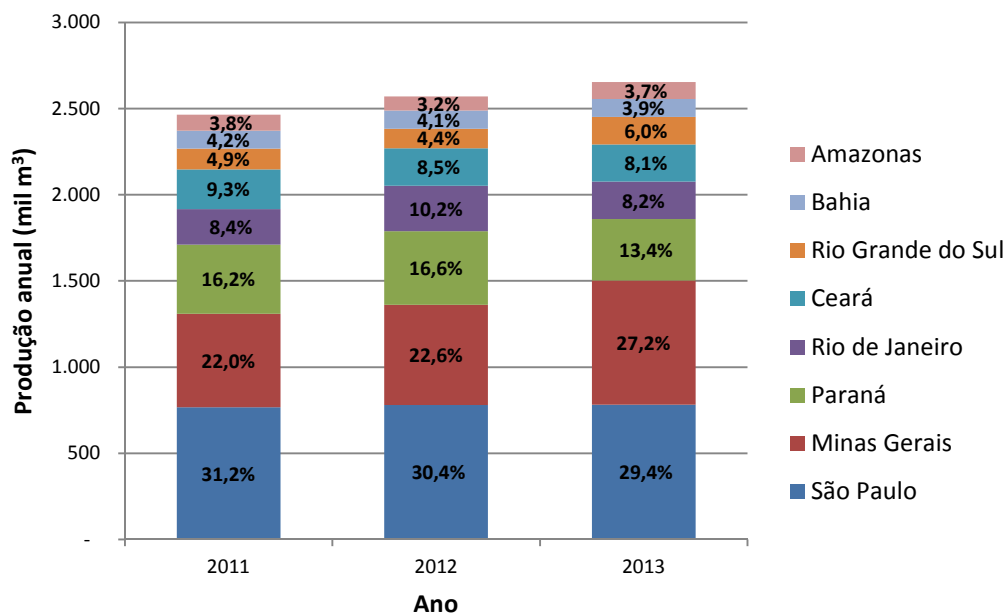


Figura 7 – Produção anual de asfaltos por Estado brasileiro, de 2011 a 2013. Fonte: ANP, 2014a

Observa-se que a produção de asfaltos no Brasil concentra-se nos estados da Região Sudeste, onde são produzidos mais de 60% da produção nacional, enquanto os estados da Região Norte/Nordeste apresentam os menores níveis de produção (cerca de 15%).

3.4.5. Estratégias logísticas para atendimento da demanda

Em função da forte demanda na região Nordeste e da limitada capacidade de produção nas refinarias lá instaladas, a Petrobras passou a importar asfaltos por via marítima dos Estados Unidos, Europa e Ásia a partir de 2009, com o objetivo de suprir o déficit regional do balanço entre oferta e demanda. De acordo com IBP (2011), as importações mostraram-se necessárias em razão das longas distâncias e dos altos custos do transporte rodoviário para o suprimento a partir do Sudeste.

A Figura 8 mostra a quantidade anual de asfalto importado pela Petrobras nos últimos cinco anos.

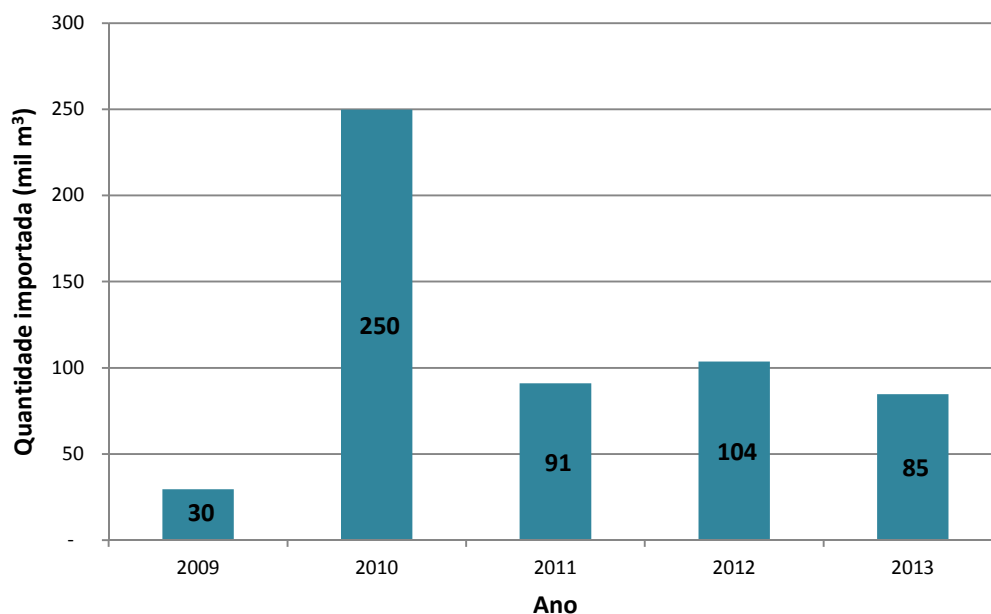


Figura 8 – Importação anual de asfaltos, de 2009 a 2013. Fonte: ANP, 2014b

Segundo ANP (2014b), a importação de 2010 correspondeu a cerca de 9% da demanda nacional no período. Tais importações aconteceram, sobretudo, para atender a investimentos rodoviários no Nordeste do país. Ainda segundo ANP (2014b), as importações realizadas em 2013 apresentaram um dispêndio de cerca de US\$ 50 milhões, descontando o custo frete.

Inovando na logística de asfaltos, a Petrobras iniciou a transferência marítima de ligante asfáltico em navegação de cabotagem, no final de 2011, do porto do Rio de Janeiro para os portos de Salvador e Fortaleza (IBP, 2011), e mais recentemente da refinaria de Manaus para o porto de Fortaleza. Essa ação reduziu a necessidade de importação, promovendo uma otimização da atual rede de distribuição de asfaltos.

Dada a importância da cadeia produtiva do asfalto e a necessidade de garantir o atendimento ao mercado da pavimentação asfáltica, outras ações poderão ser identificadas na busca da garantia do atendimento do mercado de asfaltos através da produção nacional. Para isso, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos que auxiliem a otimização da rede logística como um todo, a fim de se criar uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, além da possibilidade de identificação de novos pontos de melhoria no atendimento ao mercado. Tais ações contribuem para redução dos custos logísticos envolvidos nas operações de distribuição de asfaltos e é objeto de estudo deste trabalho.

3.5. Considerações adicionais

Para que o asfalto possa ser entregue pelas refinarias, a temperatura do produto não pode ser inferior a 140°C durante o carregamento, segundo Resolução ANP nº 19 (ANP, 2005). Portanto, quanto maior o tempo de armazenagem do produto, maior será o custo com a manutenção da temperatura do produto. Diante do elevado custo de tancagem do asfalto, o produto não é armazenado em volumes significativos pelos distribuidores, que recorrem aos estoques das refinarias para atender aos pedidos, já que 70% do produto é entregue ao consumidor da mesma forma como foi entregue pelo produtor.

A baixa previsibilidade da demanda influencia o baixo nível de armazenagem do produto fora das refinarias, dados os custos envolvidos para os níveis atuais de incerteza. No mercado de asfalto, os principais fatores que contribuem para aumentar o erro na previsão dos pedidos são: a) efeitos climáticos inesperados, relacionados às chuvas no local das obras, já que as atividades de pavimentação não ocorrem nos períodos chuvosos, mesmo nos períodos de maior demanda; e b) falta de calendário plurianual dos níveis governamentais, que representam a maior parcela do mercado consumidor de asfalto.

Diante da possibilidade de armazenagem no produtor, da baixa previsibilidade da demanda e do custo financeiro do estoque, incompatível com as margens de lucratividade, o distribuidor fica limitado a não adotar, de forma espontânea, uma política de estoque de antecipação, em volumes significativos e compatíveis com a demanda prevista para os próximos anos. Isso dificulta a manutenção de estoques na cadeia de suprimentos de asfaltos, em especial nos elos subsequentes ao elo produtor, e níveis mais elevados de consumo vão expor essas fraquezas. Mantida a relação atual de oferta e demanda do produto e suas políticas comerciais e fiscais, não se deve esperar por mudanças significativas dos níveis de estoque do produto junto ao distribuidor.

4

Modelo matemático para otimização da distribuição de asfaltos no Brasil

Uma vez situado o problema a ser tratado dentro do contexto da distribuição de asfaltos no Brasil, serão apresentados, neste capítulo, o objetivo, a descrição, a formulação matemática e as limitações do modelo de programação matemática desenvolvido.

4.1.

Objetivo do modelo

A tomada de decisão acerca da otimização na distribuição de asfaltos aborda os aspectos estratégico e tático, considerando as limitações nos equipamentos atualmente disponíveis nas refinarias, tais como torres de destilação, bombas e tubulações. Por isso, dada uma rede logística de distribuição formada pelos elementos descritos na Seção 3.3 e um horizonte de tempo aderente ao de planejamento logístico, o modelo de programação linear inteira mista deve:

- Apoiar a tomada das decisões táticas de:
 - alocação dos fluxos das refinarias produtoras para os polos de venda, de forma a garantir o atendimento da demanda;
 - indicação da quantidade de asfaltos a ser produzida por cada refinaria;
 - estabelecimento dos níveis de estoque em cada refinaria;
- Apoiar a tomada de decisões estratégicas ligadas à distribuição de asfaltos, através da avaliação da necessidade de:
 - implantar um novo polo de venda, a ser abastecido pelo modal marítimo, visando o atendimento da demanda em um horizonte de planejamento de 12 meses;
 - estabelecer, diante da previsão de vendas, o percentual da demanda que será atendido pelo novo polo.

- definir, dentre um conjunto de polos candidatos, qual a melhor localização desse novo polo;

Estas decisões são guiadas pela minimização do somatório dos seguintes custos:

- Custo de produção, considerando o custo de oportunidade em se produzir asfaltos, em detrimento da produção de outros derivados, de menor valor agregado;
- Custo de estoque, considerando o valor presente líquido do produto que não foi vendido no mês anterior;
- Custo de transporte, considerando a necessidade de transportar produto para atendimento do mercado em um polo de venda cuja refinaria produtora não dispõe de capacidade de produção suficiente para atender a demanda local.

No entanto, as decisões estratégicas e táticas estão sujeitas a restrições de capacidade de produção, de entrega, de armazenamento e de balanço material, conforme será explicitado na seção a seguir.

4.2.

Descrição do modelo

A descrição do modelo inicia pela apresentação das premissas consideradas, seguida da exposição dos parâmetros, restrições e variáveis adotados.

4.2.1.

Premissas

De forma a simplificar o processo de modelagem e sua adequação à realidade operacional, foram adotadas as seguintes premissas na construção do modelo:

- A matéria-prima asfalto foi tratada como um único produto, sem distinção entre as diferentes classificações de produtos asfálticos definidos pela ANP;

- O transporte do produto das refinarias para os polos de venda, quando indicado, é feito basicamente pelo modal rodoviário, através do uso de caminhões. No estudo de caso, considerando a implantação de um novo polo, este será abastecido através do modal marítimo, com o uso de navios.
- Havendo indicação de fluxo através do modal marítimo, o modelo apenas indica a quantidade a ser transportada, sem considerar a maximização do uso da capacidade de transporte do navio.
- O modelo considera que a frota de caminhões atualmente disponíveis para o transporte de asfaltos é suficiente para atender os fluxos indicados na transferência do produto, de forma a garantir o abastecimento do mercado;
- O elenco de petróleo alocado para as refinarias não restringe a produção indicada pelo modelo, que considera fundamentalmente o atendimento ao mercado.
- Para o horizonte considerado, não há alteração nas capacidades de armazenamento, produção e entrega.
- O custo de produção representa o custo de oportunidade em se produzir asfaltos, em detrimento da produção de outros derivados, de menor valor agregado.
- O custo de estoque considerado refere-se ao valor presente líquido do produto que não foi vendido no mês anterior, para uma taxa interna de retorno de 12%.
- O custo total de armazenamento, produção e transporte é avaliado no horizonte de um ano.
- Por se tratar de um modelo determinístico, as incertezas em relação à demanda do produto não são levadas em consideração.
- O horizonte de planejamento contempla um período de 12 meses, discretizado mensalmente.

4.2.2. Índices, parâmetros e variáveis

A notação utilizada para a elaboração do modelo, que envolve definições de índices, parâmetros e variáveis, é descrita nesta seção. A consulta a esta notação é indispensável para o entendimento da formulação matemática proposta neste trabalho. De forma a facilitar o entendimento do leitor, os parâmetros foram simbolizados iniciando por letras maiúsculas, enquanto as

variáveis foram identificadas por letras minúsculas. Os índices, quando necessário seu uso, foram inseridos de forma sobrescrita, ao lado do símbolo de parâmetro (ou de variável) ao qual está indexado.

Índices

O modelo representa diferentes **refinarias** (r) que produzem asfaltos e disponibilizam estes produtos para serem comercializados nos **polos de venda** (p), durante um determinado **período** (t). Assim, para reduzir os nomes e facilitar a identificação dos parâmetros, será utilizada a seguinte simbologia para representar os índices do modelo:

- r = refinaria
- p = polo de venda
- t = período (mês)

Parâmetros

Os parâmetros funcionam como entrada de dados e normalmente são indexados. A seguir são descritos os parâmetros utilizados no modelo proposto:

- **CapProd _{r}** = capacidade de produção de asfaltos, pela refinaria r , por período t ($\text{m}^3/\text{mês}$)
- **CapEst _{r}** = capacidade de estocagem de asfaltos, na refinaria r (m^3)
- **CapEnt _{r}** = capacidade de entrega de asfaltos, a partir da refinaria r , por período t ($\text{m}^3/\text{mês}$)
- **EstIni _{r}** = estoque de asfaltos na refinaria r , no período $t=1$ (m^3)
- **EstMin _{r}** = estoque mínimo de asfaltos aceitável, para a refinaria r (m^3)
- **Dem _{p,t}** = demanda de asfaltos no polo de venda p , no período t (m^3)
- **CusProd _{r}** = custo unitário de produção de asfaltos, na refinaria r ($\$/\text{m}^3$)
- **CusEst _{r}** = custo unitário de estocagem de asfaltos, na refinaria r ($\$/\text{m}^3$)
- **CusTrans _{r,p}** = custo unitário de transporte de asfaltos, a partir da refinaria r para o polo de venda p ($\$/\text{m}^3$)
- **Arc _{r,p}** = fluxo de entrega de asfaltos, a partir da refinaria r para o polo de venda p (assume valor 1 caso o fluxo seja permitido, e 0 caso contrário)

Variáveis

São as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo, conforme descritas abaixo:

- $prod_{r,t}$ = produção de asfaltos pela refinaria r , no período t (m^3)
- $est_{r,t}$ = estoque de asfaltos na refinaria r , no final do período t (m^3)
- $ent_{r,p,t}$ = entrega de asfaltos, a partir da refinaria r para o polo de venda p , no período t , tal que a entrega neste arco, Arc_{rp} , esteja permitida (m^3)

4.2.3.

