

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE DISTRIBUIÇÃO DE GASOLINA ENTRE REFINARIAS, TERMINAIS E MACRO REGIÕES DO BRASIL

Estêvão Ferreira Sêco de Alvarenga

Marcelo Maia Freire de Oliveira

Caio Fernando dos Santos Araújo

Paulo Oswaldo Boaventura-Netto

Laura Bahiense

Samuel Jurkiewicz

Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ

Av. Athos da Silveira Ramos 149, bl. F, sl. F 103

E-mails: {[caio.f.s.araujo](mailto:caio.f.s.araujo@gmail.com), [estevao.alvarenga](mailto:estevao.alvarenga@gmail.com), [marcellomaia](mailto:marcellomaia@gmail.com), [laura.bahiense](mailto:laura.bahiense@gmail.com)}@gmail.com,
([jurki.boaventu](mailto:jurki.boaventu@pep.ufrj.br))@pep.ufrj.br @gmail.com

RESUMO

Este artigo trata de um problema de distribuição de gasolina no Brasil, considerando a demanda de diversas regiões brasileiras e os modais de transporte (marítimo, dutoviário e rodoviário) existente entre todas as 117 cidades consideradas no modelo, cada uma representando uma das mesorregiões, cobrindo todo o território nacional. Foi construída uma rede com essas cidades e foram levantados os custos de transporte por cada modal, onde existente, bem como as distâncias entre as cidades e a demanda das regiões. Assim, o modelo pode ser considerado como a descrição de um problema de fluxo em redes, cujo objetivo é minimizar o custo total de distribuição, existindo ainda arcos marítimos, onde a quantidade de navios é uma variável inteira. Os resultados possibilitaram o questionamento sobre a matriz de transportes brasileira, essencialmente rodoviária, incompatível com as dimensões do país.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxos em rede; logística; minimização dos custos de distribuição; Distribuição de combustíveis.

Área principal: Distribuição.

ABSTRACT

This paper deals with a problem of gasoline distribution in Brazil, concerning the demand of various Brazilian regions and modes of transport (ship, pipeline and road) set between all the 117 cities considered in the model, each one representing a different area of the country, covering the entire national territory. A network with these cities was developed considering the transportation costs for each modal arc (where existing), the distances between cities and the regional demands. Thus, the model may be regarded as the description of a network flow problem, whose objective is to minimize the total cost of distribution. Regarding the maritime arcs, the number of ships is an integer variable that does not allow the use of linear programming. The results were allowed a questioning about the Brazilian transport matrix, mainly road, incompatible with the dimensions of the national territory.

KEYWORDS: Network flow; logistics; distribution cost minimization; fuel distribution.

Main Area: Distribution.

I - INTRODUÇÃO

O atual modelo de transporte de indivíduos no Brasil é apoiado fortemente pelo consumo de motores de combustão de ciclo Otto, os quais têm como combustível a gasolina, o etanol ou uma mistura deles. A gasolina é um derivado do petróleo basicamente constituído por hidrocarbonetos e, em baixas concentrações, compostos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio. Atualmente, a demanda mensal de gasolina no país está em torno de dois milhões e meio de metros cúbicos, sendo atendida em parte pela produção das refinarias e em parte por importação. Uma vez produzido ou importado, este produto é enviado via transporte dutoviário, rodoviário ou marítimo para as bases e, então, distribuído aos demais polos, principalmente por rodovia.

A PETROBRAS, empresa brasileira de petróleo e gás, utiliza um modelo de programação linear para a otimização de sua cadeia de suprimentos, visando maximizar o lucro operacional. Algumas das decisões que este modelo suporta são: 1. quanto cada refinaria deve produzir de cada produto; 2. volume e preço da importação, e 3. como a demanda de cada base será atendida. Como resultado, temos o volume disponível de um dado produto em cada refinaria ou base, seu valor marginal e a fração da produção de cada refinaria destinada a cada polo de consumo.

Por se tratar de um modelo complexo e com um número elevado de variáveis, algumas simplificações são necessárias, como o número de polos de consumo, que no modelo são agregados em *bases de consumo*. Em vista dessa complexidade, algumas dúvidas persistem após a execução da otimização: a área de influência de cada base ou refinaria, a saturação da capacidade de determinados arcos e a necessidade de contratação de serviço de transporte adicional para trechos específicos.

A proposta deste trabalho é minimizar o custo total de abastecimento de gasolina no Brasil, levando-se em conta custos de produção, importação e transporte e utilizando uma rede que represente os possíveis arcos de transporte entre os diversos pontos de produção e consumo utilizando, para tal, conceitos implícitos da teoria de grafos e de programação linear e inteira.

