

PAULO TURINO SILVA

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO GAMS NA
PROPOSIÇÃO DE INVESTIMENTOS NA MALHA DUTOVIÁRIA
BRASILEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FRANCISCO BELTRÃO

2018

PAULO TURINO SILVA

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO GAMS NA
PROPOSIÇÃO DE INVESTIMENTOS NA MALHA DUTOVIÁRIA
BRASILEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química do Departamento Acadêmico de Engenharia Química – DAENQ – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Joly

FRANCISCO BELTRÃO, 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Utilização do *software* de otimização GAMS na proposição de investimentos na malha dutoviária brasileira.

Paulo Turino Silva

Trabalho de Conclusão de Curso

Obtenção do título de Engenheiro Químico

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

Engenharia Química

Data: 13 de junho de 2018

Orientador: Prof. Dr. Marcel Joly

Membro da Banca Prof^a. Dr^a. Sheila Regina Oro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Membro da Banca Prof. Me. Wagner da Silveira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“a folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso”

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar nessa jornada e me dar forças em cada dificuldade e desafio encontrados, particularmente na realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, Regina, Luiz Carlos, Lucas e Daniel, por estarem sempre dispostos a se sacrificar por mim e por me ensinarem a lutar para que os desafios encontrados fossem superados, me dando forças, mesmo que à distância.

À minha namorada, Fabiana Lie Tanaka, por se manter ao meu lado, por cada sorriso reconfortante, por cada noite em claro e por cada momento em que sua companhia tornou os desafios mais fáceis.

Ao meu primo, Rafael, por ter percorrido todo esse caminho comigo, pelos momentos de lazer e por cada convite para jogos.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcel Joly, pela paciência com as minhas limitações.

RESUMO

Silva, Paulo Turino. Utilização do *software* de otimização GAMS na proposição de investimentos na malha dutoviária brasileira. 2018. 34p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2018.

Uma das maiores dificuldades da indústria petroquímica atualmente é a logística de transporte de suas matérias primas e produtos, pois estão sempre dependendo do meio de transporte disponível, o qual muitas vezes não consiste no melhor ou mais barato. No Brasil, o transporte de cargas é majoritariamente rodoviário, no entanto, para a indústria petroquímica, este está entre os mais desfavoráveis modais de transporte, visto que, as distâncias das entregas e os volumes transportados por elas se mostram expressivamente maiores que muitas outras indústrias. O transporte dutoviário é um dos mais vantajosos para o transporte de líquidos e gases, devido ao seu baixo índice de acidentes, baixo custo de operação e capacidade de transportar grandes volumes por grandes distâncias. Entretanto, o seu custo inicial se mostra relativamente alto em comparação com os demais modais de transporte. Tendo em vista os fatos apresentados, no presente trabalho propôs-se alguns oleodutos em território brasileiro, a fim de, com o auxílio do *software* de otimização *General Algebraic Modeling System* (GAMS), encontrar quais dutos teriam um maior retorno financeiro ao país, e com isso identificar oportunidades de investimento na malha dutoviária brasileira.

Palavras chave: polidutos, malha dutoviária, GAMS, otimização, modelagem matemática.

ABSTRACT

Silva, Paulo Turino Utilização do *software* de otimização GAMS na proposição de investimentos na malha dutoviária brasileira. 2018. 34p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2018.

One of the biggest difficulties of the petrochemical industry today is the logistics of transporting their raw materials and products, because they are always depending on the means of transport available, often do not consist of the best or the cheapest. In Brazil, the transportation of goods is mostly road, however, for the petrochemical industry, this is among the most unfavorable modes of transport, since, the distances of deliveries and the volumes transported by them are significantly larger than many other industries. The pipeline transport is one of the most advantageous for the transport of gases and liquids, with a lower accident rate, a lower operating cost, and the ability to transport large volumes over long distances. However, its price is relatively high compared to other modes of transport. In the view of the facts presented, in the present work it was proposed the construction of some oil pipelines in Brazilian territory, with the aid of the optimization software General Algebraic Modeling System (GAMS), find which pipelines would have a greater financial return to the country, and identify opportunities of investment in Brazilian pipeline network.

Keywords: pipeline, pipeline network, GAMS, optimization,

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores praticados por transportadora de derivados de petróleo	22
Tabela 2 - Dutos propostos e suas respectivas extensões	24
Tabela 3 - Oferta do produto "p" no estado "e" (m ³ /ano).....	25
Tabela 4 - Demanda do produto "p" no estado "e" (m ³ /ano)	25
Tabela 5 - Custo de produção aproximado do produto "p" no estado "e" (R\$/m ³)	25
Tabela 6 - Preço médio de venda do produto "p" no no estado "e" (R\$/m ³)	25
Tabela 7 - Custo do transporte dutoviário para cada duto proposto (R\$/m ³)	25
Tabela 8 - Custo de construção de cada duto proposto dividido por 25, (R\$/ano) ...	26
Tabela 9 - Economia gerada por cada duto proposto (R\$/m ³)	26
Tabela 10 - Custo de construção total de cada duto.....	26
Tabela 11 - Resposta de valores para a variável "q", volume ótimo a ser transportado pelos dutos propostos	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 PROBLEMA	11
3 JUSTIFICATIVA	13
4 OBJETIVOS	14
4.1 OBJETIVO GERAL	14
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
6.1 <i>GENERAL ALGEBRAIC MODELING SYSTEM (GAMS)</i>	17
6.2 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	19
6.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR MISTA-INTEIRA (MILP)	20
6.3.1 ASPECTO COMBINATÓRIO EM MILP	20
6.3.2 ALGORITMOS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS MILP	20
6.3.3 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS AUXILIARES EM MILP	21
7 METODOLOGIA	22
7.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	22
7.2 SELEÇÃO DOS DUTOS	23
7.4 ÍNDICES DO MODELO	24
7.4 PARÂMETROS DO MODELO	25
7.5 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	27
7.6 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	28
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
9 CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A indústria petroquímica é uma das indústrias químicas mais complexas, pois envolve um grande número de processos extremamente complicados, além de possuir uma extensa gama de questões logísticas relacionadas à gestão da cadeia de suprimentos, como por exemplo o transporte dos derivados (JOLY, 2012; CAFARO, 2011), visto que o volume de matérias-primas e produtos movidos diariamente alcançam a casa dos milhões de barris, fazendo desse processo um dos maiores influenciadores no preço final dos derivados de petróleo (SOUZA, 2013).