Função objetivo e restrições

Função objetivo

A função objetivo é uma função matemática que define a qualidade da solução em função das variáveis. No modelo proposto, foi definida de forma a se obter o menor custo total na oferta de asfaltos para atendimento ao mercado, sendo considerados os custos de produção e de armazenamento em cada refinaria e o custo de transporte entre as refinarias e os polos de venda, conforme exposto na Seção 4.1.

Em linhas gerais, a função objetivo pode ser representada conforme a equação (4.1).

Minimizar Custo Total

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{r,t} \text{Custo de Produção} \\
 &+ \sum_{r,t} \text{Custo de Estoque} \\
 &+ \sum_{r,p,t} \text{Custo de Transporte}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Restrições

As regras e lógica de funcionamento de um modelo são definidas através das restrições, de modo a levar em conta as limitações físicas do sistema, restringindo as variáveis a seus valores possíveis (ou viáveis), segundo os parâmetros estabelecidos. A seguir são descritas as restrições do modelo proposto.

A equação (4.2) representa a restrição responsável por garantir o balanço material de asfaltos na refinaria r , no período $t=1$; ou seja, garante que, para a refinaria r , o estoque inicial, $EstIni_r$, somado à produção no período $t=1$ seja igual ao somatório das entregas para o polo de venda p somado ao estoque no final do período $t=1$. Já a equação (4.3) representa essa mesma restrição de balanço

material, porém para os períodos onde $t > 1$, o parâmetro $EstIni_r$ é substituído pela variável de estoque no final do período anterior, $est_{r,t-1}$.

$$EstIni_r + prod_{r,t} = est_{r,t} + \sum_p ent_{r,p,t} \quad \forall r, t | t = 1 \quad (4.2)$$

$$est_{r,t-1} + prod_{r,t} = est_{r,t} + \sum_p ent_{r,p,t} \quad \forall r, t | t > 1 \quad (4.3)$$

A equação (4.4) é responsável por garantir que a produção na refinaria r no período t seja limitada ao parâmetro de capacidade de produção mensal de asfaltos pela refinaria r , $CapProd_r$.

$$prod_{r,t} \leq CapProd_r \quad \forall r, t \quad (4.4)$$

A equação (4.5) é responsável por garantir que o estoque da refinaria r no final do período t seja limitada ao parâmetro de capacidade de estocagem de asfaltos pela refinaria r , $CapEst_r$.

$$est_{r,t} \leq CapEst_r \quad \forall r, t \quad (4.5)$$

A equação (4.6) é responsável por garantir que o estoque da refinaria r no final do período t seja igual ou superior ao parâmetro de estoque mínimo de asfaltos aceitável, para a refinaria r , $EstMin_r$.

$$est_{r,t} \geq EstMin_r \quad \forall r, t \quad (4.6)$$

A equação (4.7) é responsável por garantir que o somatório das entregas a partir da refinaria r no período t seja limitada ao parâmetro de capacidade de entrega mensal de asfaltos pela refinaria r , $CapEnt_r$.

$$\sum_p ent_{r,p,t} \leq CapEnt_r \quad \forall r, t \quad (4.7)$$

A equação (4.8) é responsável por garantir o atendimento da demanda no polo de venda p , no período t , ou seja, garante que o somatório das entregas no polo de venda p , no período t (tal que o fluxo de entrega para este arco, $Arc_{r,p}$,

esteja permitido), seja igual ou superior ao parâmetro demanda de asfaltos no polo de venda p , no período t , $Dem_{p,t}$.

$$\sum_r ent_{r,p,t} \geq Dem_{p,t} \quad \forall p, t | Arc_{r,p} = 1 \quad (4.8)$$

4.3.

Modelo matemático completo e sua implementação

O modelo matemático completo proposto para otimização da distribuição de asfaltos no Brasil é apresentado da seguinte forma:

Minimizar custot

$$\begin{aligned} &= \sum_{r,t} (CusProd_r \times prod_{r,t}) \\ &+ \sum_{r,t} (CusEst_r \times est_{r,t}) \\ &+ \sum_{r,p,t} (CusTrans_{r,p} \times ent_{r,p,t}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Sujeito a:

$$EstIni_r + prod_{r,t} = est_{r,t} + \sum_p ent_{r,p,t} \quad \forall r, t | t = 1 \quad (4.2)$$

$$est_{r,t-1} + prod_{r,t} = est_{r,t} + \sum_p ent_{r,p,t} \quad \forall r, t | t > 1 \quad (4.3)$$

$$prod_{r,t} \leq CapProd_r \quad \forall r, t \quad (4.4)$$

$$est_{r,t} \leq CapEst_r \quad \forall r, t \quad (4.5)$$

$$est_{r,t} \geq EstMin_r \quad \forall r, t \quad (4.6)$$

$$\sum_p ent_{r,p,t} \leq CapEnt_r \quad \forall r, t \quad (4.7)$$

$$\sum_r ent_{r,p,t} \geq Dem_{p,t} \quad \forall p, t | Arc_{r,p} = 1 \quad (4.8)$$

$$prod_{r,t} \geq 0 \quad \forall r, t \quad (4.10)$$

$$est_{r,t} \geq 0 \quad \forall r, t \quad (4.11)$$

$$ent_{r,p,t} \geq 0 \quad \forall r, p, t \quad (4.12)$$

O modelo elaborado neste trabalho foi implementado no *software* comercial AIMMS (*Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*), versão 3.13, da Paragon Decision Technology. Tal *software* possui uma linguagem de modelagem algébrica (LMA) que oferece um ambiente de desenvolvimento de apoio analítico à decisão, no qual é possível criar aplicações funcionais, prontas para serem usadas por pessoas leigas em modelagem ou usuários finais. As principais razões para a escolha do *software* AIMMS foram a facilidade de modelagem e a interface amigável com o usuário, além da disponibilidade junto à Petrobras.

O programa de otimização escolhido foi o CPLEX 12.6, da ILOG Applications, o qual permite que modelos de programação linear e inteira de grande porte (da ordem de centenas de milhares de variáveis e restrições) sejam resolvidos em microcomputadores em um tempo computacional bastante reduzido.

5

Estudo de caso: aplicação do modelo matemático na localização de um novo polo de venda de asfaltos

O modelo matemático proposto no Capítulo 4 será aplicado na localização de um novo polo de venda de asfaltos, como forma de otimizar a distribuição dessa matéria-prima no Brasil, dado o aumento da sua demanda e a estagnação da produção.

5.1.

Delimitações consideradas para o novo polo de venda

Conforme exposto na Seção 3.4.4, houve um crescimento acentuado da demanda de asfaltos no Brasil nos últimos anos. Porém, esse crescimento não foi acompanhado da produção, conforme mostra a Figura 9, que apresenta a variação percentual, tanto de produção quanto de venda no Brasil, para os últimos quatro anos, em relação ao ano de 2009.

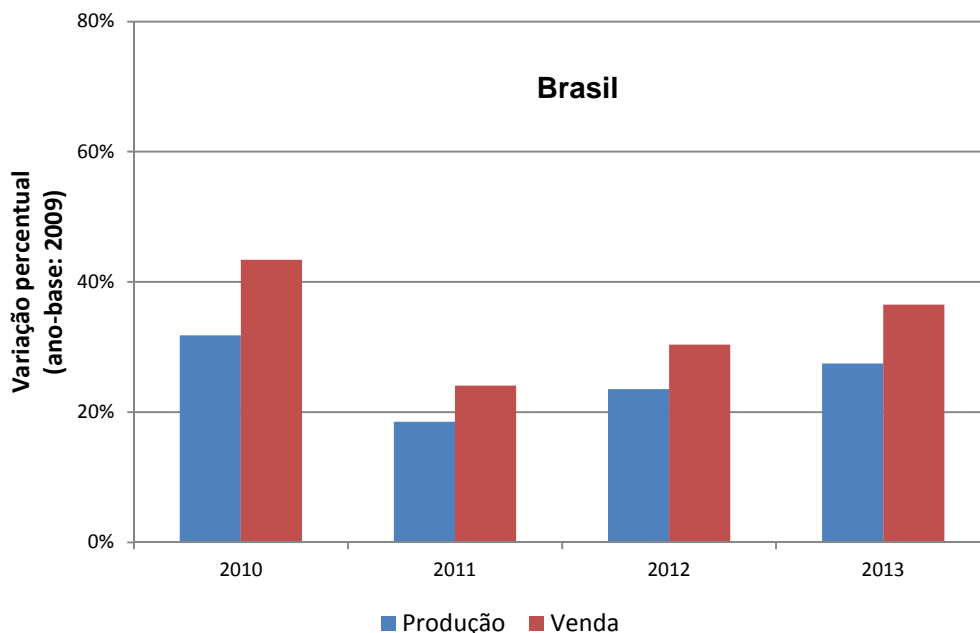


Figura 9 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos no Brasil, de 2010 a 2013, em relação a 2009

As limitações na capacidade de produção das refinarias foram a principal causa dessa discrepância, e houve necessidade de importação do produto para complementar a produção e garantir o abastecimento do mercado de asfaltos, em especial na região Nordeste (MDIC, 2013). Segundo FIESP (2009), a falta de fontes alternativas de fornecimento de asfalto, além das refinarias que pertencem à Petrobras, por vezes é apontada como um gargalo por alguns agentes da cadeia do segmento de asfaltos, já que tais produtos têm diversas características que dificultam seu transporte e armazenamento. A realização de importação só é possível com a existência de infraestrutura adequada para seu recebimento, armazenamento e transporte. Outro problema é a inexistência de harmonização de especificações técnicas dos tipos de asfalto entre países possíveis de serem fornecedores a preços competitivos. Tal soma de limitações quanto às possibilidades de importação em curto prazo, conduz à manutenção do status da Petrobras como principal fornecedor de asfaltos no país, restringindo as alternativas de compra.

Observa-se ainda que o crescimento da demanda apresenta diferentes perfis de variação para cada polo de venda, acarretando diferentes perfis de variação na produção pelas refinarias. Como forma de avaliar tais perfis, os polos de venda foram agrupados de acordo com a região geográfica de localização e com o perfil de variação apresentado nos últimos 4 anos, em relação ao ano de 2009, conforme descritos abaixo:

- Região Norte/Nordeste – contempla três conjuntos de refinaria e polo de venda, sendo um conjunto em cada um dos seguintes estados: Amazonas, Ceará e Bahia;
- Região Sul/Sudeste – contempla seis conjuntos de refinaria e polo de venda, sendo um conjunto em cada um dos seguintes estados: Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná e Rio Grande do Sul, além de dois conjuntos em São Paulo.

Com esse agrupamento, todos os conjuntos de refinaria e polo de venda de asfaltos do Brasil estão sendo considerados. A região Centro-Oeste está sendo analisada de forma indireta, já que, por não possuir conjunto de refinaria e polo de venda, é abastecida através dos distribuidores, com produção e venda a partir das refinarias e polos de venda da região Sudeste, principalmente.

As Figuras 10 e 11 apresentam a variação percentual de produção e de venda para os conjuntos da Região Norte/Nordeste e da Região Sul/Sudeste, respectivamente.

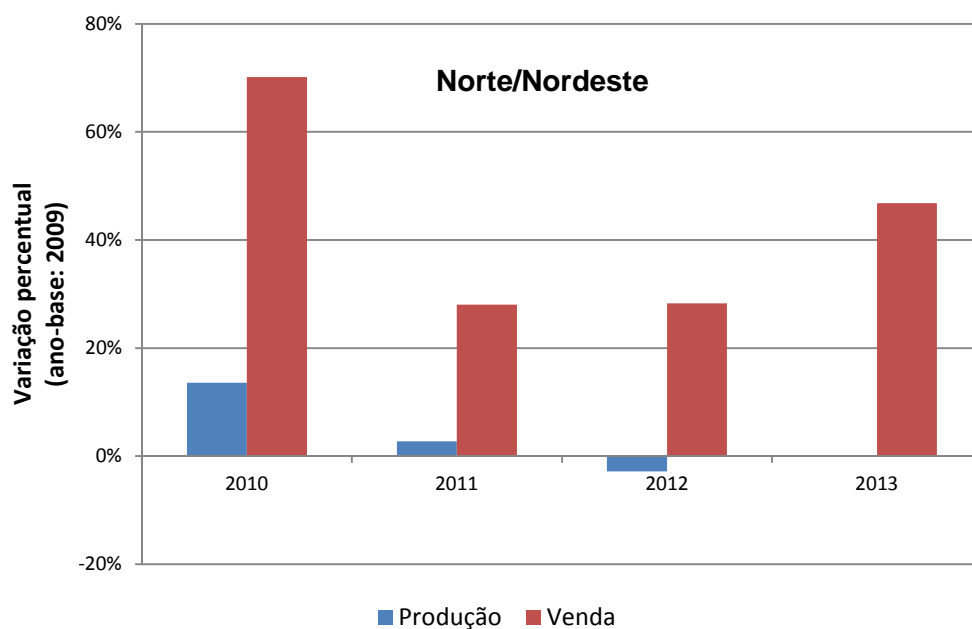


Figura 10 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos na região Norte/Nordeste, de 2010 a 2013, em relação a 2009