Neste trabalho, a Seção II contém uma revisão bibliográfica do problema de custos de transporte em redes; a Seção III trata do detalhamento das informações utilizadas; a Seção IV, do método de otimização empregado, enquanto as Seções V e VI expõem os resultados obtidos e as análises de sensibilidade. A Seção VII corresponde às conclusões.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem adotada neste artigo é vista em problemas de *uncapacitated lot sizing* ou *network flow problem*, no qual se trata de fluxo em redes. No Brasil destacamos alguns exemplos de pesquisa semelhantes ao presente trabalho: Carmo, Neto e Dutra (2011) tratam de um problema de seleção de fornecedores para minimização dos custos envolvidos em uma rede de biodiesel, o estudo destes autores se assemelha ao presente trabalho no que se refere à rede considerada e às limitações de capacidade de produção; Praça (2003), Bandeira (2006) e Chaves (2010) desenvolveram modelos de programação matemática para apontar que infraestruturas de distribuição de gás natural devem ser implantadas ou operação de rede existente, de modo a minimizar o custo. A formulação se assemelha em relação à atribuição de fluxos entre os nós (cidades).

Na literatura internacional, podemos destacar alguns trabalhos tais como: Goldfarb e Jin (1999), que emprega um algoritmo de tempo polinomial para minimização de custo de fluxo em rede; Hamedi ET al. (2009) utiliza um modelo misto de produção inteira e não-linear para minimização de custos diretos e indiretos de distribuição de gás natural considerando vários períodos e resolvendo os mesmo hierarquicamente; Ferrio e Wassik (2008) emprega um modelo misto de programação inteira e não linear para redimensionar uma cadeia de suprimentos multi-produtos existentes composta de produtores, centros de distribuição e pontos de consumo com o menor custo; Zhu ET al. (2011)

soluciona via modelo misto de programação inteira e linear um problema de fluxo em rede *NP-hard* no qual se limita o fluxo de arco com valores fixos de mínimo e máximo, sendo possível o fechamento de determinado arco caso seu uso não se justifique.

III – DADOS: OBTENÇÃO E ANÁLISE

As informações utilizadas no modelo desse trabalho se dividem em três classes: informações de *downstream* (área da empresa de petróleo que se preocupa com o refino, transporte e comercialização de derivados), informações de consumo e informações geográficas. Por questão de sigilo, foram feitas adequações das informações relacionadas a custos de produção e transporte mantendo-se, contudo, a proporcionalidade entre os valores para que os resultados sejam ainda aplicáveis.

Foram construídas seis matrizes para representar o problema descrito:

- 1- Matriz de demanda de cada ponto;
- 2- Matriz de capacidade máxima de produção/importação disponível em cada cidade;
- 3- Matriz de custos de cada arco para o grafo a ser trabalhado;
- 4- Matriz com custo de produto disponível em cada cidade;
- 5- Matriz com limite de fluxo;
- 6- Matriz contendo o modal a ser utilizado entre cada par de cidades.

3.1 INFORMAÇÕES DE DOWNSTREAM

Demanda total: Foi considerado um valor de 2.500.000 metros cúbicos por mês.

Dados de produção: Trata-se da capacidade de produção ou de importação de determinada cidade e o custo da disponibilidade de gasolina nestas cidades. A localização das refinarias foi colocada como sendo a da cidade mais populosa da mesorregião em que se encontra. São Luís é a única cidade onde há importação, pois é o único terminal utilizado para esta operação. A Tabela 1 sumariza esses dados (custo do produto dados em unidades monetárias):

Tabela 1: Locais de produção, capacidade de produção e custo de produção

Estado	Município ref.	Produção mín. (1000 m ³)	Produção máx. (1000 m ³)	Custo prod. (u.m./mil m ³)*
Amazonas	Manaus	7	10	208,0
Bahia	Salvador	175	200	203,0
Maranhão	São Luís**	0	650	204,5
Minas Gerais	Belo Horizonte	137	150	216,0
Paraná	Curitiba	177	200	214,0
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	132	182	203,0
Rio Grande do Norte	Natal	10	10	208,0
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	134	150	250,0
São Paulo	Campinas	379	450	207,0
São Paulo	São Paulo	53	70	207,0
São Paulo	S.J. dos Campos	213	250	206,0
São Paulo	Santos	193	250	206,0

Arcos dutoviários e marítimos: Os percursos dutoviários existentes são aqueles operados pela Petrobras. Para todos eles, foram levantados o limite de fluxo e o custo de transporte (por mil metros cúbicos). Para os arcos marítimos, considerou-se o custo por mil metros cúbicos e o volume de navio de 30 mil metros cúbicos. As informações relacionadas aos arcos marítimos são apresentadas na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta informações relativas aos arcos dutoviários.