Devido à essa complexidade, tem-se a necessidade da utilização da Pesquisa Operacional a fim de tornar possível que a indústria de petróleo atue na sua condição ótima, ou próxima dela, e desenvolva seu potencial ao máximo (MENEZES et al., 2014; JOLY, 2012), tendo em vista objetivos técnico/econômicos, tais como a diminuição dos custos de operação e manutenção e o aumento da produtividade (JOLY et al., 2013), visto que a tendência é de que a demanda por petróleo no Brasil aumente cada vez mais (MENEZES et al., 2014). Neste cenário, é fácil enxergar a necessidade cada vez maior do uso de ferramentas de automação industrial que facilitem a tomada de decisões (JOLY, 2012).

O aumento da complexidade dos desafios impostos às indústrias petroquímicas brasileiras é uma realidade inegável. Isso deve-se, por exemplo, aos novos regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos, à necessidade crescente do processamento de matéria-prima de baixa qualidade e até mesmo à implantação de novas tecnologias que facilitem, ou tornem possível, a melhoria da qualidade do produto ou o aprimoramento dos cortes mais pesados do processo. Sendo assim, tais indústrias têm de estar preparadas para lidar com desafios multidisciplinares se desejam manter sua competitividade com o mercado internacional (JOLY, 2012).

O planejamento e a programação das operações em dutos é, sem dúvida, uma questão primordial para garantir a rentabilidade e a confiabilidade logística da cadeia de suprimento da indústria de petróleo no Brasil. Como agravante, temos que o mercado brasileiro de derivados de petróleo tem se orientado pela demanda e não pela oferta, ou seja, a produção das refinarias e o transporte rumo ao consumidor é guiado pela necessidade de mercado (JOLY et al., 2013), o que faz com que atrasos causem impactos negativos maiores ainda.

Da refinaria, os derivados do petróleo seguem em direção ao mercado consumidor conforme o melhor modal de transporte, sendo o primeiro destino as distribuidoras. A logística ligada a esta operação é um fator de extrema importância, pois além do custo ser bastante considerável, faz-se necessário levar em conta o meio de transporte mais seguro (CARDOSO, 2005), levando em conta que tais produtos podem ser transportados através dos modais rodoviário, hidroviário, ferroviário ou dutoviário (BOSCHETTO, 2008).

No Brasil, o modal rodoviário é preponderante, mesmo sendo o menos econômico e seguro quando comparado com os outros disponíveis. Os transportes ferroviário e hidroviário seriam extremamente vantajosos, visto que têm a capacidade de transportar grandes quantidades de carga em uma única operação, porém a malha ferroviária brasileira é extremamente escassa e na maior parte se encontra em condições precárias. Já o modal hidroviário é grandemente utilizado pela indústria petroquímica brasileira, porém o número de navios e os congestionamentos portuários, devidos a investimentos insuficientes, limitam a flexibilidade logística da área (BOHRER & OBREGÓN, 2016; CARDOSO, 2005). O transporte dutoviário, apesar de seu alto custo de instalação, possui inúmeras vantagens em relação aos citados anteriormente, pois os índices de acidentes, a perda de produto, os impactos ambientais e o custo de operação e manutenção se mostram expressivamente menores (PESSANHA, SILVA e SILVEIRA, 2015; SOUZA, 2013; COELHO, 2012), diminuindo também as chances de atraso no transporte. Tendo em vista que no Brasil o modal mais utilizado atualmente é o rodoviário, pode-se acrescentar à lista de vantagens do uso de oleodutos a diminuição do tráfego de caminhões nas rodovias, o que conseqüentemente traria um aumento da segurança nas estradas e vias urbanas (CARDOSO, 2005).

Em 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), definiu que qualquer atividade modificadora do meio ambiente traz consigo a necessidade de elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). A construção de oleodutos se encaixa em tais atividades modificadoras, logo, ao se pensar na construção os mesmos, não se pode esquecer dos requisitos ambientais (CALDAS e AMARAL, 2006).

De acordo com o CONAMA, o EIA deve conter atividades técnicas das medidas mitigadoras dos impactos negativos e a elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento.

O presente trabalho vem de encontro à necessidade de investigar e desenvolver estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos orientados à expansão da malha dutoviária brasileira com vistas a revisar o paradigma de transporte de petróleo e derivados no Brasil. Para isso, tomaremos por base diversos aspectos pensados serem importantes, tais como o custo de construção dos dutos, a demanda de cada região que não seja atendida por um duto, os custos de transporte dos derivados através do modal rodoviário e dutoviário, as taxas de operação dos dutos já existentes e a produção de cada refinaria, a fim de diminuir os gastos com transporte e assim aumentar os lucros da empresa.

2 PROBLEMA

A cadeia de suprimentos da indústria do petróleo brasileira movimentava bilhões de dólares todos os anos (ANP, 2016). Um dos fatores que possui grande influência na rentabilidade destas operações é o modal utilizado no transporte do petróleo e de seus derivados, visto que o custo envolvido é grande influenciador da margem de lucros (CARDOSO, 2005).

A malha dutoviária brasileira é bastante reduzida quando comparada a de outros países como Estados Unidos (EUA), França, Espanha, entre outros (FIGUEIREDO, 2006). Nos EUA, quase todo o transporte de gasolina é feito através de dutos (CAFARO, 2011). De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2016), a malha de dutos do Brasil possuía em 2013 uma extensão de 11 mil km, enquanto os EUA no mesmo ano controlava 153 mil km de dutos. Devido a essa enorme diferença o custo do transporte de petróleo e derivados nos EUA tem um custo cerca de 36% menor que o do Brasil (ILOS, 2013). A figura 1, mostra uma comparação entre a malha dutoviária do Brasil em relação à dos Estados Unidos.