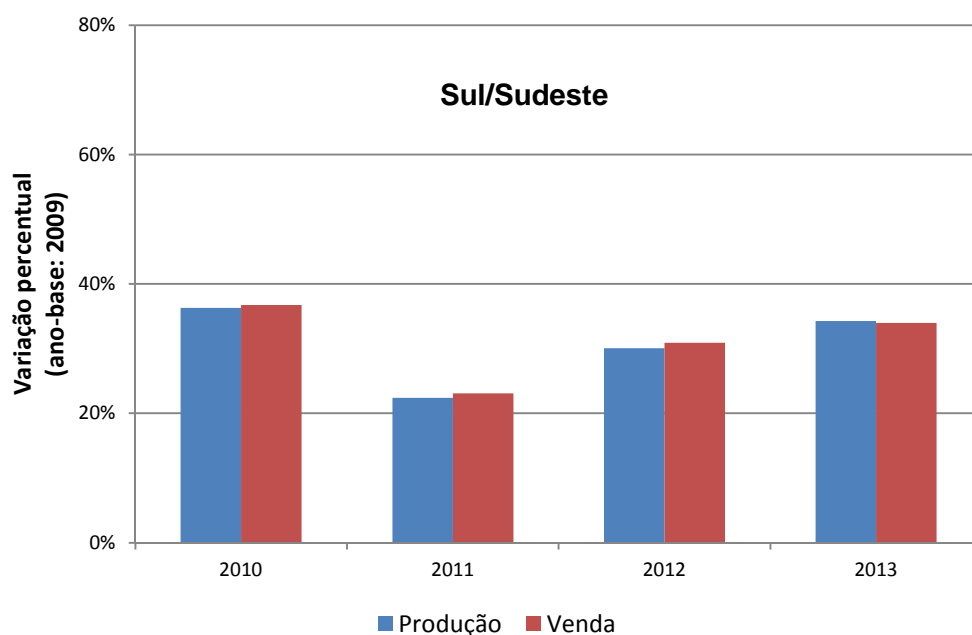


Figura 11 – Variação percentual da produção e da venda de asfaltos na região Sul/Sudeste, de 2010 a 2013, em relação a 2009

Através dessa análise gráfica, observa-se que a variação percentual da demanda em todos os 4 anos analisados foi maior para os polos de venda localizados na região Norte/Nordeste. Em contrapartida, a capacidade de produção nessa região não apresentou avanços significativos, levando a diferenças consideráveis entre as variações percentuais da produção e da venda. Isso explica as importações realizadas para atender essa região, no período considerado.

Já para os conjuntos da região Sul/Sudeste, de forma geral, o crescimento da demanda foi acompanhado pelo crescimento da produção, mostrando que, para a demanda apresentada no período, não há limitação da capacidade de produção.

5.1.1.

Localização geográfica

Considerando essa análise, conclui-se que há necessidade de expansão da oferta de produto na região Norte/Nordeste e, por esse motivo, o estudo da localização do novo polo de venda de asfaltos, a ser apontado pelo modelo matemático proposto, será limitado a essa região.

Adicionalmente, os dados da Pesquisa CNT de Rodovias 2013 reforçam a necessidade de melhoria no pavimento da malha rodoviária da região Norte/Nordeste. O custo de transporte de carga por rodovias no Brasil é, em média, 28% mais caro do que seria caso as estradas apresentassem condições ideais de pavimento. Neste ranking, a região mais prejudicada é a Norte, com aumento de 46,6% nos custos, seguida pela região Nordeste (33,1%), enquanto a menos afetada é a região Sul, que alcança o patamar de 19,3% de aumento nos custos de transporte de carga pelo modal rodoviário (CNT, 2013).

5.1.2.

Modal de transporte

Atualmente, a oferta de asfaltos na região Norte/Nordeste tem sido complementada através de cabotagens a partir de refinaria costeira da região Sudeste e, mais recentemente, após adaptações nas instalações, através de refinaria da região Norte. Como a cabotagem tem se mostrado uma boa opção de transporte de asfaltos, essa modalidade de transporte marítimo será considerada como forma de aumentar a oferta de produto na região Norte/Nordeste.

5.1.3.

Origem do produto

Como ponto de origem para atendimento desse novo polo de venda, serão consideradas as refinarias com excedente de produção de asfaltos e que possuem facilidade em carregar o produto em navios, de forma que seja possível o uso do modal marítimo.

Apenas duas refinarias atendem esse critério, sendo uma localizada na região Norte/Nordeste e outra na região Sul/Sudeste, aqui denominadas *Refinaria A* e *Refinaria B*, respectivamente.

5.1.4.

Destino do produto

Apesar de haver descarga do produto a partir de cabotagens e/ou importações em duas cidades na região Nordeste, há necessidade de se buscar outros portos marítimos e/ou fluviais, como forma de se evitar gargalos, uma vez que os portos atualmente utilizados são demandados também por outros tipos de cargas, gerando demora no processo de atracação nos píeres e no início do carregamento.

Por se tratar de modal de transporte marítimo, as opções de destino do produto serão cidades que apresentam porto com viabilidade técnica para atracação de navios do porte de navios asfálticos e que ofereçam condições de realizar as manobras necessárias para a operação, como o trânsito de caminhões para os quais o produto será transferido, ao ser descarregado do navio. Para o estudo de caso, foram selecionados três portos que atendem a esses critérios, aqui denominados *Porto 1*, *Porto 2* e *Porto 3*.

5.1.5.

Demanda a ser atendida

Para efeitos comparativos, a demanda total aqui considerada será a do ano de 2013. Porém, o novo polo será responsável pelo atendimento de uma parcela desse mercado, cujo valor percentual será uma variável objeto de estudo deste trabalho.

Conforme exposto no item anterior, a busca por portos alternativos faz-se necessária como forma de eliminar os gargalos existentes nos portos cujas cidades tem seus mercados atendidos via cabotagens ou eventuais importações.

Dessa forma, para minimizar o fluxo de entregas por navios nos portos atualmente utilizados pela rede de distribuição de asfaltos, considera-se que uma parcela da demanda atual da região Norte/Nordeste será transferida para atendimento pelo novo polo, podendo variar de 0 a 100% da atual demanda de um dos polos localizados na região.

Para uma análise detalhada e de forma a estudar o perfil de produção, entrega e estoque que minimize os custos operacionais da distribuição de asfaltos, criou-se diferentes cenários, variando a cada 10% a parcela de demanda a ser transferida para o novo polo. Na prática, o contrato de venda prevê que os clientes sejam informados, mensalmente, sobre a quantidade máxima de produto disponível para retirada em cada polo de venda. Assim, é possível variar a quantidade ofertada no novo polo, de acordo com a indicação do modelo.

5.2.

Análise dos resultados

A análise do estudo de caso se inicia com a comparação entre os resultados financeiros obtidos na configuração atual e no cenário base, a partir dos dados de demanda do ano de 2013, para cada parcela de custo, utilizando o modelo proposto como ferramenta de otimização.

A **configuração atual** refere-se à forma como a demanda do ano de 2013 foi atendida, ou seja, utiliza os dados de produção, estoque e transporte realizados no ano considerado, sem a aplicação do modelo proposto. Já o **cenário base** considera os mesmos dados de demanda, porém utiliza os dados de produção, estoque e entrega indicados na otimização com o uso do modelo, ainda sem a existência do novo polo.

A Figura 12 apresenta, de forma esquemática, os fluxos entre as refinarias produtoras e o polo de venda, considerados para a configuração atual, e que são similares ao cenário base. Já a Tabela 3 apresenta os resultados financeiros obtidos para cada parcela de custo, em cada um dos cenários avaliados.

O cenário base foi implementado no *software* comercial AIMMS, versão 3.13, e apresentou 529 variáveis contínuas e 649 restrições, com tempo de execução de 0,10 segundo, utilizando o programa de otimização CPLEX, versão 12.6.

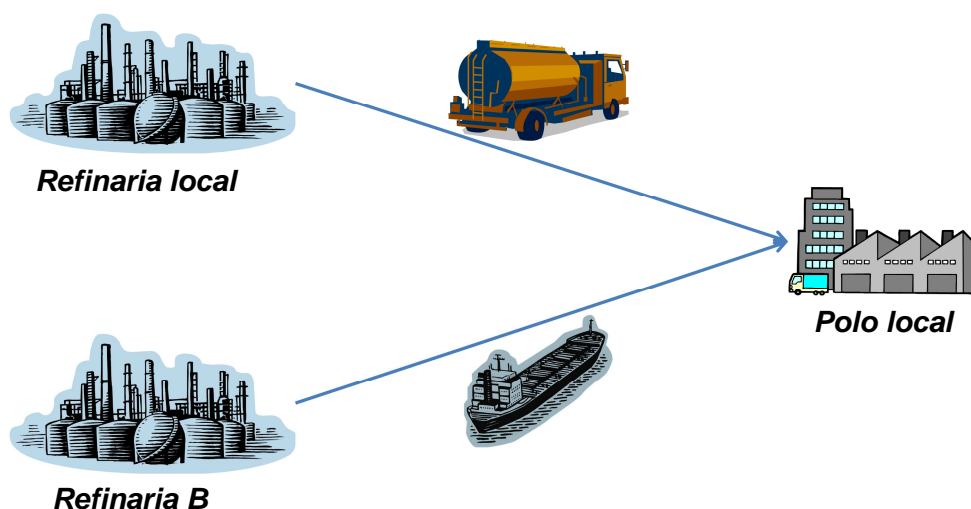


Figura 12 – Fluxos de entrega para atendimento ao mercado na configuração atual

Cenário	Custos Anuais (milhões \$)			
	Produção	Estoque	Transporte	Total
1) Cenário base	1.464,242	71,775	112,432	1.648,449
2) Configuração atual	1.495,792	100,236	142,517	1.738,545
$\Delta\%$ (2 em relação a 1)	2,11%	28,39%	21,11%	5,18%

Tabela 3 – Custos obtidos para a configuração atual e para o cenário base

Observa-se, pela Tabela , que, em relação à configuração atual, a otimização indicada pelo modelo apresentou redução do custo total superior a 5%, equivalendo a uma diferença de \$90 milhões para o período analisado. Todas as três parcelas de custos que compõem o custo total apresentaram redução, em especial as parcelas de estoque e de transporte, que diminuíram em 28,49% e 21,11%, respectivamente. Esses resultados confirmam que é possível propor modificações nos níveis de produção e de estoque e no perfil de entrega, de forma a diminuir o custo total, garantindo o atendimento ao mercado.

Observa-se ainda que a parcela referente ao custo de produção apresenta a maior participação no custo total, correspondendo a cerca de 90%, seguida do custo de transporte (de 4 a 8%) e do custo de armazenamento (cerca de 4%).

5.2.1.

Apoio à tomada de decisão para localização do novo polo

Nesse estudo de caso, cujo objetivo é apoiar a tomada de decisão para definir a localização de um novo polo de venda de asfaltos, deseja-se também

definir a refinaria que irá supri-lo, bem como o percentual da demanda a ser transferida para essa localidade, de forma que se obtenha o menor custo total nas operações logísticas, dentro do conjunto de opções mostradas na Tabela 4, conforme exposto nos itens 5.1.1 a 5.1.5.

Localização do novo polo	Porto 1				Porto 2				Porto 3			
Origem do produto	Refinaria A				Refinaria B				Refinarias A+B			
Demanda transferida (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	

Tabela 4 – Conjunto de opções avaliadas para localização do novo polo

Para definir a origem do produto, foi avaliado o comportamento dos custos considerando os fluxos de entregas a partir da *Refinaria B*, da *Refinaria A* e da entrega simultânea das *Refinarias A+B*, conforme esquema mostrado, respectivamente, nas Figura 13, 14 e 15.