Arcos rodoviários: Considerou-se a existência desses arcos a partir de todas as cidades com produção, importação ou que sejam destinos de fluxos dutoviários e/ou marítimos, para qualquer

outra em que haja consumo. Para os arcos rodoviários, foi considerado um limite de fluxo de 50 mil metros cúbicos/mês. O custo foi determinado a partir dos contratos atuais da empresa de transporte por caminhão (novamente adequados por questão de sigilo), e seu valor é de $2,57 \times 10^{-2}$ unidade monetária por km para cada mil metros cúbicos de combustível transportados.

3.2 INFORMAÇÕES DE CONSUMO

Os dados referentes às cidades brasileiras foram obtidos a partir do Censo de 2000 (quando da elaboração do presente trabalho, os dados do Censo de 2010 ainda não estavam consolidados). As cidades foram consolidadas em 117 mesorregiões, distribuídas em todos os estados brasileiros. Foram utilizados dados de atividade econômica (PIB e PIB per capita) para avaliar a população de cada mesorregião. Algumas mesorregiões foram consolidadas seguindo os critérios de ter no mínimo 500 mil habitantes e estar em local cujo abastecimento seja, *a priori*, sabidamente feito por uma origem apenas. Alguns estados em regiões mais remotas foram inteiramente consolidados.

Tabela 2: Cidade de origem, destino e custo dos arcos marítimos (u.m./mil m³)

Origem \ Destino	Belem	Fortaleza	Manaus	Paranaguá	São Luís
Paranaguá	6,8	5	8,2	-	5,9
Rio de Janeiro	6	4,2	7,3	2	5,1
Salvador	4,4	2,6	5,8	3,4	3,5
Santos	6,5	4,7	7,8	1,7	5,5
São Luís	2,4	2	3,7	5,9	-

Tabela 3: Cidade de origem, destino, capacidade e custo dos arcos dutoviários

Origem	Destino	Capacidade (mil m ³ /mês)	Custo (u.m./mil m ³)
Belo Horizonte	Rio de Janeiro	75	0,96
Santos	Guararema	1150	0,08
Guararema	Santos	280	0,17
Campinas	Guararema	150	0,4
Guararema	Campinas	270	0,3
Campinas	Riberão Preto	300	0,33
Riberão Preto	Uberada	230	0,33
Uberada	Uberlândia	280	0,33
Uberlândia	Goiânia	230	0,33
Goiânia	Brasília	90	0,33
Curitiba	Paranaguá	90	0,37
Curitiba	Guaramirim	80	0,37
Joinville	Blumenau	80	0,37
Blumenau	Florianópolis	35	0,37
Porto Alegre	Tramandaí	120	0,29
Tramandaí	Porto Alegre	120	0,29
Guararema	São José dos Campos	160	0,11
São José dos Campos	Volta Redonda	125	0,99
Volta Redonda	Rio de Janeiro	125	0,99

As informações de frota veicular de 2012 foram obtidas em [DENATRAN], considerando-se apenas os veículos de motor ciclo Otto. Com a demanda total do Brasil, a taxa de veículos *per capita* de cada estado e população de cada mesorregião (que pertence a um estado), calculou-se a demanda de cada mesorregião, como segue.

Índices: *i* – estado; *j* – mesorregião

Variáveis:

- $P(i)$ – população do estado i ;
- $V(i)$ – número de veículos automotores de ciclo Otto;
- $R(i)$ – veículo per capita de cada estado i ;
- $PIB(i,j)$ – PIB da mesorregião j do estado i ;
- $PIBp(i,j)$ – PIB per capita da mesorregião j do estado i ;
- $P(i,j)$ – população do mesorregião j do estado i ;
- $DemTot$ – demanda total de gasolina A;
- $DemMeso(i,j)$ – demanda de cada mesorregião j do estado i ;

O cálculo da demanda de cada mesorregião é dado pelas equações (1), (2) e (3) a seguir:

$$R(i) = V(i) / P(i) \quad (1)$$

$$P(i,j) = PIB(i,j) / PIBp(i,j) \quad (2)$$

$$DemMeso(i,j) = \frac{P(i) * R(i)}{\sum_i \sum_j P(i,j)} * DemTot \quad (3)$$

3.3 INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Para a geração das distâncias rodoviárias entre as cidades, primeiramente foi criado um mapa com todas as cidades que representam os nós do grafo e, posteriormente por meio de um algoritmo desenvolvido para esse fim, obtiveram-se por consulta ao site www.google.com/maps todas as distâncias necessárias para o modelo.