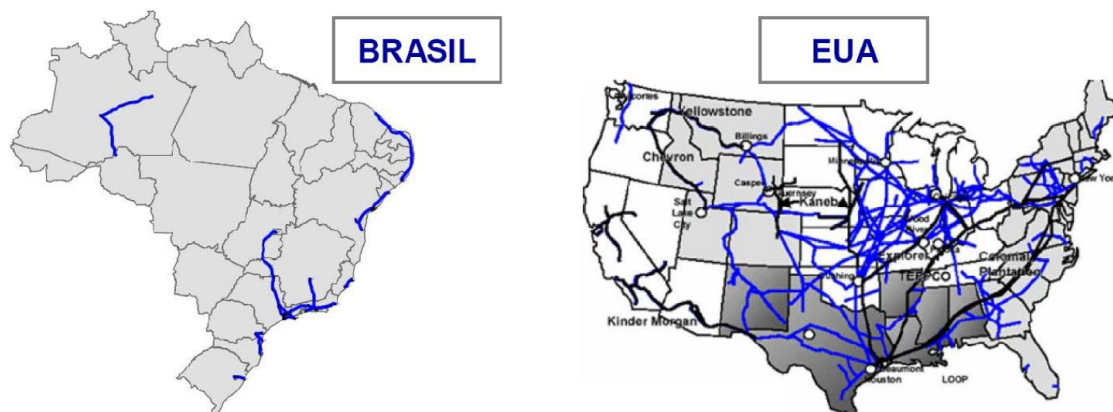


Figura 1 - Comparação entre a malha dutoviária brasileira e a malha dutoviária dos Estados Unidos.
Fonte: (PEREIRA, 2013)

Considerando-se a enorme extensão territorial do Brasil, um país de dimensões continentais, torna-se fácil concluir que o transporte rodoviário é o mais dispendioso e menos seguro dentre os citados anteriormente (CARDOSO, 2005).

O transporte por dutos representa apenas 3,6% do transporte de cargas no Brasil (PEREIRA et al., 2013). Como pode-se observar na figura 2, as refinarias e oleodutos brasileiros se concentram na região costeira do país, principalmente na região sudeste, onde a demanda por derivados de petróleo é maior. No entanto, as demandas na região centro-oeste e nordeste também são relativamente expressivas

com cerca de 7,5% e 20,3% do consumo de derivados de petróleo do país, que é de grande extensão territorial, o que faz com que essas regiões afastadas de refinarias sejam alcançadas apenas através das rodovias (ANP, 2016).

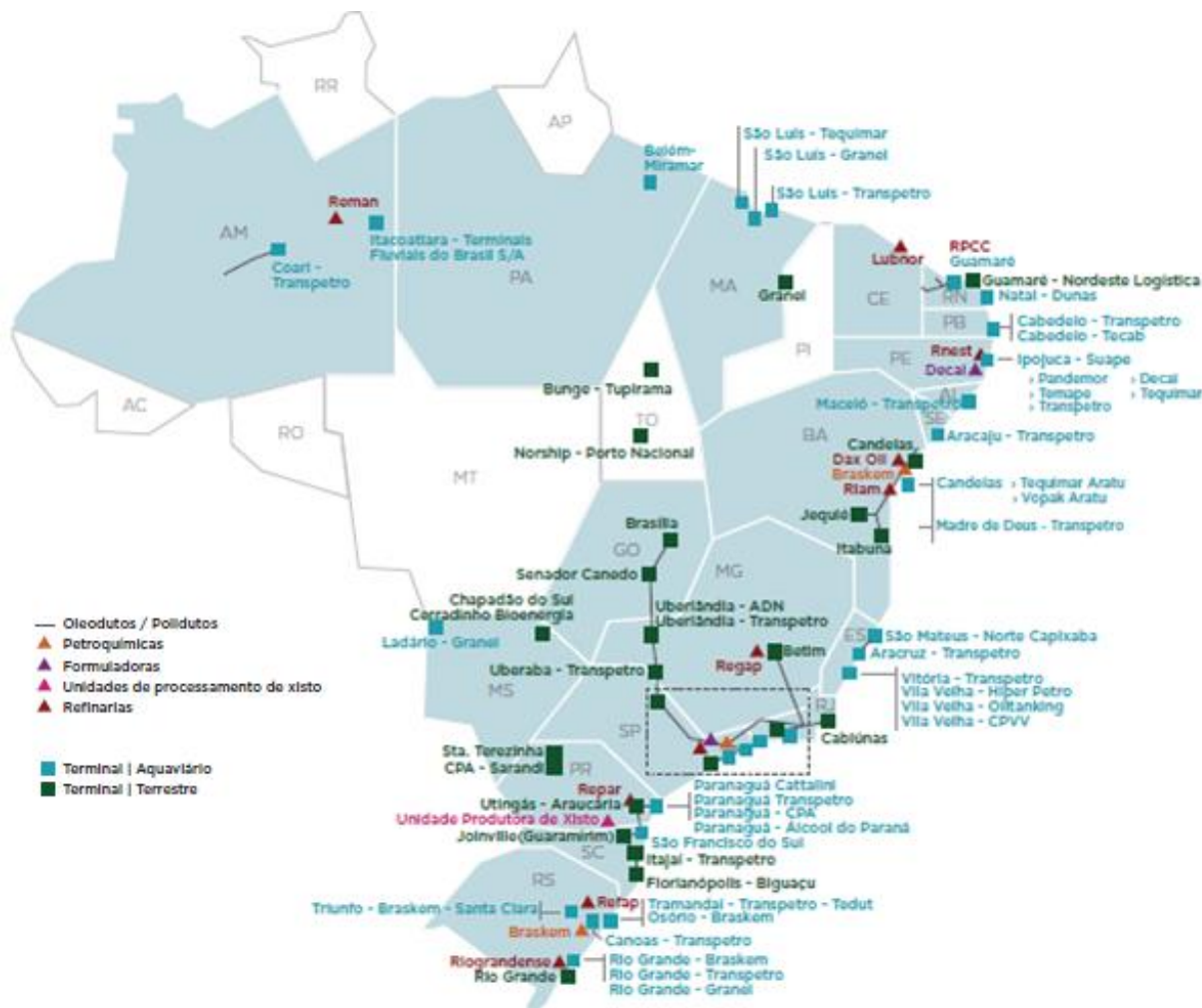


Figura 2 - Infraestrutura de produção e movimentação de petróleo e derivados.
Fonte: (ANP, 2016).