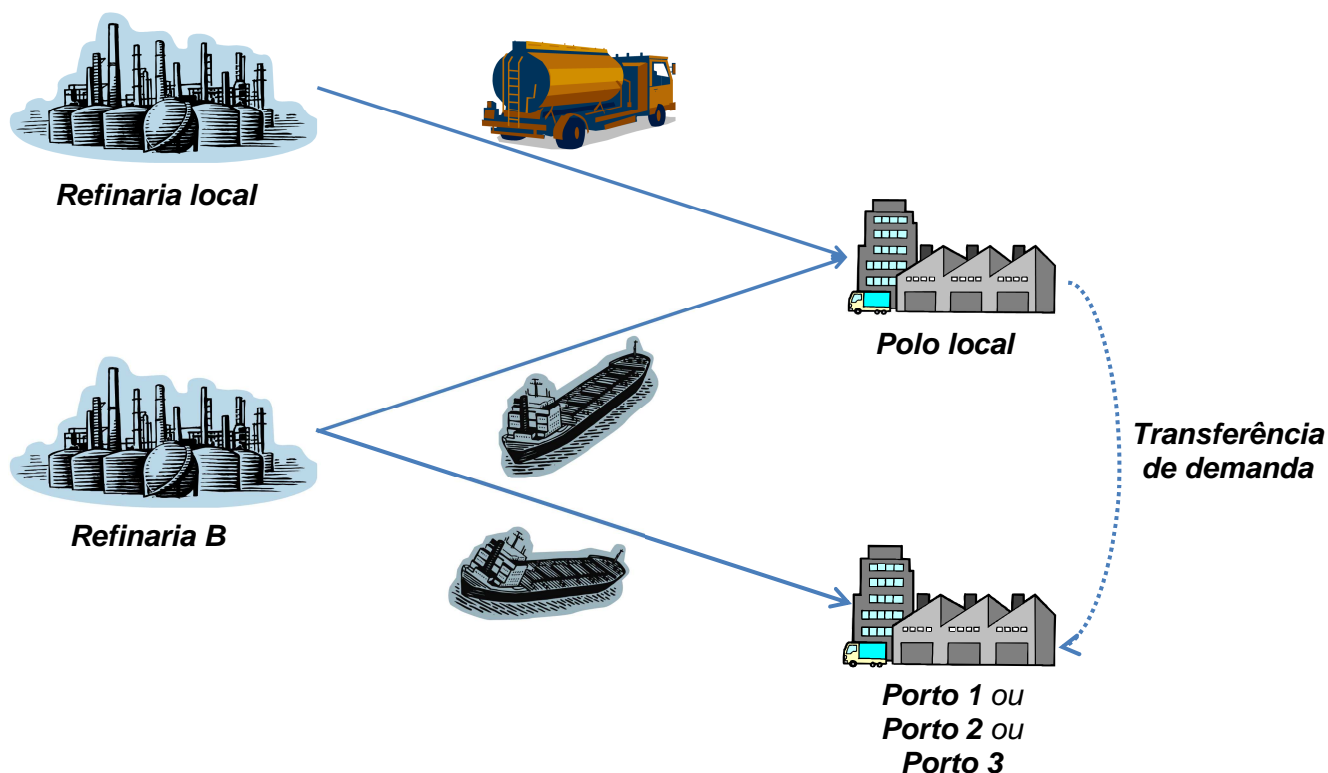


Figura 13 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela *Refinaria B*

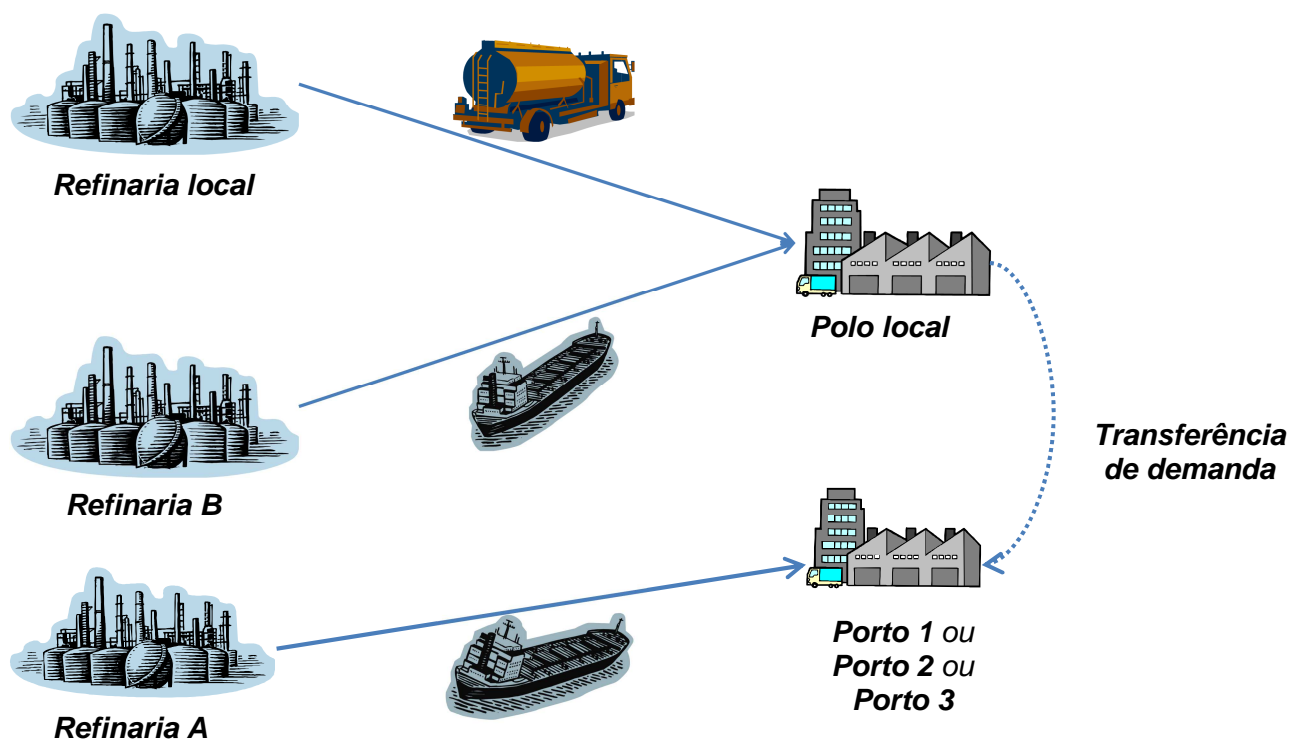


Figura 14 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela Refinaria A

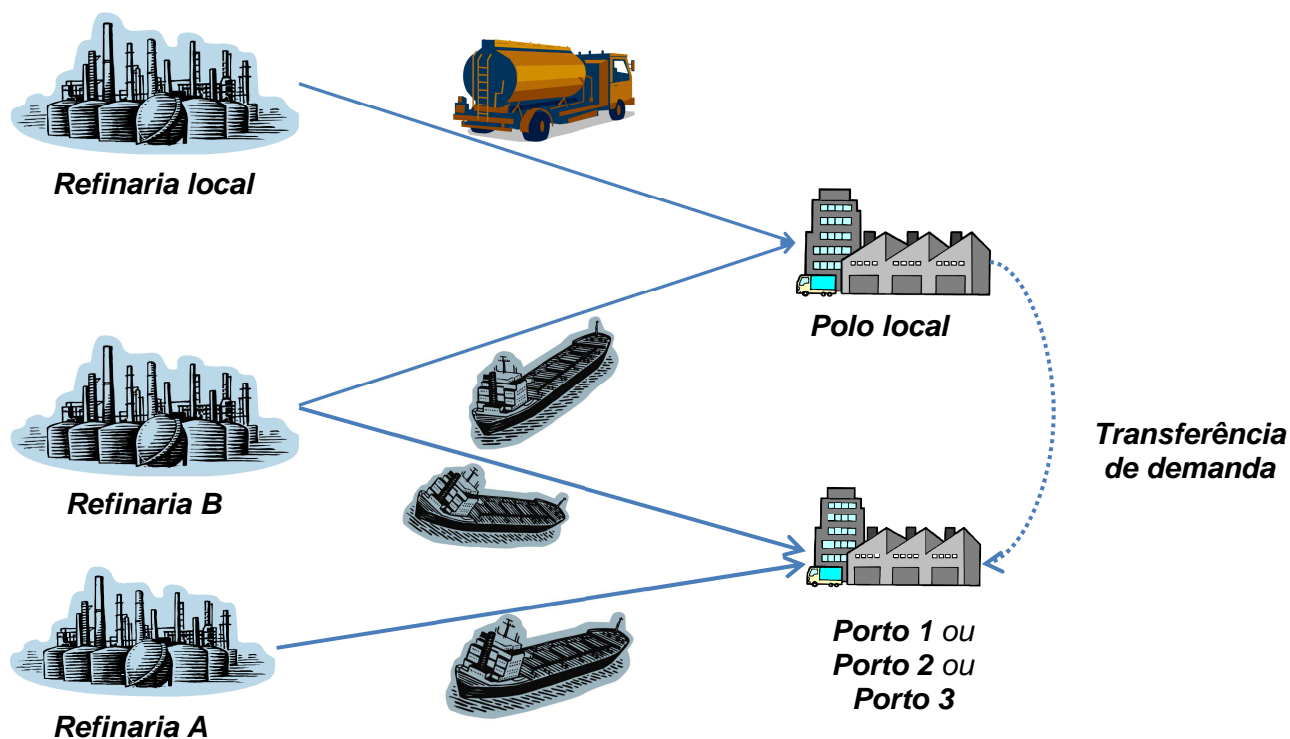


Figura 15 – Fluxos de entrega para atendimento da parcela de demanda transferida para o novo polo de venda, sendo este suprido pela entrega simultânea das Refinarias A+B

5.2.1.1. Análise do custo total

As Figura 16 e Figura 17 apresentam a variação do custo total anual em função da variação do percentual da demanda transferida para o novo polo, considerando a entrega a partir da *Refinaria A* e da *Refinaria B*, respectivamente.

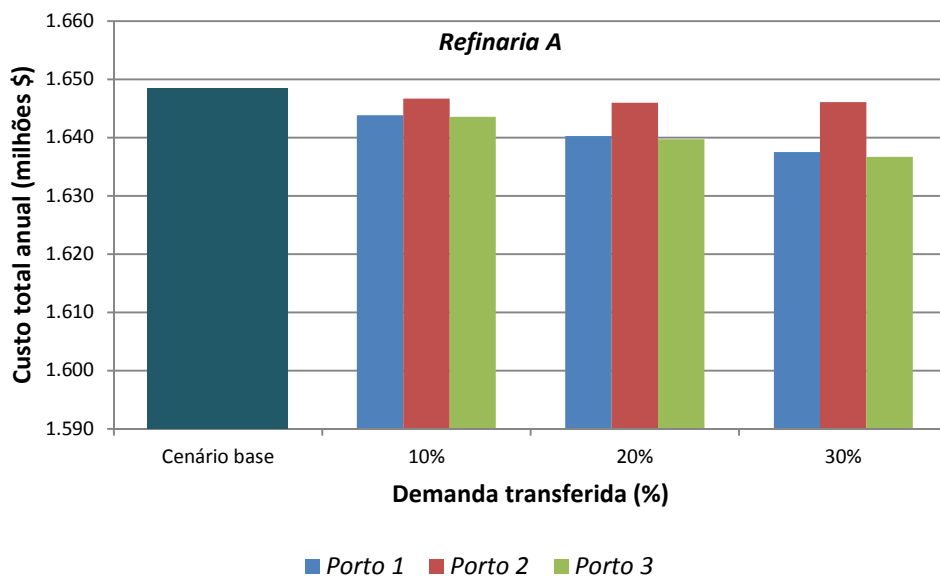


Figura 16 – Variação do custo total anual, para a *Refinaria A*, em função do percentual de demanda transferida

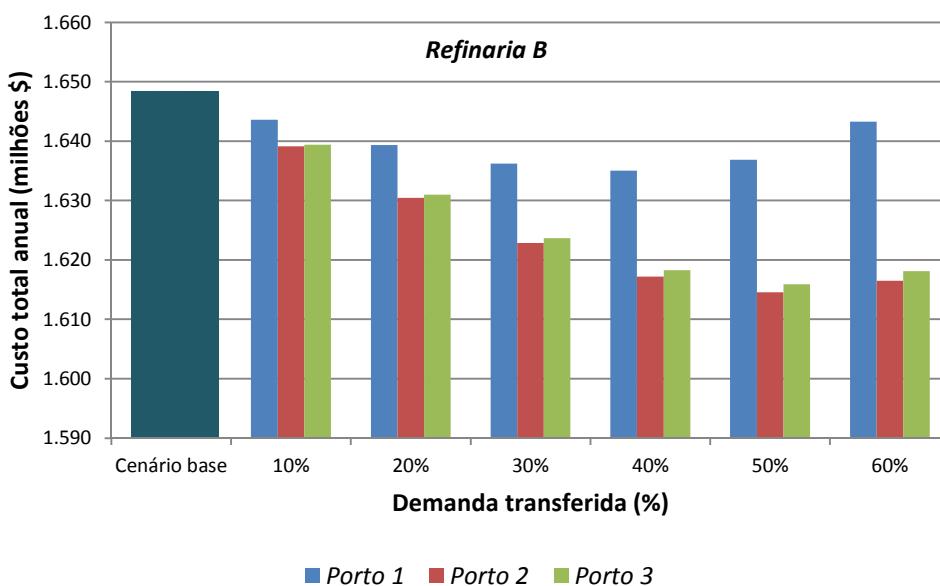


Figura 17 – Variação do custo total anual, para a *Refinaria B*, em função do percentual de demanda transferida

Observa-se que, para qualquer percentual de demanda transferida, há redução do custo total anual em relação ao cenário base, independente da localização do novo polo e da refinaria de origem. O cenário base, como definido anteriormente, corresponde ao atendimento otimizado do mercado, sem a existência do novo polo, ou seja, o percentual de demanda transferida é 0%.

Para a *Refinaria A*, o custo total é minimizado com o aumento do percentual da demanda transferida, e apresenta valores muito próximos tanto para entregas no *Porto 1* quanto no *Porto 3*, enquanto para o *Porto 2* o custo total é maior. Porém, a capacidade de produção isolada da *Refinaria A* não é suficiente para atender demandas transferidas superiores a 30%, sendo essa a configuração de mínimo custo total para esse cenário.

Já para a *Refinaria B*, o custo total foi maior para o *Porto 1*, independente do percentual de demanda transferida. O custo total alcança o valor mínimo quando é considerado a transferência de 50% da demanda, e apresenta valores similares tanto para o *Porto 2* quanto para o *Porto 3*, sendo ligeiramente menor para o primeiro. Porém, a capacidade de entrega isolada da *Refinaria B* é suficiente para atender a, no máximo, 60% da demanda transferida.

De forma a tornar a análise mais completa, abrangendo qualquer percentual de demanda transferida, avaliou-se o comportamento do custo total considerando a entrega simultânea das *Refinarias A+B*. Os resultados são apresentados na Figura 18.

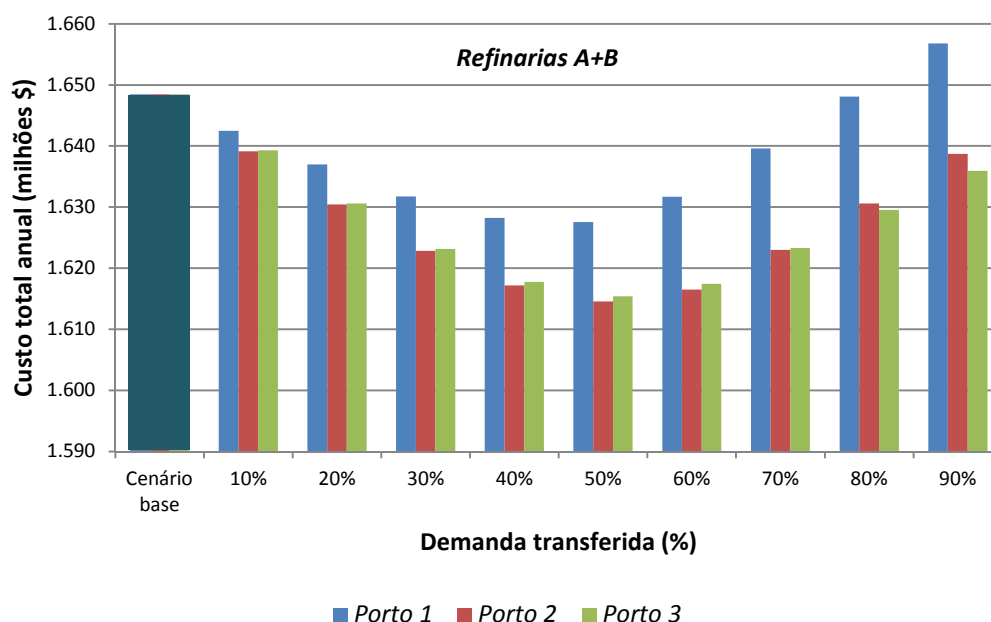


Figura 18 – Variação do custo total anual, para as *Refinarias A+B*, em função do percentual de demanda transferida

Nos primeiros 60% de demanda transferida, o custo total apresenta comportamento semelhante ao da *Refinaria B* isoladamente, para qualquer localização. A partir desse percentual, por conta da limitação na capacidade de entrega, a demanda passa a ser atendida também pela *Refinaria A*, havendo inversão no comportamento do custo para o *Porto 2*. De forma geral, observa-se que há dominância do *Porto 1* em relação às demais opções de localização, para qualquer percentual de demanda transferida.