IV - MODELAGEM E ALGORITMO

Os dados descritos acima foram, então, consolidados em uma planilha e exportados para um arquivo de extensão .dat no formato de leitura a ser utilizado pelo *Fico Xpress*. Nos parágrafos abaixo segue a descrição das variáveis, restrições utilizadas, e função objetivo.

No algoritmo, os índices i,j representam a origem e o destino de cada arco da rede construída. (total de 117 pontos como dimensão das variáveis). Os parâmetros de entrada do modelo estão apresentados na tabela 4 a seguir. As variáveis de decisão são:

$Production(i)$ – produção/importação indicada para determinada cidade (mil m^3)

$Flow(i,j)$ – fluxo rodoviário ou dutoviário entre cada par de cidades (mil m^3)

$Ships(i,j)$ – número de navios entre cada par de cidades (mil m^3)

A função objetivo do modelo deve levar em consideração os custos de produção, importação e transporte nos diversos modais disponíveis. A equação (4) apresenta a função objetivo descrita:

$$z = \sum_i \sum_j FlowCostRoadPipe(i, j) * Flow(i, j) - \sum_i \sum_j FlowCostShips(i, j) * Ships(i, j) * ShipCapacity + \sum_i Production(i) * PlantCost(i) \quad (4)$$

Os dois primeiros termos da equação representam os custos de transporte rodoviário, dutoviário e marítimo, enquanto o último representa os custos de produção e importação de gasolina.

Tabela 4: Nome, domínio e descrição de cada um dos parâmetros utilizados na modelagem

Nome	Domínio	Descrição
Demand	Vetor n, real	Demanda por cidade (mil m ³)
PlantCap	Vetor n, real	Capacidade máxima de produção / importação por cidade (mil m ³)
PlantCost	Vetor n, real	Custo de produção / importação por cidade (u.m / mil m ³)
FlowCostRoadPipe	Matriz n x n, real	Custo por modal rodoviário e dutoviário entre cada par de cidades (u.m / mil m ³)
FlowCostShip	Matriz n x n, real	Custo por modal marítimo entre cada par de cidades (u.m / mil m ³)
TransCap	Matriz n x n, real	Limite de fluxo entre cada par de cidades (mil m ³)
Modal	Matriz n x n, string	Modal entre cada par de cidades (mil m ³)
Ships	Escalar inteiro	Volume de navio (mil m ³)

A primeira restrição do modelo limita a produção/importação à capacidade do local:

$$Production(i) \leq PlanCapacity(i) \quad (5)$$

A soma dos fluxos que chegam a determinado nó deve ser maior ou igual à demanda deste nó:

$$\sum_i Flow(i, j) + \sum_i Ships(i, j) * ShipCapacity \geq Demand(j) \quad (6)$$

As equações 7, 8 e 9 apresentam a restrição de não-negatividade, de capacidade de arco e de integralidade do número de navios:

$$Flow(i, j) \geq 0 \quad (7)$$

$$Flow(i, j) \geq TransCap(i, j) \quad (8)$$

$$Ships(i, j) \text{ é inteira} \quad (9)$$

Restrição de conservação de fluxo:

$$\sum_i Flow(i, j) + \sum_i Ships(i, j) * ShipCapacity + Production(j) \geq Demand(j) + \sum_i Flow(j, i) + \sum_i Ships(j, i) * ShipCapacity \quad (10)$$

Convém observar que essa expressão permite que cada nó desempenhe todos os diferentes papéis do problema: como ponto de passagem, recebimento, envio, produção ou consumo.

V - RESULTADOS OBTIDOS

O valor da função objetivo encontrada é de 543.471 unidades monetárias. Uma primeira análise dos dados gerados apresenta um grande uso de arcos rodoviários. A Tabela 6 mostra a quantidade de arco utilizado e volume transportado por tipo de modal utilizada pela solução do modelo.

Há três arcos identificados como “SOBRA de Marítimo”, que representam volumes que não serão atendidos pelo modal Marítimo (mas deveriam) e que o modelo mostra em separado para que se tomem decisões sobre esse pequeno (mas existente) volume não atendido. O modelo, nestes casos, transfere o volume por um arco fictício.