A escassez de polidutos no território brasileiro dificulta a chegada dos derivados do petróleo ao consumidor, sendo assim, os preços dos mesmos se tornam ainda maiores, considerando-se a distância a ser percorrida do produtor até o consumidor, pode-se dizer que a construção de novos dutos se faz cada vez mais necessária.

Logo, faz-se necessário otimizar a operação da cadeia de suprimentos no Brasil através da proposição de novos oleodutos, considerando-se que existe um orçamento limitado para realizar estes investimentos.

3 JUSTIFICATIVA

O custo do transporte rodoviário chega a ser 8 vezes maior que o do transporte dutoviário (OWEN, 1964), têm-se que o custo do transporte rodoviário é de aproximadamente R\$0,14 por metro cúbico de derivado de petróleo para cada quilômetro percorrido.

Sabendo que a produção de derivados de petróleo no Brasil é de 366 mil metros cúbicos por dia (ANP, 2016), é possível multiplicar os valores apresentados e obter uma estimativa do preço do transporte de derivados de petróleo no Brasil por quilômetro rodado, assumindo que todo o transporte brasileiro fosse feito através de caminhões tem-se a equação 1.

$$\frac{R\$0,14}{m^3 * km} * 366000 \frac{m^3}{dia} = \frac{R\$51000}{dia * km} \quad (1)$$

Tomando o comprimento de algumas rotas conhecidas de entrega de derivados de petróleo e fazendo uma média encontra-se o valor de 520km, assumiu-se então que tal média representa todas as rotas brasileiras, multiplicando esse valor pelo último apresentado encontra-se o preço diário pago no transporte tem-se a equação 2.

$$\frac{R\$51000}{dia * km} * 520km = \frac{R\$26750000}{dia} \quad (2)$$

Então, tem-se que o custo anual de transporte de derivados de petróleo, assumindo que todo este seja feito através do modal rodoviário, seria de R\$9,76 bilhões. Como dito anteriormente o transporte dutoviário chega a ser 8 vezes mais econômico que o rodoviário, então através de uma divisão simples e depois uma subtração encontra-se uma estimativa do valor que o Brasil economizaria se substituísse todo o transporte rodoviário por dutoviário, encontrando o valor de 8,54 bilhões de reais por ano.

Com os dados apresentados, pode-se ter a certeza de que a substituição do transporte rodoviário por dutoviário é extremamente benéfico, tanto para a economia brasileira, quanto para a segurança das rodovias do país devido à diminuição do número de caminhões tanque encontrados nas mesmas.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Identificar oportunidades de investimento e otimização da malha dutoviária brasileira.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Conhecer o cenário atual do Brasil, em termos de infraestrutura dutoviária.
- 2) Desenvolver a modelagem do problema real.
- 3) Implementar na plataforma de otimização GAMS (*General Algebraic Modeling System*).
- 4) Encontrar alguns bons investimentos a serem feitos na malha dutoviária brasileira.

5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Tendo em vista a complexidade da logística de transporte de derivados de petróleo de um país com as proporções brasileiras, algumas hipóteses simplificativas serão adotadas no presente estudo.

De acordo com o Anuário Estatístico da ANP (2017), dentre os vários produtos possíveis de serem obtidos a partir do refino do petróleo, os com maior influência no mercado brasileiro são o diesel e a gasolina, como pode se observar na figura 3, sendo assim, serão utilizados para a modelagem do problema, apenas os dados referentes a esses dois produtos.

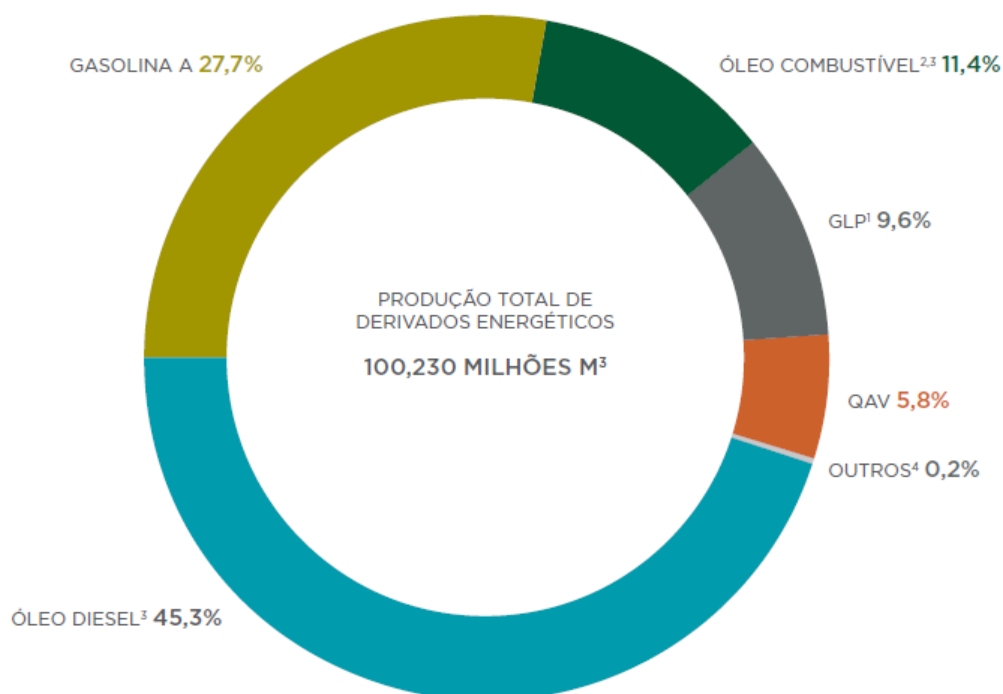


Figura 3 - Distribuição percentual da produção de derivados energéticos de petróleo – 2016

Fonte: Anuário Estatístico ANP 2017

O custo de construção de um duto varia com o produto que se pretende transportar em seu interior, com a topografia do trajeto e com seu diâmetro, no entanto pode-se aproximar esse investimento a 1,8 milhão de reais para cada quilômetro de duto (VAZ et al., 2005).

Para aproximação dos custos de transporte tanto rodoviário, quanto dutoviário, será usada uma média entre valores fornecidos por uma transportadora de derivados de petróleo, sem distinção de distância do trajeto, produto a ser transportado ou volume do transporte, visto que inúmeras empresas dificultam o acesso a tais informações.