Observa-se ainda que, mesmo nessa configuração, não é possível atender a demanda total quando a demanda transferida estiver 100% voltada para o novo polo, já que a capacidade de entrega somada das *Refinarias A+B* não é suficiente para tal atendimento, e apenas essas refinarias estão habilitadas a entregar no novo polo. Porém, o custo mínimo é alcançado quando a demanda transferida é de 50%, tal como observado para a *Refinaria B* isoladamente.

A Figura 19 apresenta a contribuição percentual de cada refinaria isoladamente no atendimento aos diferentes percentuais de demanda transferida, para cada novo polo.

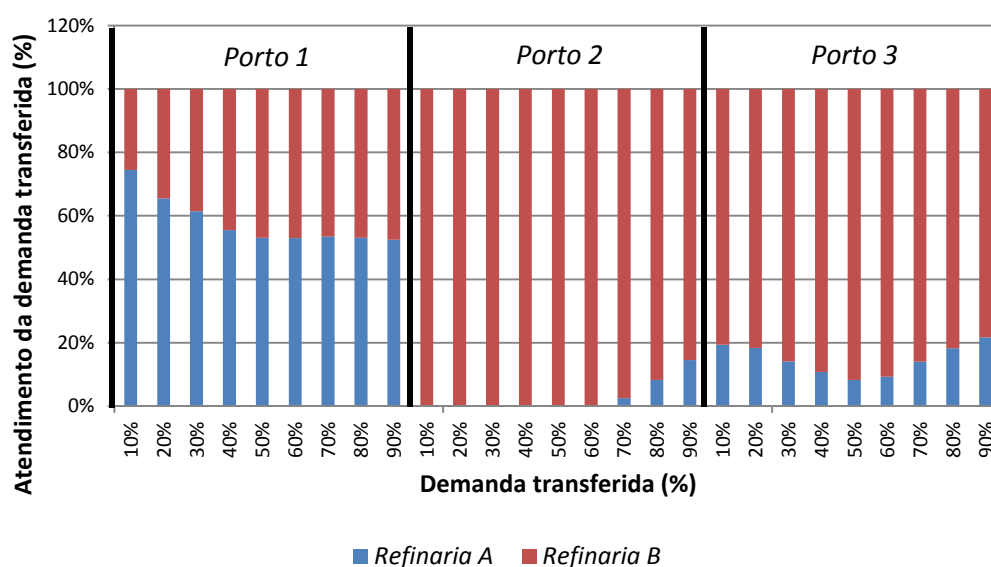


Figura 19 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas *Refinarias A+B*

Observa-se que, para a demanda transferida para o *Porto 1*, há preferência de atendimento pela *Refinaria A*, enquanto a *Refinaria B* atende boa parte da demanda quando o *Porto 3* é selecionado. No primeiro caso, isso

acontece porque o custo de transporte é mais baixo para o arco *Refinaria A* → *Porto 1*, compensando o custo de produção desta refinaria, que é mais alto, enquanto no segundo caso, como os custos de transporte para ambos os arcos são similares, a parcela de custo de produção é o critério de diferenciação na minimização de custos, favorecendo o atendimento pela *Refinaria B*. Já no *Porto 2*, para o qual há o menor custo total em relação às demais opções de localidade, observa-se que há também dominância no atendimento pela *Refinaria B*, por conta do menor custo de transporte para o arco *Refinaria B* → *Porto 2*. O fato de esta refinaria apresentar o menor custo de produção também favorece a minimização do custo total. À medida que a participação da *Refinaria A* no atendimento à demanda transferida aumenta, percebe-se que aumenta também o custo total, havendo inversão no comportamento do perfil em relação ao *Porto 3*.

Sendo assim, o menor custo total obtido corresponde a alternativa de transferência de 50% da demanda para o *Porto 2* para atendimento a partir da *Refinaria B* (ou das *Refinarias A+B*). Esse conjunto de alternativas será chamado de **cenário otimizado**.

A Tabela 5 apresenta a contribuição de cada parcela de custo na redução do custo total para o cenário otimizado, comparado à configuração atual e ao cenário base.

Cenário	Custos Anuais (milhões \$)			
	Produção	Estoque	Transporte	Total
1) Configuração atual	1.495,792	100,236	142,517	1.738,545
2) Cenário base	1.464,242	71,775	112,432	1.648,449
3) Cenário otimizado	1.458,188	71,005	85,337	1.614,530
Δ% (2 em relação a 1)	2,11%	28,39%	21,11%	5,18%
Δ% (3 em relação a 1)	2,51%	29,16%	40,12%	7,13%
Δ% (3 em relação a 2)	0,41%	1,07%	24,10%	2,06%

Tabela 5 – Custos obtidos para o cenário otimizado, e a variação em relação à configuração atual e ao cenário base

A existência do novo polo apresentou redução de cerca de \$34 milhões no custo total anual, comparado ao cenário base, e de \$124 milhões, comparado à configuração atual, conforme mostra os dados para o cenário otimizado. A parcela que mais contribuiu para a redução do custo total é a de custo de

transporte, que diminuiu cerca de 40% em relação à configuração atual, seguida do custo de estoque, que diminuiu quase 30%.

De acordo com o modelo proposto, considerando a existência de um novo polo de venda, a distribuição de asfaltos apresenta mínimo custo total anual para a opção de entrega simultânea das *Refinarias A+B*. Sendo assim, será analisado o efeito de cada parcela de custo, considerando essa origem, para as diferentes opções de localização do novo polo e de percentual da demanda transferida.

5.2.1.2. Análise do custo de produção

A parcela do custo de produção apresenta uma forte contribuição no custo total, equivalendo a cerca de 90% do somatório. A Figura 20 apresenta o comportamento dessa parcela em função do percentual da demanda transferida para as diferentes localizações, a partir da entrega simultânea das *Refinarias A+B*.

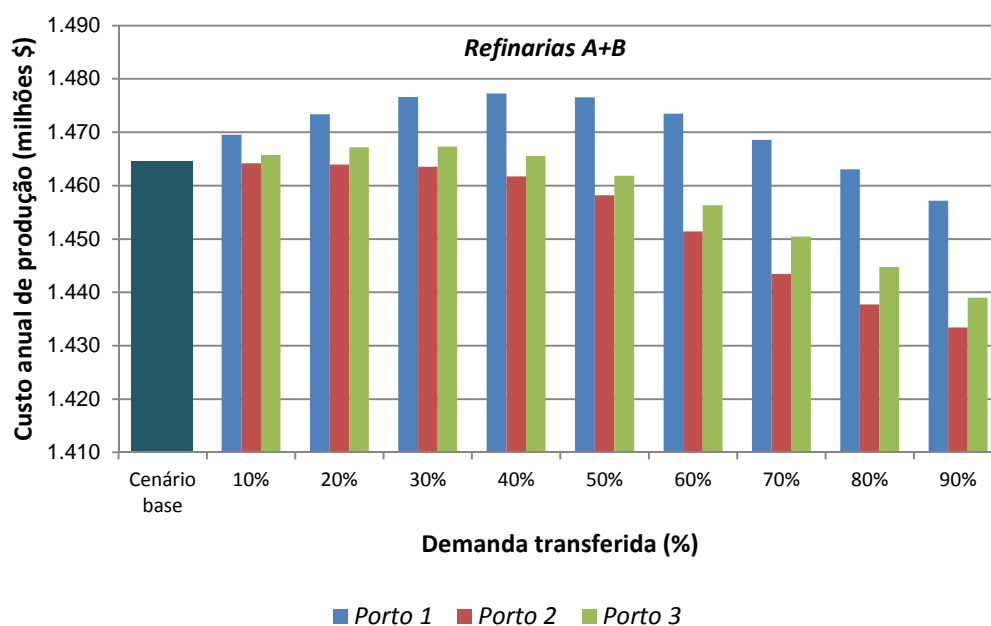


Figura 20 – Variação do custo anual de produção, para as *Refinarias A+B*, em função do percentual de demanda transferida

Com a demanda transferida sendo atendida na localidade *Porto 1*, há necessidade de aumentar a produção da *Refinaria A*, que apresenta custo de produção maior do que a *Refinaria B*. Essa estratégia é utilizada pelo otimizador

a fim de evitar o transporte pelo arco *Refinaria B* → *Porto 1*, cujo custo unitário de transporte é o maior dentre o conjunto de arcos existentes.

5.2.1.3. Análise do custo de transporte

A parcela do custo de estoque apresentou a maior redução percentual para o cenário otimizado, quando comparada à configuração atual (cerca de 40%); essa parcela equivale a 6% do custo total. A Figura 21 apresenta o comportamento do custo de transporte em função do percentual da demanda transferida para as diferentes localizações, a partir da entrega simultânea das *Refinarias A+B*.

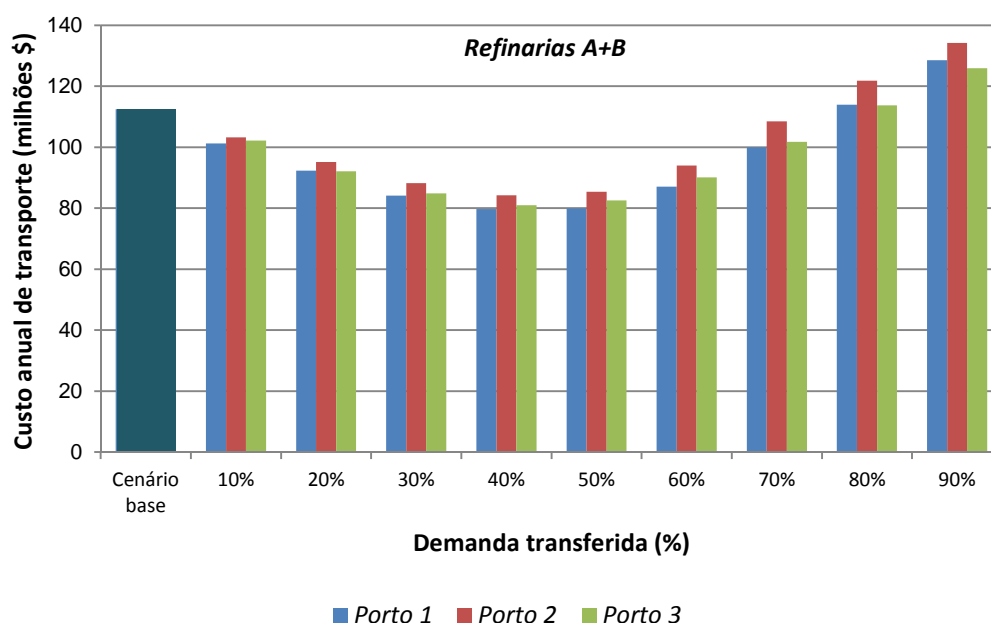


Figura 21 – Variação do custo anual de transporte, a partir das *Refinarias A+B*, em função do percentual de demanda transferida

O custo de transporte apresenta comportamento contrário ao custo de produção, já que diminui nos primeiros 40% de demanda transferida, voltando a aumentar nos percentuais seguintes. Porém, o custo de transporte tem pouca variação em relação à localização do novo polo, sendo praticamente igual para as três opções estudadas.

Avaliando isoladamente o comportamento para o *Porto 2*, que está incluso no conjunto de alternativas do cenário otimizado, observa-se que este apresenta valores ligeiramente maiores, independente do percentual de demanda

transferida. Essa diferença é compensada pelo menor custo de produção das *Refinarias A+B* para atender essa localidade, conforme já discutido para a análise da Figura 20.

5.2.1.4. Análise do custo de estoque

A parcela do custo de estoque apresentou pouca redução percentual para o cenário otimizado, quando comparada ao cenário base (cerca de 1%); equivale a pouco mais de 4% do custo total. A Figura 22 apresenta o comportamento do custo de estoque em função do percentual da demanda transferida para as diferentes localizações, a partir da entrega simultânea das *Refinarias A+B*.

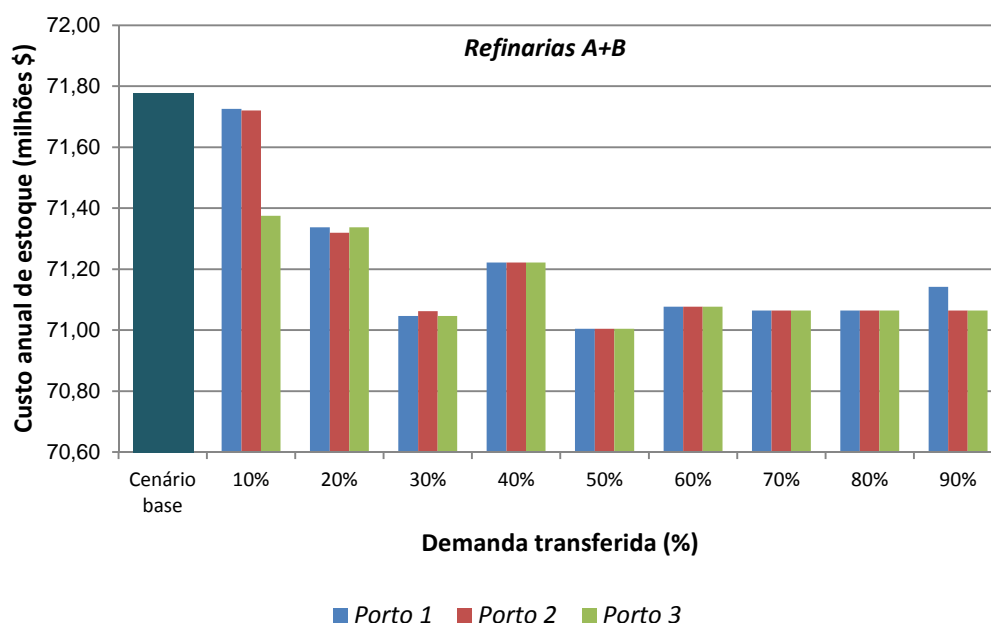


Figura 22 – Variação do custo anual de estoque, a partir das *Refinarias A+B*, em função do percentual de demanda transferida

O custo de transporte é o que apresenta a menor variação para os diferentes percentuais de demanda transferida, apresentando uma variação máxima de 1%, e está diretamente ligado com os níveis de estoque nas refinarias. Para percentuais de transferência de demanda superiores a 30%, os níveis de estoque são ligeiramente menores, já que os aumentos nos custos de produção, apresentados na Figura 20, são acompanhados pela diminuição em outros custos.