Tabela 6: Quantidade e tipos de arcos utilizados e volume transportado por tipo de arco

Modal	Quantidade de arcos utilizados		Volume transportado por modal	
	Quantidade	Porcentagem	Volume (mil m ³)	Porcentagem
Rodoviário	101	74,8%	1.204,4	28,6%
Dutoviário	23	17,0%	2.441,3	56,3%
Marítimo	8	5,9%	630,0	14,5%
Sobra de Marítimo	3	2,2%	26,7	0,6%
Total	135	100%	4.338,5	100,0%

Percebe-se que, apesar de haver mais arcos rodoviários sendo utilizado, o modal dutoviário é aquele que transporta o maior volume de gasolina. Isto pode ser explicado pelo menor custo e por suas capacidades. Outra visão interessante é a de quais as cidades mais utilizadas, pois elas podem ser vistas como “ponto-chave”. Essa visualização é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7: Cidades mais usadas na rede

Posição	Quantidade	Cidade
1	17	São Luís
2	15	Fortaleza
3	13	Rio de Janeiro
4	13	Salvador
5	12	Campinas

Esta ordem é facilmente explicada: São Luís é cidade onde toda a importação acontece e a partir de onde ela é distribuída para outros locais do país; Fortaleza é uma cidade com porto e sem refinaria próxima; Rio de Janeiro e Salvador são cidades com refinarias de grande porte e pontos importantes de distribuição para cidades do interior e, finalmente, Campinas possui a maior refinaria do país, é origem do duto de maior capacidade e atende à demanda de parte importante do estado de São Paulo, além de quase toda a demanda do Centro-Oeste.

A Tabela 8 mostra os arcos de maior volume e a Tabela 9 apresenta os arcos marítimos utilizados.

Tabela 8: Maiores arcos do modelo

Origem	Destino	Vol., (mil m ³ /mês)	Modal
Guararema	São Paulo	351,01	Dutoviário
Santos	Guararema	301,34	Dutoviário
Campinas	Ribeirão Preto	300,00	Dutoviário
Ribeirão Preto	Uberaba	209,18	Dutoviário
São Luís	Fortaleza	180,00	Marítimo

Tabela 9: Quantidade e alocação de navios

Origem	Destino	Quantidade	Volume (mil m ³)
Salvador	Paranaguá	2	60
São Luís	Manaus	2	60
São Luís	Fortaleza	6	180
São Luís	Belém	2	60
São Luís	Rio de Janeiro	3	90
São Luís	Santos	2	60
São Luís	Paranaguá	1	30
São Luís	Tramandaí	3	90
Total		21	630

Na Tabela 8, pode-se verificar que as duas maiores vazões estão relacionadas ao mercado da cidade de São Paulo e as duas subsequentes mostram a importância da produção da refinaria de Campinas e do envio de gasolina deste ponto para o interior do país. A última representa a utilização de importação para atendimento de uma área deficitária deste produto.

Conforme a Tabela 9, a maior quantidade de navios é utilizada para distribuição da importação que chega a São Luís pela costa do país nos pontos deficitários. Outra movimentação importante apresentada é de Salvador, onde a produção é maior do que o consumo, para o estado do Paraná, onde há déficit.

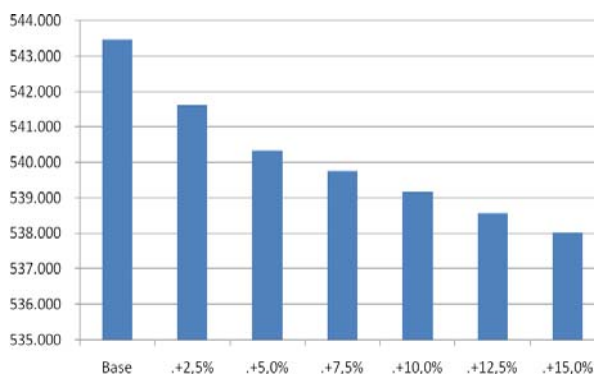
VI-ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma vez gerado o cenário base, foram propostos alguns cenários para explorar variações na utilização de diferentes arcos e tipos de modal. Os cenários são:

- 1- Aumento da capacidade de produção nas refinarias;
- 2- Aumento da demanda das mesorregiões
- 3- Alteração do tamanho dos navios disponíveis para transporte.

Para o cenário de aumento de capacidade de produção das refinarias, foram mantidas todas as variáveis do modelo e aumentou-se a capacidade de produção máxima de todas as refinarias e do porto de importação em intervalos de 2,5% até 15%, pois entendemos que aumento maior que esse valor na produção de refinarias não seja realista. A Figura 1 apresenta a variação do custo total nos diferentes cenários.

Figura 1: Custo Total do modelo, por cenário.