Uma outra simplificação a ser adotada no trabalho será em questão do comprimento dos oleodutos propostos, os pontos de origem e de destino de cada um serão as capitais dos estados brasileiros envolvidos, ou seja, um duto que vá do estado de São Paulo para o Mato Grosso, será calculado como tendo início na cidade de São Paulo e terminando em Cuiabá.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 GENERAL ALGEBRAIC MODELING SYSTEM (GAMS)

O presente trabalho será fundamentado no desenvolvimento de um modelo matemático baseado em técnicas de programação matemática. Tal modelo será implementado no sistema de modelagem algébrica GAMS, o qual servirá como suporte para determinar a solução ótima do modelo.

O GAMS é utilizado para a solução de problemas complexos, envolvendo programação linear, não linear e inteira. Essa ferramenta possui uma interface que interage com diversos pacotes de otimização, tais como: CPLEX, MINOS, XPRESS, entre outros. O *software* utiliza-se de uma linguagem de alto nível com a finalidade de proporcionar uma representação compacta de modelos grandes e complexos, desse modo a construção e a resolução se torna mais direta para os programadores, e mais inteligível para usuários de outras disciplinas (BROOKE et al., 1997)

É possível então, que as descrições do modelo sejam independentes dos algoritmos de solução, o que possibilita também que sejam feitas mudanças nas especificações do modelo de maneira bastante simples (BROOKE et al., 1997). As vantagens apresentadas fazem com que o GAMS tenha o poder de aumentar a produtividade dos modelistas e de expandir as aplicações da programação matemática para outras áreas do conhecimento (BARON, 2017).

Segundo Lima & Silva (2016), existem vários *softwares* com capacidade de aplicação na Pesquisa Operacional atualmente, tais como:

- MPL (*Mathematical Programming Language*) que, apesar de possuir robustez e flexibilidade da linguagem de modelagem, quando aplicado a grandes modelos de otimização, requer uma linguagem com recursos altamente avançados, visto que é necessário gerar uma matriz que o solver possa tratar;
- ProLin (Programação Linear), o qual foi implementado na linguagem de programação FORTRAN o que o torna extremamente eficiente, no entanto, possui uma rígida interface para entrada de dados, o que limita o seu uso por usuários principiantes.
- GAMS, o qual apresenta uma grande facilidade na modelagem de problemas complexos, utiliza *solvers* comerciais robustos e consolidados, além de

possuir uma grande comunidade usuária, o que facilita na obtenção de informações, porém os códigos dos *solvers* não são abertos aos usuários.

O quadro 1 faz uma comparação entre alguns dos principais softwares com respeito às suas funcionalidades, levando em conta suas características de modelagem e suas interfaces com o usuário e outros sistemas (FERREIRA FILHO; IGNÁCIO, 2004).

Quadro 1 - comparação entre os principais sistemas de modelagem.

	AIMMS	GAMS	OPL Studio	Xpress Mosel	AMPL	MPL	Lingo
Facilidade da linguagem							
Programação matemática	x	x	x	x	x	x	x
Controle de fluxo	x	x	x	x	x		x
Procedimentos	x			x	x		
Gerência de casos	x	x					
Horizonte de tempo	x						
Interface de desenvolvimento							
Ferramentas de diagnóstico	x	x			x		
Tipos de solver							
LP/MIP (<i>linear programming/mixed integer programming</i>)	x	x	x	x	x	x	x
QP (<i>Quadratic program</i>)	x	x		x	x	x	x
NLP (<i>nonlinear programming</i>)	x	x		x	x	x	x
MINLP (<i>mixed nonlinear program</i>)	x	x		x	x	x	x
MCP (<i>mixed complementarity programming</i>)	x	x			x		
CP (<i>constraint programming</i>)			x				
Global		x					x
Conectividade							
ODBC/OLE DB	x		x	x	x	x	
XML	x					x	
Funções externas	x	x			x		
Desenvolvimento							
Unix/Linux		x	x	x	x	x	x

Fonte: (FERREIRA FILHO; IGNÁCIO, 2004)

Através de uma rápida análise do quadro 1, pode-se dizer que o AIMMS e o GAMS são os mais completos dentre os *softwares* estudados.

6.2 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Programação matemática é o uso de técnicas e algoritmos a fim de resolver problemas de otimização, portanto, se trata de uma ferramenta de grande valor em processos de tomada de decisão, e é caracterizada por um conjunto de relações matemáticas representando um problema real (JOLY, 2017). Encontra-se, numa programação matemática, um conjunto de variáveis de decisões, um conjunto de restrições e uma função objetivo (JOLY, 2017).

O presente trabalho será fundamentado na resolução de um problema de otimização, os quais, de acordo com Joly (1999) os problemas de programação que poderão ser usados neste trabalho podem ser classificados de acordo com a linearidade e o conjunto de variáveis inteiras da seguinte forma:

- Problema de programação linear (LP): as restrições e a função objetivo são lineares, e o conjunto de variáveis inteiras é vazio.
- Problema de programação não-linear (NLP): a função objetivo e/ou uma ou mais restrições apresenta não-linearidade, e o conjunto de variáveis inteiras é vazio.
- Problema de programação linear mista-inteira (MILP): as restrições e a função objetivo são lineares, e o conjunto de variáveis inteiras é não-vazio.
- Problema de programação não-linear mista-inteira (MINLP): a função objetivo e/ou uma ou mais restrições apresenta não-linearidade, e o conjunto de variáveis inteiras é não-vazio.

A formulação de um “bom modelo” é o primeiro passo para a resolução de um dado problema, ou seja, a formulação de um modelo inadequado levará a resultados distantes do ótimo ou até mesmo fazer com que seja impossível encontrar a solução do problema (NEMHAUSER & WOLSEY, 1988; GROSSMANN, QUESADA, RAMAN, & VOUDOURIS, 1992; FLOUDAS, 1995)

De modo geral, um modelo de programação MILP deve possuir uma solução contínua com o mínimo de relaxamento possível, uma estrutura linear e o menor número de não-convexidades possíveis.