5.2.2. Análise de resultados por semestre

Como abordado no Capítulo 5, a demanda anual por asfaltos no Brasil é influenciada pelo período de chuvas, pelo ciclo de contratação dos órgãos governamentais e pelo calendário eleitoral. Historicamente, o período de chuvas reduz a demanda no primeiro semestre, enquanto o período de seca e o ciclo de contratação dos serviços de pavimentação possibilitam que as distribuidoras aumentem as retiradas a partir do segundo semestre. Sendo assim, por existir uma sazonalidade observada anualmente, faz-se necessário que o estudo de caso contemple uma avaliação semestral, como forma de otimizar a distribuição de asfaltos num período mais curto.

5.2.2.1. Resultados do 1º semestre

Como a demanda de asfaltos no 1º semestre é menor, é possível atender até 60% da demanda transferida utilizando como origem apenas a *Refinaria A* (por conta da limitação em sua capacidade de produção), ou até 80% utilizando apenas a *Refinaria B* (por conta da limitação em sua capacidade de entrega), enquanto 100% da demanda transferida é atendida utilizando a produção das *Refinarias A+B*. As Figuras 23, 24 e 25 apresentam o custo total considerando o atendimento da demanda do 1º semestre nas localidades *Porto 1*, *Porto 2* e *Porto 3*, respectivamente.

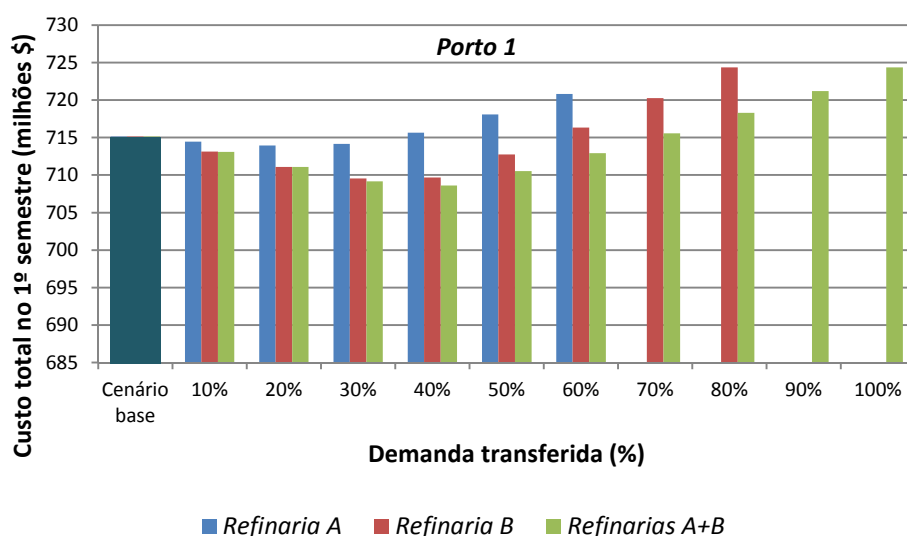


Figura 23 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 1*

O aumento considerável no custo total para percentuais superiores a 50% de transferência da demanda é explicado pelo aumento da participação da *Refinaria A* no atendimento da demanda, cujo custo unitário de produção é mais elevado em relação à *Refinaria B*.

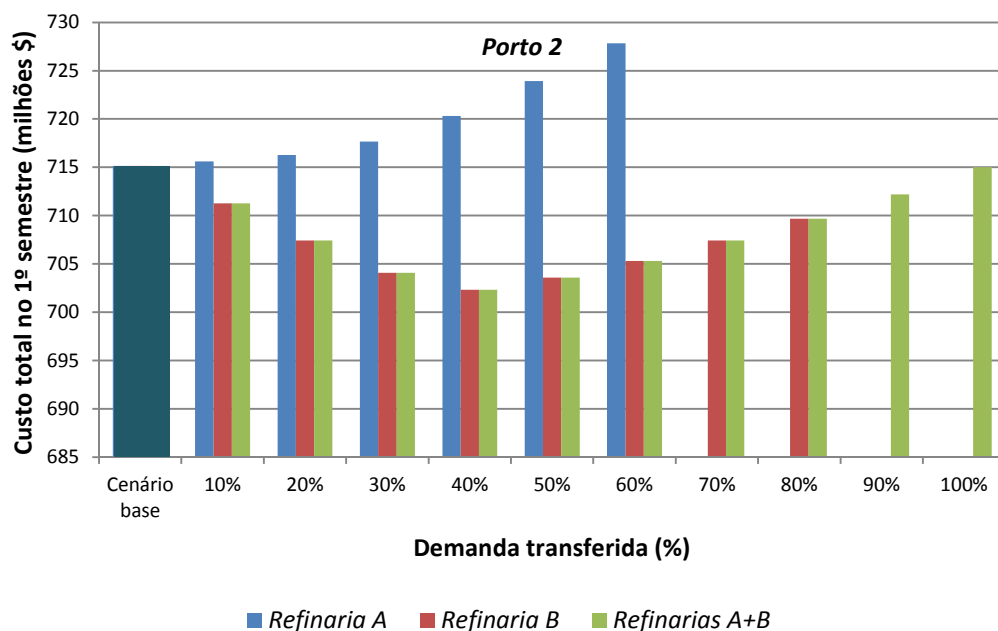


Figura 24 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 2*

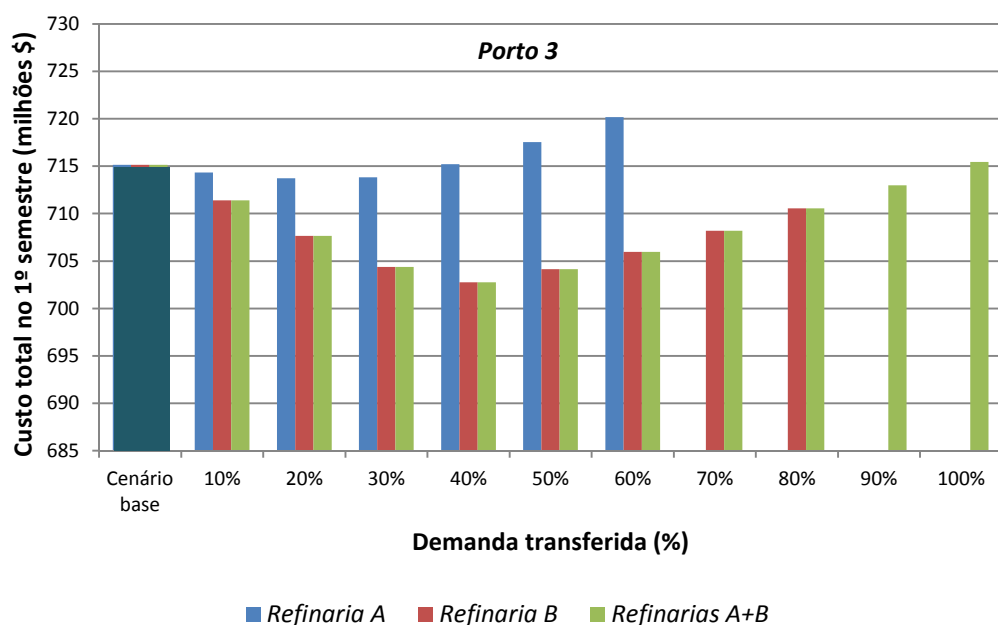


Figura 25 – Variação do custo total no 1º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 3*

Para o *Porto 2* e o *Porto 3*, o comportamento do custo total foi bastante similar. Considerando a entrega simultânea das *Refinarias A+B*, a análise gráfica mostra que, transferindo até 80% da demanda, o atendimento dessas localidades é feito exclusivamente pela *Refinaria B*, sendo complementado pela *Refinaria A* apenas no percentual seguinte.

A Figura 26 apresenta a contribuição percentual de cada refinaria isoladamente no atendimento aos diferentes percentuais de demanda transferida, para cada novo polo, no 1º semestre.

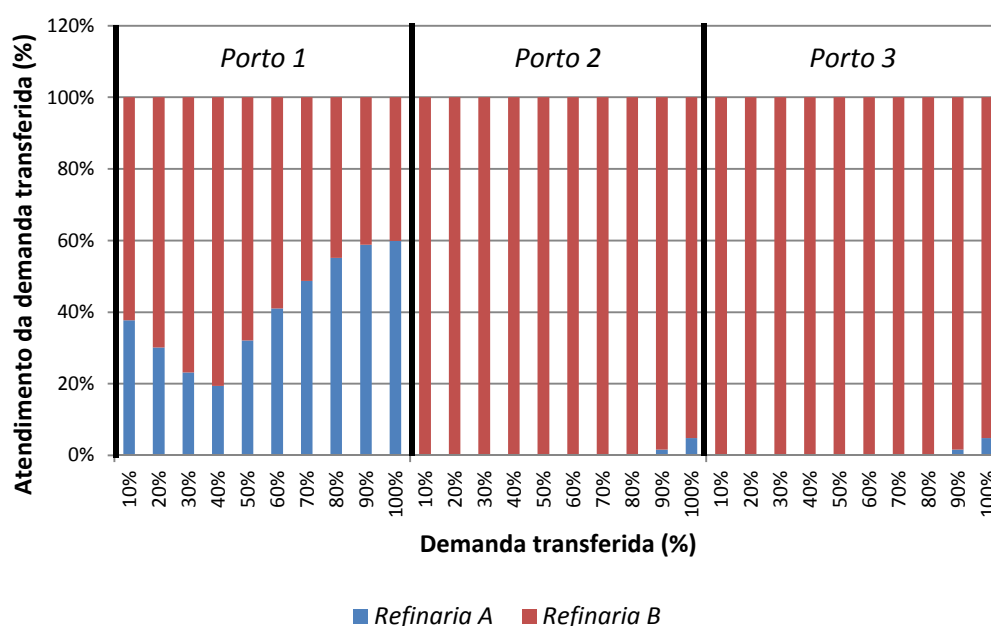


Figura 26 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas *Refinarias A+B*, no 1º semestre

A análise gráfica confirma que, para atendimento tanto do *Porto 2* quanto do *Porto 3*, a *Refinaria B* é praticamente a única demandada, enquanto no *Porto 1* há uma contribuição de atendimento pela *Refinaria A*, que aumenta com o aumento do percentual da demanda transferida. Os menores custos de produção da *Refinaria B*, bem como os menores custos de transporte dos arcos *Refinaria B* → *Porto 2* e *Refinaria 2* → *Porto 3* explicam esse comportamento.

Observa-se que, independente da localidade a ser atendida, o percentual da demanda transferida que minimiza o custo total, no 1º semestre, é de 40%. O custo total é ainda menor para o atendimento da localidade *Porto 2* através da entrega simultânea das *Refinarias A+B*, sendo esse o cenário otimizado para o 1º semestre.

5.2.2.2. Resultados do 2º semestre

O aumento da demanda no 2º semestre volta a limitar o atendimento pelas origens *Refinaria A* e *Refinaria B* em no máximo 30% e 60% da demanda transferida, respectivamente, enquanto a entrega simultânea das *Refinarias A+B* fica limitada a 90% da demanda transferida, tal qual o perfil apresentado para o horizonte de 1 ano.

A Figura 27 apresenta a contribuição percentual de cada refinaria isoladamente no atendimento aos diferentes percentuais de demanda transferida, para cada novo polo, no 2º semestre.

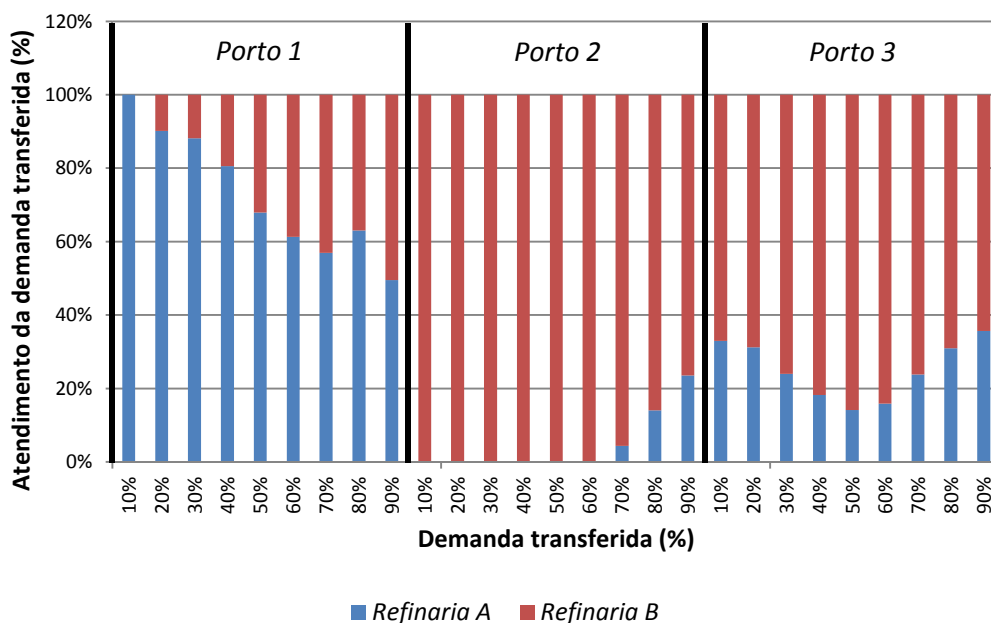


Figura 27 – Contribuição de cada refinaria isoladamente no atendimento à demanda em cada novo polo, para os diferentes percentuais de demanda transferida sendo atendida pelas *Refinarias A+B*, no 2º semestre

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam o custo total considerando o atendimento da demanda do 2º semestre nas localidades *Porto 1*, *Porto 2* e *Porto 3*, respectivamente.