Como esperado, dado que a demanda foi mantida constante e que a capacidade de produção aumentou, o custo total foi reduzido, pois a produção se concentrou nos locais de menor custo e houve menor necessidade de se utilizar arcos de transportes mais custosos. A Tabela 10 apresenta a alteração nos volumes transportados por tipo de modal, para cada um dos cenários de aumento de produção.

Tabela 10: Volume transportado por modal, por cenário

Cenário	Rodoviário	Dutoviário	Marítimo	Total*
Base	1.240	2.441	630	4.312
+2,5%	1.240	2.502	660	4.402
+5,0%	1.268	2.603	690	4.562
+7,5%	1.260	2.558	660	4.478
+10,0%	1.249	2.530	600	4.380
+12,5%	1.238	2.506	570	4.315
+15,0%	1.237	2.586	510	4.334

* Foram desconsiderados os arcos de sobra de Marítimo nessa comparação.

A Tabela 11 apresenta a alocação de navios, para cada um dos cenários de aumento da produção. Como se pode concluir das Tabelas 11 e 12, o transporte rodoviário tem pouca alteração à medida que se pensa no aumento da produção das refinarias. A diminuição de custo com esse aumento é explicada principalmente pela diminuição da importância de São Luís (importação), que reduz de 624 mil m³ enviados no cenário-base para 473 mil m³ no cenário de demanda 15% maior.

Tabela 11: Alocação de navios, por cenário

Origem	Destino	Base	+2,5%	+5,0%	+7,5%	+10,0%	+12,5%	+15%
Salvador	Paranaguá	2	2	2	3	3	3	3
São Luís	Manaus	2	2	2	2	2	2	2
São Luís	Fortaleza	6	6	6	6	6	6	6
São Luís	Belém	2	2	2	2	2	2	1
São Luís	RJ	3	3	3	3	2	2	1
São Luís	Santos	2	2	3	2	1	0	0
São Luís	Paranaguá	1	1	1	0	0	0	0
São Luís	Tramandaí	3	4	4	4	4	4	4
Total		21	22	23	22	20	19	17

A Tabela 12 apresenta a utilização da capacidade de produção/importação de cada cidade nos cenários propostos. Como se pode observar, passamos a ter uma menor utilização da capacidade nas origens Manaus, Porto Alegre e São Luís. A explicação referente a Porto Alegre é bastante intuitiva, dado que o custo de disponibilização de gasolina nessa mesorregião é o maior.

Tabela 12: Custo de produção/importação e indicação de utilização da capacidade de produção/importação de cada cidade nos cenários Base e de sensibilidade

Cidade	Custo Prod. (u.m./mil m ³)	Cenário						
		Base	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%	12,5%	15,0%
Belo Horizonte	216	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Campinas	207	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Curitiba	214	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Manaus	208	84%	82%	0%	0%	0%	0%	0%
Natal	208	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Porto Alegre	250	73%	33%	1%	0%	0%	0%	0%
Rio de Janeiro	203	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Salvador	203	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Santos	206	101%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
S. J. dos Campos	206	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
São Luís	205	96%	98%	100%	91%	80%	74%	67%
São Paulo	207	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

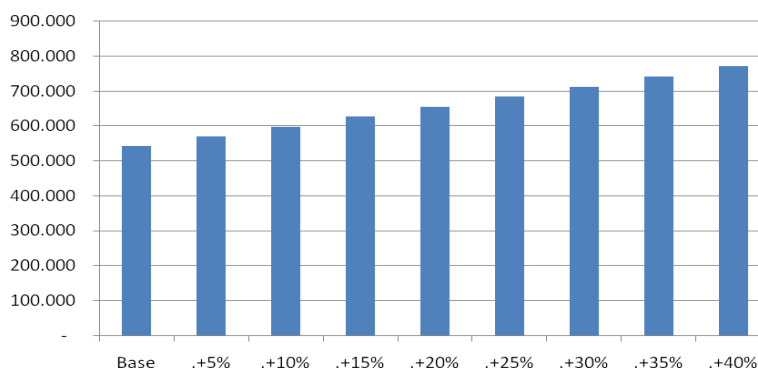
Claramente, a importação é substituída por produção nacional, uma vez que o custo de importação, apesar de baixo, deve necessariamente ser acrescido ao custo de transporte quando atender a demanda de outra cidade que não seja São Luís, cujo mercado é baixo (18,34 mil m³/mês). Em relação a Manaus, apesar de seu custo de produção ser relativamente baixo, é indicado atendimento de mercado local via recebimento por navio, com origem em São Luís.