6.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR MISTA-INTEIRA (MILP)

6.3.1 ASPECTO COMBINATÓRIO EM MILP

A maior dificuldade para a solução de problemas MILP se dá devido à natureza combinatória dos modelos (GROSSMANN et al., 1992; FLOUDAS, 1995; REKLAITIS, 1992; ELKAMEL et al., 1993), caracterizada pelo domínio das variáveis y , as quais podem adotar o valor 0 ou 1, representando respostas de sim ou não aos subproblemas. Logo, pode-se perceber que em problemas práticos, devido ao elevado número de variáveis, o exame de todas as combinações pode gerar a necessidade da utilização de recursos computacionais ou fazer com que a determinação da solução ótima seja inviável, já que para cada combinação de variáveis binárias existe um problema LP que precisa ser resolvido de maneira ótima (JOLY, 1999).

Devido a estas dificuldades intrínsecas aos problemas MILP, vários algoritmos têm sido propostos para facilitar suas soluções, vale ressaltar que normalmente são usadas variantes de tais algoritmos ou até uma combinação entre os mesmos (VAN ROY & WOLSEY, 1987; SHERALI & ADAMS, 1989).

6.3.2 ALGORITMOS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS MILP

Segundo Grossmann et al. (1992) os algoritmos mais empregados na solução de problemas MILP são:

- Métodos de planos cortantes (*Cutting plane methods*), onde novas restrições, chamadas de cortes, são criadas e adicionadas à região viável reduzindo-a até que a solução binária ótima seja encontrada.
- Métodos de decomposição (*Decomposition methods*), onde a estrutura matemática do modelo é explorada a partir do método de partição de variáveis, dualidade e relaxação (NEMHAUSER & WOLSEY, 1988).
- Métodos baseados em lógica (*Logic-based methods*), onde restrições disjuntivas ou técnicas de dedução são empregadas, e são expressas através de variáveis booleanas.
- Métodos de ramificação e limite (*Branch and Bound methods - BB*). O método BB original sofreu diversas modificações ao longo dos anos, e atualmente é

largamente empregado em *softwares* comerciais visando a solução de problemas de programação linear mista-inteira.

Segundo Joly (1999), os algoritmos descritos anteriormente, têm por objetivo executar apenas uma parte das alternativas, evitando examinar todas as combinações entre as variáveis binárias.

6.3.3 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS AUXILIARES EM MILP

A utilização de algoritmos genéricos tem a vantagem da robustez, já que podem ser aplicados para qualquer MILP. No entanto, em alguns casos a solução pode não ser satisfatória devido ao tamanho da formulação, ou devido à fragilidade do método ao determinar-se os limites das variáveis, ou até mesmo devido à velocidade do algoritmo (NEMHAUSER & WOLSEY, 1988).

Pode-se dizer então que a solução ótima de algumas classes de problemas MILP pode exigir um tempo de simulação computacional alto demais o que torna a solução inviável.

A fim de minimizar tais problemas foram formuladas algumas técnicas, como por exemplo as técnicas de pré-processamento, as quais consistem no refinamento dos limites das variáveis e na fixação de seus valores, simplificando a formulação do modelo (NEMHAUSER & WOLSEY, 1988).

Elkamel et al. (1993) sugerem fazer-se uma decomposição do modelo original em subproblemas a serem resolvidos de maneira ótima, tornando o processo mais simples. Então as soluções encontradas são juntas de maneira pré-especificada, obtendo uma solução muito aproximada para o modelo original.

7 METODOLOGIA

7.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

O problema modelado e solucionado no presente trabalho, tomou por base o problema da mochila (*knapsack problem*). Neste clássico problema de Pesquisa Operacional tem-se uma lista de itens com seus devidos pesos e valores, e uma mochila com um limite de peso, o intuito é encontrar a combinação de itens que fará com que o conteúdo da mochila tenha o maior valor possível. Entretanto, adequando-se à realidade do trabalho, foi proposta a construção de alguns oleodutos no território brasileiro, cada um desses dutos com seu custo de construção, tendo em vista que a soma desses custos de construção se mantenha abaixo de um limite de capital disponível para investimento, logo, o *software* auxiliará a encontrar uma combinação de oleodutos que trará maior benefício ao país sem extrapolar a receita disponível.

Para que o *software* pudesse avaliar o dito maior benefício, foram necessários também os valores de oferta, demanda, custo de produção e preço de venda de diesel e gasolina em cada estado envolvido na pesquisa, além do custo de manutenção e operação do transporte dutoviário e da economia gerada para o país para cada rota de entrega rodoviária que seria substituída pelo respectivo poliduto.

Os valores praticados pelas distribuidoras de derivados de petróleo foram fornecidos pelo proprietário de uma dessas empresas, os dados fornecidos estão apresentados na tabela (1)

Tabela 1 - Valores praticados por transportadora de derivados de petróleo

Rota	Distância (km)	Preço (R\$/m³)
Araucária (PR) – Cascavel (PR)	512	72,00
Araucária (PR) – Guarapuava (PR)	250	44,00
Araucária (PR) – Itajaí (PR)	228	33,70
Araucária (PR) – Londrina (PR)	420	54,50
Araucária (PR) – Maringá (PR)	425	57,65
Araucária (PR) – São José do Rio Preto (SP)	686	80,84
Araucária (PR) – Ourinhos (SP)	403	54,50

Então foi feita uma divisão do preço pela distância de cada rota apresentada na tabela (1) a fim de se obter um preço que varie tanto com o volume da carga, quanto com a distância do frete. Por fim fez-se uma média dos valores encontrados,

assumindo-se então que o preço do transporte de derivados de petróleo no Brasil é de cerca de R\$0,14 para cada m³ de derivado e para cada quilômetro de distância.

Os valores de oferta, demanda e preço de venda dos derivados de petróleo nos estados envolvidos no trabalho, foram obtidos no Anuário Estatístico da ANP (2017).

Os custos de produção da gasolina e do diesel foram calculados com base nos dados fornecidos no site da Petrobras, dados que dizem que 56% do preço que o diesel chega ao consumidor, se trata do custo de produção, enquanto que para a gasolina essa parcela é de 34%.