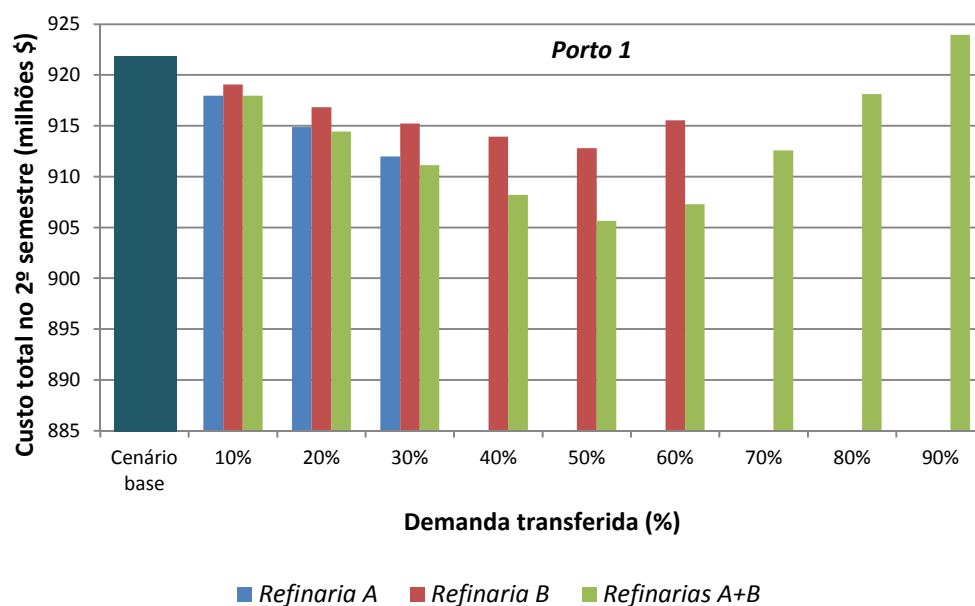


Figura 28 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 1*

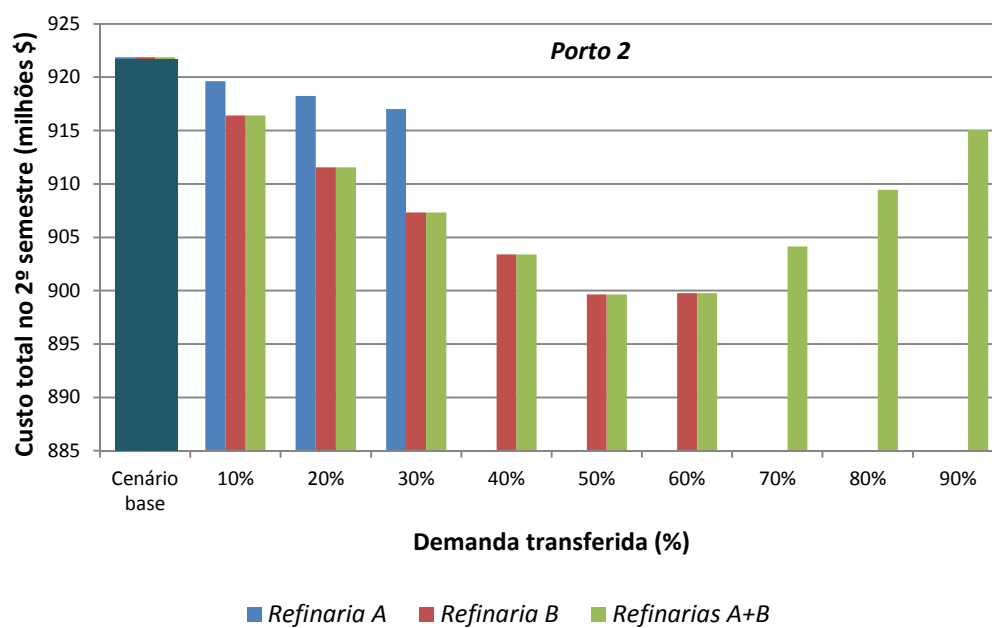


Figura 29 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 2*

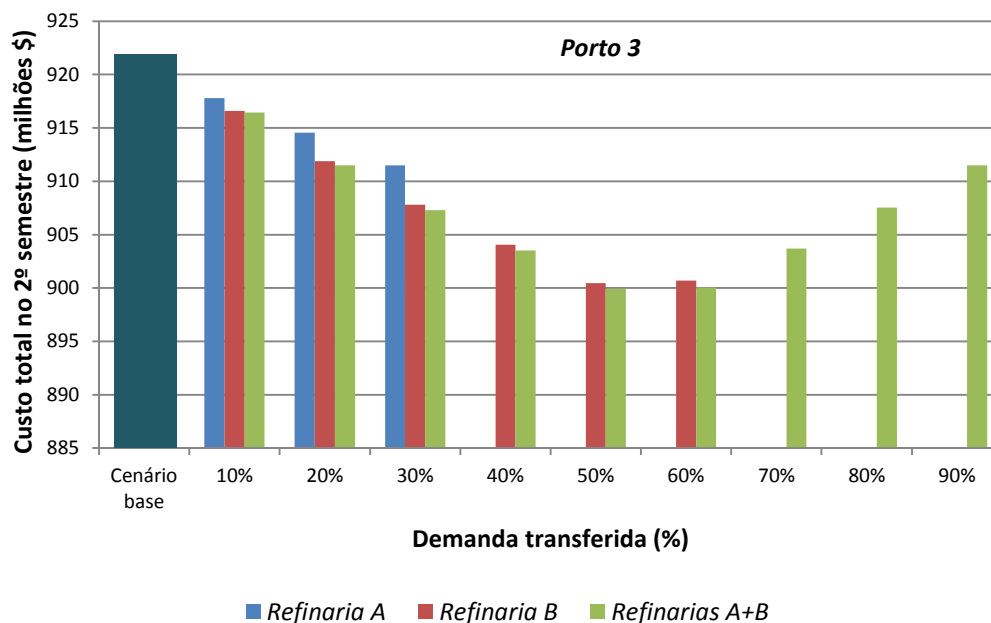


Figura 30 – Variação do custo total no 2º semestre, para atendimento de diferentes percentuais de demanda transferida para o *Porto 3*

Observa-se que, independente da localidade a ser atendida, o percentual da demanda transferida que minimiza o custo total, no 2º semestre, é de 50%. Assim como no 1º semestre, o custo total é ainda menor para o atendimento da localidade *Porto 2* através da entrega simultânea das *Refinarias A+B*, sendo esse o cenário otimizado para o 2º semestre.

5.2.3. Comportamento individualizado das parcelas de custos de transporte e de estoque

Analisando individualmente as parcelas de custos, considerando o atendimento da localidade *Porto 2*, a partir da entrega simultânea das *Refinarias A+B* (alternativas que fazem parte do cenário otimizado tanto na avaliação anual quanto na avaliação semestral), observa-se que existem mudanças significativas no perfil para cada horizonte considerado. A Figura 31 apresenta a variação do custo de transporte, para os horizontes avaliados.

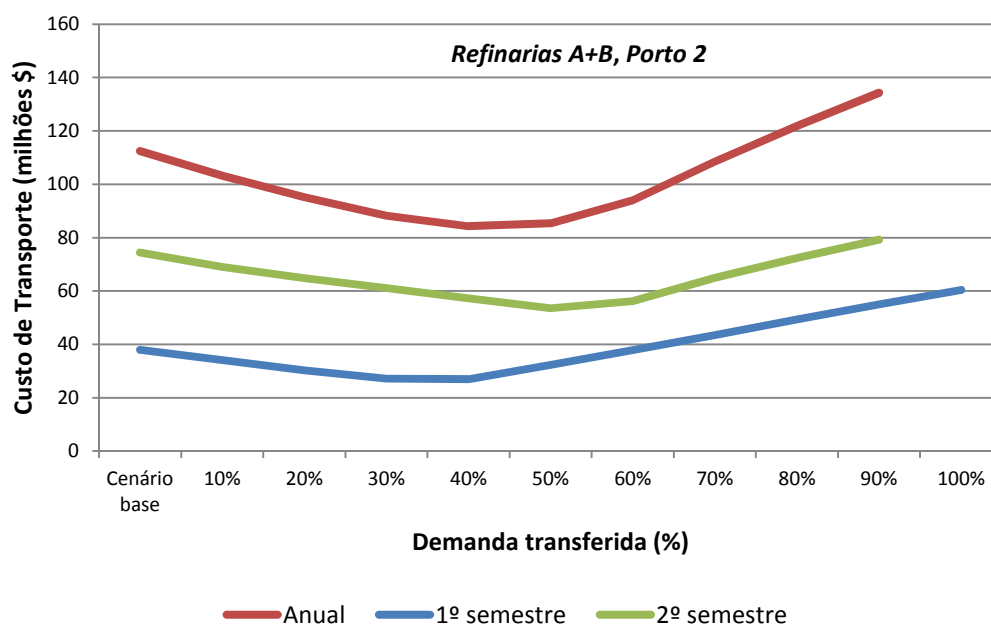


Figura 31 – Variação do custo de transporte para os diferentes horizontes de tempo avaliados

Além do aumento substancial na parcela de custo de transporte, em função do aumento de mercado, observa-se também modificação no ponto ótimo para os diferentes horizontes considerados. No horizonte semestral, a avaliação da localização do novo polo deve levar em consideração a possibilidade de alteração da demanda a ser transferida, a depender do semestre que se esteja planejando.

A Figura 32 apresenta a variação do custo de estoque, para os horizontes de tempo analisados.

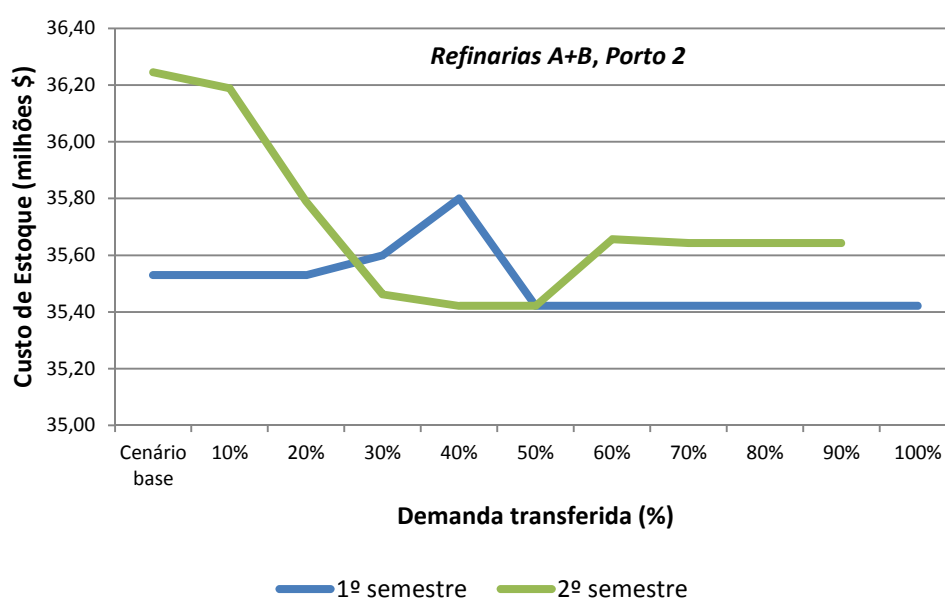


Figura 32 – Variação do custo de estoque para os diferentes horizontes de tempo avaliados

Observa-se que, para percentuais de transferência da demanda superiores a 50%, há diminuição do custo de estoque no 1º semestre, e aumento no 2º semestre. No 1º semestre, com a demanda ainda baixa, não há necessidade de manter estoques, enquanto no semestre seguinte faz-se necessário garantir o atendimento da demanda através da produção em meses anteriores. Esse comportamento é mais acentuado para demandas superiores a 50% devido ao aumento da dependência das duas refinarias que abastecem o novo polo, para garantir o atendimento à demanda transferida.

5.2.4. Resumo dos resultados das análises

A Tabela 6 apresenta um resumo dos cenários otimizados obtidos para cada horizonte de tempo analisados.

Parâmetros avaliados	Horizonte Temporal		
	Anual	1º Semestre	2º Semestre
Localização do novo polo	Porto 2	Porto 2	Porto 2
Origem do produto	Refinaria B	Refinaria B	Refinaria B
Demanda transferida (%)	50%	40%	50%
Redução monetária (milhões \$) em relação à configuração atual	\$123,95	\$42,20	\$94,30

Tabela 6 – Configuração dos cenários otimizados para cada horizonte temporal avaliado

Pelas indicações do modelo proposto, independente do horizonte temporal considerado, o custo total será minimizado através da localização do novo polo no *Porto 2*, sendo esse abastecido pela *Refinaria B*, com a transferência de 50% da demanda, considerando o horizonte de 1 ano, ou de 40% no 1º semestre e 50% no semestre seguinte. Cabe ressaltar que para os cenários otimizados, os resultados obtidos considerando como origem as *Refinarias A+B* são idênticos caso se considere a *Refinaria B* como origem. Isso porque, para esse percentual ótimo de demanda transferida, não há necessidade de utilizar a capacidade adicional da *Refinaria A*.

Dessa forma, a redução nos custos em relação à configuração atual será de \$124 milhões para o horizonte de 1 ano, ou de \$136 milhões, para a otimização semestral acumulada no horizonte de 1 ano.