O aumento da capacidade produtiva das refinarias permite observar dois impactos antagônicos: (i) opções mais baratas de produção viabilizam modais mais caros e (ii) opção de consumir derivados produzidos dentro da mesorregião (caso de grandes polos). É pela interação dessas características que o volume transportado total cresce, para em seguida decrescer, enquanto que o custo total está em redução constante.

Para o cenário de aumento da demanda, o limite máximo de importação por São Luís foi incrementado para absorver a carência de gasolina, evitando a inviabilidade do problema. Essa análise faz sentido, pois o aumento da frota de veículos com motor ciclo Otto no país é um fenômeno recorrente. A demanda foi aumentada em intervalos de 5%, até um máximo de 40%. A Figura 2

apresenta a variação do custo total nos diferentes cenários. No caso do aumento da demanda, o custo tem um crescimento constante em vista dos maiores custos de produção, transporte e importação.

Figura 2: Custo Total do modelo, por cenário.



A Tabela 13 apresenta alteração nos volumes transportados por modal (desconsiderando as sobras de Marítimo), enquanto a Figura 3 apresenta uma comparação entre o cenário de aumento de 40% da demanda e o cenário-base, trazendo o aumento do custo total e dos volumes transportados (total e por tipo de modal). Observamos que o volume transportado por duto é o de menor variação, já operado próximo ao seu limite máximo de vazão. Enquanto o custo total aumentou 42%, o transporte dutoviário foi responsável por apenas 32% do aumento de volume.

Tabela 13: Volume transportado por modal, por cenário

Cenário	Rodoviário	Dutoviário	Marítimo	Total*
Base	1.240	2.441	630	4.312
+5%	1.334	2.811	870	5.015
+10%	1.397	2.977	990	5.364
+15%	1.489	3.030	1.080	5.598
+20%	1.587	3.032	1.230	5.850
+25%	1.726	3.101	1.320	6.147
+30%	1.861	3.167	1.440	6.469
+35%	1.956	3.173	1.530	6.659
+40%	2.082	3.215	1.560	6.858

A comparação desses cenários é especialmente importante para identificarmos arcos marítimos e rodoviários de alta vazão, indicando que um possível investimento em transporte dutoviário nessas regiões seria conveniente. Como exemplo, temos os arcos marítimos que tem como destino o Rio de Janeiro e Santos, próximos aos principais polos de consumo do país. O volume transportado nestes arcos aumenta, respectivamente, 233% e 950%, indicando claramente uma carência de um transporte mais barato no cenário de aumento da demanda.

A última sequência de cenários de sensibilidade procura verificar o impacto do tamanho de navio na função objetivo e na utilização dos modais de transporte. A Tabela 14 apresenta o impacto dos cenários propostos. Como era de se esperar, o custo de distribuição cai ao diminuir a capacidade de cada navio, pois ao diminuir o tamanho do navio, este modal fica mais flexível, ou seja, torna-se mais fácil utilizá-lo. Na última linha vemos o custo para a relaxação linear, na qual o número de navios é uma variável real, ou seja, deixou-se de considerar esse número como inteiro (situação limite). É interessante observar que, apesar de maior facilidade de transporte com volumes baixos de navios, a sequência de cenários mostra que o impacto desta variável na função objetivo é pequeno.

Figura 3: Variação dos resultados entre o cenário Base e D+40%

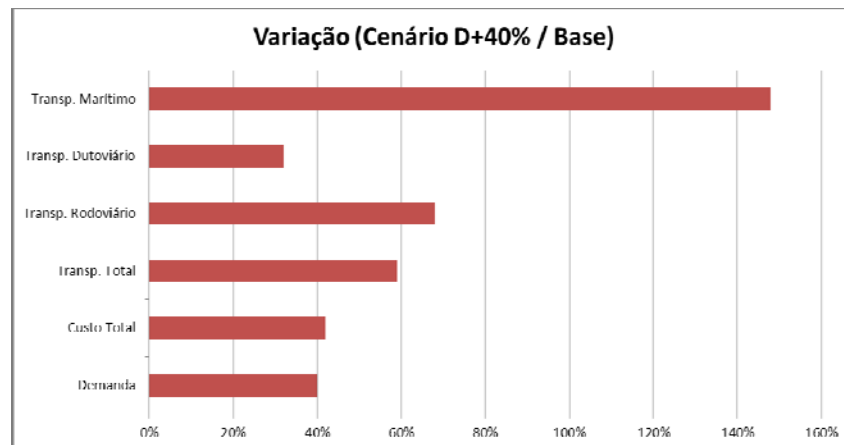


Tabela 14: Custo e Volume para diferentes capacidades de navio

Capacidade (mil m ³)	Quantidade de Navios	Volume Total Transportado (mil m ³)	Custo Total (u.m)
30	21	630	543.471
20	32	640	543.299
15	42	630	543.152
5	130	650	543.148
Solução Relaxação Linear		647,29	543.113