De acordo com Owen (1964) o custo de operação e manutenção de um duto, é aproximadamente oito vezes menor do que o custo do transporte rodoviário, sendo assim, calculou-se o custo do transporte rodoviário de cada rota que seria substituída por um duto e fez-se a subtração. Logo, a economia gerada por cada duto, foi simplesmente a diferença entre os dois custos.

7.2 SELEÇÃO DOS DUTOS

A região mais distante das refinarias existentes no Brasil é a região centro-oeste, visto que as mesmas foram construídas em sua maioria na região costeira do país, com exceção de uma localizada em Manaus, no estado do Amazonas (ANP, 2017). Sabendo que o consumo de derivados de petróleo na região centro-oeste é expressivo diante da demanda brasileira (ANP, 2017), os destinos de alguns polidutos propostos no trabalho teriam de ser os estados do Mato Grosso do Sul e do Mato Grosso.

Sabe-se da existência de um gasoduto que alimenta as capitais nordestinas (FREITAS, 2004), porém, a distribuição de derivados líquidos de petróleo na região não possui o suporte de um oleoduto, sendo assim, foram propostos dutos com destino a esses estados.

Segundo Figueiredo (2006), no Brasil, as rotas de entrega de longa distância, na logística de abastecimento de derivados de petróleo, se concentram na região centro oeste e na região norte, principalmente nas redondezas do estado de Tocantins. Devido a esse fato, Tocantins também foi definido como um estado qualificado para ser destino de oleodutos.

Pensando nas refinarias existentes no Brasil, definiu-se que apenas os estados detentores de refinaria poderiam ter o início de um poliduto.

Levando em conta os fatos apresentados anteriormente, foram propostos os dutos a serem avaliados pelo *software*, os quais estão apresentados na tabela 2 com suas respectivas extensões.

Tabela 2 - Dutos propostos e suas respectivas extensões

Duto	Extensão (km)
SP – MS	1014
SP – MT	1614
MS – MT	694
PR – MS	991
BA – TO	1454
PE – PI	1137
PE – PB	120
PI – TO	1401
PB – RN	185
RN – CE	537

Os oleodutos propostos que se iniciam em estados que não possuem refinaria, são propostos devido à possibilidade de construir-se uma extensão do duto anterior.

7.4 ÍNDICES DO MODELO

No início da modelagem definiu-se os índices aos quais os parâmetros e as variáveis seriam relacionados. Portanto foram definidos os índices:

- “p” – diferenciando os produtos a serem transportados, sendo eles diesel e gasolina;
- “e” – diferenciando os estados do Brasil envolvidos, sendo eles São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS), Mato Grosso (MT), Paraná (PR), Bahia (BA), Tocantins (TO), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN) e Ceará (CE);
- “ee” – diferenciando os mesmos estados do Brasil, porém foi usado apenas na necessidade de diferenciar dois estados num mesmo parâmetro, equação ou variável.

Tabela 8 - Custo de construção de cada duto proposto dividido por 25 anos, (R\$/ano)

	<i>MS</i>	<i>MT</i>	<i>TO</i>	<i>PI</i>	<i>PB</i>	<i>RN</i>	<i>CE</i>
<i>SP</i>	7,3E+07	1,2E+08	-	-	-	-	-
<i>MS</i>	-	5,0E+07	-	-	-	-	-
<i>PR</i>	7,14E+07	-	-	-	-	-	-
<i>BA</i>	-	-	1,05E+08	-	-	-	-
<i>PE</i>	-	-	-	8,2 E+07	8,64E+06	-	-
<i>PI</i>	-	-	1,01E+08	-	-	-	-
<i>PB</i>	-	-	-	-	-	1,33E+07	-
<i>RN</i>	-	-	-	-	-	-	3,9E+07

Tabela 9 - Economia gerada por cada duto proposto (R\$/m3)

	<i>MS</i>	<i>MT</i>	<i>TO</i>	<i>PI</i>	<i>PB</i>	<i>RN</i>	<i>CE</i>
<i>SP</i>	96,629	153,806	-	-	-	-	-
<i>MS</i>	-	66,134	-	-	-	-	-
<i>PR</i>	94,437	-	-	-	-	-	-
<i>BA</i>	-	-	138,559	-	-	-	-
<i>PE</i>	-	-	-	108,350	11,435	-	-
<i>PI</i>	-	-	133,508	-	-	-	-
<i>PB</i>	-	-	-	-	-	17,629	-
<i>RN</i>	-	-	-	-	-	-	51,173

Tabela 10 - Custo de construção total de cada duto (R\$)

	<i>MS</i>	<i>MT</i>	<i>TO</i>	<i>PI</i>	<i>PB</i>	<i>RN</i>	<i>CE</i>
<i>SP</i>	1,83E+09	2,91E+09	-	-	-	-	-
<i>MS</i>	-	1,25E+09	-	-	-	-	-
<i>PR</i>	1,78E+09	-	-	-	-	-	-
<i>BA</i>	-	-	2,62E+09	-	-	-	-
<i>PE</i>	-	-	-	2,05E+09	2,16E+08	-	-
<i>PI</i>	-	-	2,52E+09	-	-	-	-
<i>PB</i>	-	-	-	-	-	3,33E+08	-
<i>RN</i>	-	-	-	-	-	-	9,67E+08

Então os parâmetros foram nomeados como:

- produção(p,e) – determinando a oferta do produto “p” no estado “e”;

- $demanda(p,e)$ – determinando a demanda de produto “p” no estado “e”;
- $custo(p,e)$ – determinando o custo de produção do produto “p” no estado “e”;
- $preco(p,e)$ – determinando o preço de venda do produto “p” no estado “e”;
- $trans(e,ee)$ – determinando o custo do transporte dutoviário do estado “e” para o estado “ee”;
- $custo_duto(e,ee)$ – determinando o custo de construção total de cada duto;
- $custo_duto_25(e,ee)$ – determinando o custo de construção de cada duto dividido por 25 anos, período de tempo utilizado para o cálculo do retorno financeiro;
- $economia(e,ee)$ – determinando a economia gerada se o duto for construído.

Segundo Ramalho (2015), estão previstos investimentos de cerca de 8 bilhões de reais para a construção de oleodutos no Brasil até 2020, logo, foi definido como disponibilidade de investimento, exatamente esse valor. O parâmetro foi denominado como disponibilidade de investimento (DI).