6 Conclusão

Uma maior integração nacional é decisiva para o incremento do desenvolvimento econômico e social, fazendo com que regiões produtivas distantes de centros consumidores aumentem suas produções e, por conseguinte, elevem seus níveis de emprego e renda. Sob esse aspecto, o setor de transporte tem um importante papel na indução do desenvolvimento econômico e na integração social, sendo o modal rodoviário o principal modo de transporte no Brasil, por concentrar mais da metade do volume de cargas e passageiros transportados no país. Por isso, garantir rodovias em condições adequadas e seguras torna-se essencial para impulsionar e fortalecer a produção brasileira, além de proporcionar a integração territorial, reduzir custos e elevar a competitividade dos produtos nacionais. Com esse propósito, estratégias de investimentos tem sido adotadas no país, contemplando intervenções contínuas de pavimentação, adequação e manutenção das vias.

Neste cenário, a utilização da modelagem matemática para o apoio à tomada de decisão no planejamento da otimização da rede de distribuição de asfaltos é essencial para acompanhar a crescente demanda pelo produto e garantir o atendimento ao mercado no Brasil, de forma alinhada à estratégia de investimentos prevista pelos órgãos governamentais. Porém, a pesquisa realizada na literatura mostrou que há uma escassez de trabalhos dedicados a modelar a rede de distribuição integrada voltada para a cadeia de suprimento de produtos asfálticos. Deste modo, esta dissertação propôs uma ferramenta matemática para modelar a atual rede de distribuição de asfaltos com detalhes relevantes, como os diferentes arcos existentes entre as refinarias produtoras e os polos de vendas, assim como a necessidade de implantação de um novo polo de venda e sua localização ótima. Assim sendo, esta dissertação abordou um modelo que contribui para o processo de tomada de decisão em níveis estratégico e tático. Este modelo elimina o uso de múltiplas planilhas eletrônicas e garante que os resultados obtidos converjam para operações que apresentem o mínimo custo operacional, além de possibilitar estudos detalhados envolvendo comparação de cenários.

Do ponto de vista prático, foi possível demonstrar, com o estudo de caso, que o modelo apresenta-se como uma ferramenta de planejamento que pode ser usada na busca da localização ótima de um novo polo de venda de asfaltos, dentre um conjunto de locais candidatos, e quantifica os custos de produção, estoque e entrega que garante o atendimento a diferentes níveis de demanda desse novo polo, ao menor custo total. Pode-se afirmar assim que esta ferramenta integrada se revela um prático e sólido instrumento de apoio à decisão para áreas gerenciais do elo produtor na cadeia de suprimentos de asfaltos.

Por fim, vale reforçar a relevância deste modelo na conjuntura atual brasileira. Face ao grande desafio de desenvolvimento econômico e social do país, o planejamento otimizado da rede de distribuição de asfaltos auxilia a cadeia de suprimentos de produtos asfálticos a tornar-se capacitada para auxiliar o Brasil a avançar em sua integração nacional.

6.1. Trabalhos futuros

O modelo aqui desenvolvido, apesar de contribuir com o objetivo proposto, apresenta algumas limitações, que surgem como oportunidades de melhoria através da continuidade do seu desenvolvimento em diversas frentes.

Uma delas seria considerar a segregação dos dados para os diferentes tipos de asfaltos produzidos e comercializados pela Petrobras, contemplados na cesta ANP de produtos asfálticos (ANP, 2008). Neste trabalho, o modelo foi desenvolvido utilizando a premissa de que os asfaltos seriam tratados como um único produto, devido à dificuldade em se obter os dados de capacidade de produção das refinarias quando se considera cada produto asfáltico separadamente.

Outra frente de desenvolvimento do modelo seria a implantação da variável de decisão *modal de transporte*, que decidiria entre o uso do transporte rodoviário e o uso do transporte marítimo, nos arcos em que exista esta opção. Tal sugestão deve-se ao uso recente do modal marítimo, por cabotagem, como alternativa ao modal rodoviário, para o transporte de produtos asfálticos em alguns arcos desta rede de distribuição.

É comum que haja significativa variabilidade nos dados de demanda e de custo de transporte, que refletem as incertezas de mercado, e também nos dados da capacidade de produção das refinarias, e conseqüentemente da oferta

de produtos, cuja variabilidade advém da incerteza operacional. A consideração destas incertezas nos parâmetros de entrada surge como outra frente de desenvolvimento do modelo. Para incorporá-las na tomada de decisão do planejamento da otimização da rede de distribuição de asfaltos, pode-se adotar duas abordagens: a programação estocástica, em que a distribuição de probabilidade dos parâmetros incertos é conhecida ou pode ser estimada, ou a otimização robusta, que busca desenvolver modelos para que as soluções sejam factíveis para quaisquer realizações das variáveis aleatórias dentro de um conjunto dado *a priori*. Independente da abordagem escolhida, há de se reforçar que os modelos de programação matemática exigem informações a fim de produzir resultados que de fato tenham relevância para o tomador de decisão, e a coleta de dados constitui em uma etapa fundamental na utilização do modelo, devendo sua realização ser feita de maneira criteriosa, a fim de se obterem dados precisos, distinguindo claramente os que são determinísticos e os que são incertos.

AIRES, M., LUCENA, A., ROCHA, R., SANTIAGO, C., SIMONETTI, L., **Optimizing the petroleum supply chain at Petrobras**. Computer Aided Chemical Engineering, 2004, 18, 871-876.

AIZEMBERG, L., KRAMER, H.H., PESSOA, A.A., UCHOA, E., **Formulations for a problem of petroleum transportation**. European Journal of Operational Research, 2014, 237, 82-90.

AMORIM, P.S., **Optimization of bitumen exportation within the NWE Europe at Total**. (M.Sc.). Dissertação – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2009.

AN, H., WILHELM, W.E., SEARCY, S.W., **Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: a literature review**. Biomass and Bioenergy, 2011, 35, 36763–3774.

ANP, **Resolução ANP nº 19, de 11.7.2005**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

_____, **Resolução ANP nº 27, de 18.9.2008**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

_____, **Relação de instalações de distribuidoras de asfaltos cadastradas**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

_____, **Produção nacional de derivados de petróleo**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2014a. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

_____, **Importações e exportações**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2014b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

ARABANI, A.B., FARAHANI, R. Z., **Facility location dynamics: an overview of classifications and applications**. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62, 408-420.

BALLOU, R.H., **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. São Paulo, Editora Bookman, 2001a.

_____, **Unresolved issues in supply chain network design**. Information Systems Frontiers, 2001b, 3, 417–426.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P., SOARES, J.B., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Programa Asfalto na Universidade. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504p.

BOSCHETTO, S.N., MAGATÃO, L., BRONDANI, W.M., NEVES-JR, F., ARRUDA, L.V., BARBOSA-PÓVOA, A.P., RELVAS, S., **An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49, 5661-5682.

BOWERSOX, D.J., CLOSS, D.J., COOPER, M.B., **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRASIL, **Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT**, vol. 1: base de dados. Abril 2007. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro.

_____, **Projeto de reavaliação de estimativas e metas do PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes: relatório final**. Setembro 2012. Ministério dos Transportes.

CAMPOS NETO, C.A.S., SOARES, R. P.; FERREIRA, I.M., POMPERMAYER, F.M., ROMMINGER, A.E., **Gargalos e demandas da infraestrutura rodoviária e os investimentos do PAC: mapeamento IPEA de obras rodoviárias**. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011 (Texto para Discussão, n. 1592).

CASAS-LIZA, J., PINTO, J.M., **Optimal scheduling of a lube oil and paraffin production plant**. Computers & chemical engineering, 2005, 29, 1329-1344.

CHEN, L., OLHAGER, J., TANG, O., **Manufacturing facility location and sustainability: a literature review and research agenda**. International Journal of Production Economics, 2014, 149, 154-163.

CHOPRA, S., MEINDL, P., **Supply Chain Management**, [S.l.]: Prentice Hall, 2001.

CNT, **Plano CNT de Transporte e Logística 2011**. Confederação Nacional do Transporte, 2011.

_____, **Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial**. Confederação Nacional do Transporte, 2013.

DUARTE, D.A.L., Aplicação da modelagem de um sistema de apoio à decisão para o planejamento das operações logísticas de produtos especiais. (M.SC.). Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2002.

FARIAS, E.S., BORENSTEIN, D., **Modelagem matemática da rede logística de uma indústria multi-commodity**, Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

FELIZARI, L.C., **Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos**. (D.Sc.). Tese – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Paraná. 2009.

FERNANDES, L.J., RELVAS, S., BARBOSA-PÓVOA, A.P., **Strategic network design of downstream petroleum supply chains: single versus multi-entity participation**. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91, 1557-1587.

_____, **Collaborative design and tactical planning of downstream petroleum supply chains**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014.

FIESP, **Estudo da cadeia produtiva do asfalto: diagnóstico de problemas e proposições de aprimoramento**. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, Departamento da Indústria da Construção. São Paulo, 2009.

FIORENCIO, L., NUNES, P., OLIVEIRA, F., HAMACHER, S., **Análise de investimentos na cadeia de suprimentos downstream da indústria petrolífera: proposta de um modelo de programação linear inteira mista**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

GARCIA, E.S., REIS, L.M.T.V., MACHADO, L.R., FERREIRA, V.J.M., **Gestão de Estoques: otimizando a logística e a cadeia de suprimentos**. [S;l;]: E-papers Serviços Editorias, 2006.

GOETSCHALCKX, M., NEMHAUSER, G., COLE, M.H., WEI, R., DOGAN, K., ZHANG, X., **Computer aided design of industrial logistics systems**. Proceedings of the Third Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN III), 1994, Capri, Italia, 151-178.

HARRISON, T.P. **Principles for the strategic design of supply chains**. In: HARRISON, T.P., LEE, H.L., NEALE, J.J. (Eds), The practice of Supply Chain Management: where theory and application converge, 2004, 3-12.

IBP, **O papel da Petrobras na cadeia produtiva de asfaltos**, Set/Out 2011. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Asfalto em Revista, 19, 14-30.

IVANOV, D., PAVLOV, A., SOKOLOV, B., **Optimal distribution (re) planning in a centralized multi-stage supply network under conditions of the ripple effect and structure dynamics**. European Journal of Operational Research, 2014, 237, 758-770.

JOLY, M., PINTO, J.M., **Mixed-integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production**. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81, 427-447.

LEÃO, R.R.C.C., HAMACHER, S., OLIVEIRA, F., **Optimization of biodiesel supply chains based on small farmers: A case study in Brazil**. Bioresource Technology, 2011, 102, 8958–8963.

LEIRAS, A., RIBAS, G., HAMACHER, S.; ELKAMEL, A., **Literature review of oil refineries planning under uncertainty**. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2011, 4, 156-173.

_____, **Tactical and operational planning of multirefinery networks under uncertainty: an iterative integration approach**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52, 8507–8517.

LEITE, L.F.M., **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. (D.Sc.). Tese – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1999.

MANZINI, R., BINDI, F., **Strategic design and operational management optimization of a multi stage physical distribution system**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45, 915-936.

MARCELLINO, F.J.M., **Planejamento integrado da cadeia de suprimentos da indústria do petróleo baseado em agentes holônicos**. (D.Sc.). Tese – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

MDIC, **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior (AliceWeb)**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Secretaria de Comércio Exterior, 2013. Disponível em: <<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 17 jul. 2014

MULA, J., PEIDRO, D., DÍAZ-MADROÑERO, M., VICENS, E., **Mathematical programming models for supply chain production and transport planning**. European Journal of Operational Research, 2010, 204, 377-390.

NOGUEIRA, M.G., **Comparação do comportamento em campo de concretos asfáltico com CAP 30/45 e com CAP 50/70 para revestimentos de pavimentos**. (M.Sc.) Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008. 168p.

OLIVEIRA, J.S.G., **Optimização da cadeia de abastecimento dos betumes na Zona Noroeste da Europa na Total Bitumen**. (M.Sc.). Dissertação – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2008.

OLIVEIRA, F., GUPTA, V., HAMACHER, S., GROSSMANN, I.E., **A Lagrangean decomposition approach for oil supply chain investment planning under uncertainty with risk considerations**. Computers and Chemical Engineering, 2013, 50, 184–195.

PETROBRAS, **Fatos e Dados: Petrobras bate recorde de produção e vendas de asfaltos em 2010**. Janeiro 2011. Petróleo Brasileiro S.A. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspotpetrobras.com.br>>. Acesso em 18 jul. 2014.

PROTO, L.O.Z., **Um modelo para o planejamento agregado da produção e distribuição, com múltiplas localidades e produção em dois estágios**. (M.Sc.). Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 2006.

ROCHA, R., GROSSMANN, I.E., ARAGÃO, M.V.P. **Petroleum allocation at Petrobras: mathematical model and a solution algorithm.** Computers & Chemical Engineering, 2009, 33, 2123-2133.

SAHEBI, H., NICKEL, S., ASHAYERI, J., **Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context – a review.** Computers & Chemical Engineering, 2014, 68, 56-77.

SANTOS, M. A., **Avaliação do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio via ensaios de laboratório.** (D.Sc.) Tese – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 2002.

SERPA, F.G., HAMACHER, S., **Modelo de programação matemática para suporte à decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais,** Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

SHAH, N. K., LI, Z., IERAPETRITOU, M. G., **Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities.** Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 50, 1161-1170.

SHAPIRO, J. F., **Modeling the supply chain.** Duxbury Press, 2006.

SHELL, **The Shell bitumen handbook.** 5. ed. Cambridge, 2003.

SILVA, R.F.P., **Optimização da cadeia de abastecimento dos betumes na Zona Mediterrânica da Europa na Total Bitumes.** (M.Sc.). Dissertação – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2008.

SOUZA FILHO, E.M., BAHIENSE, L., FERREIRA FILHO, V.J.M., **Programação de uma rede dutoviária considerando períodos de manutenção programada,** Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2011.

TONIAL, I.A.; BASTOS, A.C.R. **Rotas de produção de asfalto.** Relatório Interno Petrobras, 1995.

TONIAL, I.A., **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos.** (M.Sc.) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

WANKE, P. F., **Aspectos fundamentais do problema de localização de instalações em redes logísticas.** Revista Tecnológica, São Paulo, 2001, 5, 3.

YADAV, S., **Optimization model for scheduling of a lube-oil production plant.** International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2014, 5, 439-455.