VII - CONCLUSÕES

O tema abordado é importante, pois nos coloca em contato com um dos maiores problemas para o desenvolvimento econômico do Brasil: a infraestrutura e a matriz de transporte, essencialmente rodoviária. Nos resultados obtidos, os arcos rodoviários são extensamente utilizados (74,8% dos arcos) sem que isto signifique um alto volume transportado (28,6%). Em contrapartida, o modal marítimo consegue transportar a metade do volume levado nas rodovias (14,5%) com cerca de doze vezes menos arcos (8 arcos marítimos e 101 rodoviários). Já o modal dutoviário, com apenas 17% dos arcos, consegue transportar 56,3% de todo o volume.

Estes resultados reforçam a necessidade de se diversificar a matriz de transporte do país. O modal rodoviário é caro e tem capacidade limitada, mostrando-se incompatível com as dimensões continentais do nosso território, considerando não apenas o cenário atual, mas possíveis cenários de crescimento da demanda e da produção de derivados no Brasil. É recomendável, apenas, em transportes de pequena distância (caso de distribuição para polos).

Através dos estudos de sensibilidade, percebemos que, com o aumento de capacidade de produção das refinarias, pode-se ter uma diminuição de custo total devido a maior concentração da produção nos locais de alta demanda ou de menor custo, portanto é uma opção interessante investir em aumento de produção em tais locais. A análise relacionada com o aumento da demanda demonstra que o impacto no custo total de atendimento de polos de consumo cresce acentuadamente, pois o transporte é fortemente dependente do modal rodoviário. Por fim, a última análise de sensibilidade, na qual se variava a capacidade do navio para facilitar a utilização deste modal, mostra que o impacto no custo total é baixo.

Como próximos passos deste trabalho, aparecem as possibilidades seguintes:

- 1- Trabalhar com maior detalhe o número de destinos, verificando ainda mais o impacto da utilização de rodovia para distribuição do produto;
- 2- Buscar uma função objetivo multicritério que também leve à minimização, por exemplo, de importação ou de uso do modal rodoviário;
- 3- Diversificar o modelo considerando os demais derivados de petróleo que competem com gasolina nos arcos definidos na rede principalmente diesel e querosene;
- 4- Utilizar a estrutura de dados montada para verificar cenários de indisponibilidade de determinados ativos de produção e transporte, aumento de demanda em locais determinados, alteração dos custos de produção e importação, restrição de fluxo etc.

REFERÊNCIAS

- BANDEIRA, R.A.M.. *Proposta de uma sistemática de análise para a localização de depósito*. Porto Alegre, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- CARMO, B.B.T; NETO, J.F.B; DUTRA, N.G.S. *Análise do impacto nos custos de transporte de um modelo de seleção de fornecedores baseado em variáveis socioambientais e de competitividade*. Produção, v. 21, n. 3, p. 466-483, jul./set. 2011.
- CHAVES, F.S.. *Otimização da operação da rede de gás natural para suprimento das termelétricas por Programação Não-Linear*. Rio de Janeiro, 2010. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- GOLDFARB, D., JIN, Z., *A New Scaling Algorithm for the Minimum Cost Network Flow Problem*, Operations Research Letters, Volume 25, Pág, 205 – 211, 1999.
- FERRIO, J., WASSIK, J., *Chemical Supply Chain Network Optimization*, Computers and Chemical Engineering, Volume 32, Pág. 2481 – 2504, 2008.
- HAMEDI, M., FARAHANI, R. Z., HUSSEINI, M. M., ESMAEILLIAN, G. R., *A Distribution Planning Model for Natural Gas Supply Chain: A Case Study*, Energy Policy, Volume 37, Pág. 799 – 812, 2009.
- PRAÇA, E.R.. *Distribuição de Gás Natural no Brasil: Um enfoque crítico e de minimização de custos*. Fortaleza, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2003.
- ZHU, X., YUAN, Q, GARCIA-DIAZ, A., DONG, L., *Minimal-cost Network Flow Problems with Variable Lower Bounds on Arc Flows*, Computers & Operations Research, Volume 38, Pág. 1210 – 1218, 2011.
- IBGE: dados do Censo de 2000, disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/>, acessado em 02/09/2012.
- DENATRAN: *Dados da Frota Veicular de 2012*. Disponível em <http://www.denatran.gov.br>, acessado em 02/09/2012.