7.5 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

As variáveis utilizadas na modelagem matemática do problema, foram definidas da seguinte maneira:

- $q(p,e,ee)$ – uma variável positiva que indica a quantidade de produto “p” que deve ser destinada do estado “e” para o estado “ee”;
- $x(p,e,ee)$ – uma variável binária que quando assume o valor 1 significa que o produto “p” será destinado do estado “e” para o estado “ee”, quando assume o valor 0 significa que não haverá tal transporte;
- $y(e,ee)$ – uma variável binária que quando assume o valor 1 significa que o duto que vai do estado “e” para o estado “ee” deve ser construído, quando assume o valor 0 significa que o duto não deve ser construído.
- Z – variável resposta da função objetivo, a qual significa o retorno financeiro gerado pela construção dos dutos selecionados, pelo software, como ótimos a serem criados

7.6 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Depois da definição do problema, dos índices, dos parâmetros de entrada e das variáveis do modelo, definiu-se as equações que trariam as restrições e a função objetivo.

A equação 3 foi formulada para que definisse a restrição de que o fluxo de produto “p” destinado do estado “e” para o estado “ee” seja maior que zero somente se “ee” deve ser atendido por “e”:

$$q(p, e, ee) \leq x(p, e, ee) * demanda(p, e) \quad (3)$$

A equação 4 foi formulada de modo que definisse que um estado “e” produtor do produto “p” não pode enviar mais produto do que tem para ofertar:

$$q(p, e, ee) \leq producao(p, e) \quad (4)$$

Formulou-se a equação 5 definindo que cada estado definido como destino de um duto, não pode receber mais produto do que demanda:

$$q(p, e, ee) \leq demanda(p, e) \quad (5)$$

Então a equação 6 foi criada como uma restrição auxiliar indicando a necessidade ou não de construção do duto, para que os resultados ficassem mais simples de serem interpretados.

$$y(e, ee) \geq x(p, e, ee) \quad (6)$$

Com a equação 7 definiu-se que a soma dos custos de construção dos dutos não poderia ultrapassar o investimento disponível, logo:

$$\sum_e \sum_{ee} y(e, ee) * custo_duto(e, ee) \leq DI \quad (7)$$

Por fim definiu-se a função objetivo (equação 8), na qual foi feita uma extrapolação admitindo-se que a inflação aumentará o custo de todos os fatores envolvidos em 5% ao ano, e tomou-se por base um período de 25 anos, para o cálculo do retorno financeiro:

$$\begin{aligned}
z = & \sum_p \sum_e \sum_{ee} (q(p,e,ee) * (\text{preco}(p,ee) - \text{custo}(p,e) - \text{trans}(e,ee) + \text{economia}(e,ee))) * \\
& (1 + 1,05 + 1,05^2 + 1,05^3 + 1,05^4 + 1,05^5 + 1,05^6 + 1,05^7 + 1,05^8 + 1,05^9 + \\
& 1,05^{10} + 1,05^{11} + 1,05^{12} + 1,05^{13} + 1,05^{14} + 1,05^{15} + 1,05^{16} + 1,05^{17} + \\
& 1,05^{18} + 1,05^{19} + 1,05^{20} + 1,05^{21} + 1,05^{22} + 1,05^{23} + 1,05^{24}) \\
& - \sum_e \sum_{ee} y(e,ee) * \text{custo_duto_25}(e,ee)
\end{aligned}$$

(8)

Por fim, adicionou-se o termo que faz com que o *software* encontre os valores das variáveis que maximizem “z”.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resposta obtida do *software*, a partir da modelagem matemática desenvolvida no presente trabalho, foi satisfatória, visto que, para o otimizador, dos 8 bilhões disponíveis para o investimento, cerca de 7,6 bilhões deveriam ser investidos na construção de alguns dos dutos propostos.

As três variáveis do problema, as quais possuíam significados importantes eram as variáveis “y”, “q” e “z”, que indicavam respectivamente, quais dutos devem ser construídos, as vazões a serem transportadas de um estado para o outro e o retorno financeiro da construção dos dutos selecionados após 25 anos.

A partir da análise da resposta para a variável “y”, o modelo assumiu que os dutos que trariam maior retorno financeiro ao Brasil em 25 anos seriam três, um poliduto que transporte gasolina e diesel do Paraná para o Mato Grosso do Sul, outro poliduto que transporte gasolina e diesel de São Paulo para o Mato Grosso e um oleoduto que transporte gasolina de Pernambuco para a Paraíba.

A tabela 11 mostra a resposta adquirida através da modelagem com relação aos volumes ótimos a serem transportados pelos dutos escolhidos. Tais valores foram encontrados analisando-se os valores definidos como ótimos para a variável “q”.

Tabela 11 - Resposta de valores para a variável "q", volume ótimo a ser transportado pelos dutos propostos

Produto	Rota/duto	Volume (m³/ano)
Diesel	SP – MT	2,59E+06
Diesel	PR – MS	1,34E+06
Diesel	BA – TO	8,39E+05
Diesel	PE – PB	4,67E+05
Gasolina	SP – MT	6,17E+05
Gasolina	PR – MS	7,42E+05
Gasolina	BA – TO	3,64E+05

Utilizando “q” com os valores mostrados na tabela 11, “y” e “x” igual a 1 para os dutos determinados como viáveis, o *software* encontrou como resposta para a variável “z” um valor de 12,9 bilhões de reais

Segundo Figueiredo (2006), dois dos critérios mais importantes para a avaliação de viabilidade de construção de um oleoduto, são o volume de transporte e

o comprimento da rota, ou seja, quanto maior o volume a ser transportado e quanto mais extensa a rota, maior as vantagens da utilização de um oleoduto.

Portanto, analisando as tabelas 2 e 4, pode-se entender os resultados obtidos, visto que o oleoduto Bahia – Tocantins, é um dos maiores dutos propostos, já o oleoduto Paraná – Mato Grosso do Sul está entre os com maior demanda a ser atendida. Olhando para o oleoduto São Paulo – Mato Grosso, vê-se as duas qualidades esperadas, pois além de ser um dos dutos mais extensos, o Mato Grosso é o estado com maior demanda de diesel entre os estados envolvidos no trabalho.

Tendo em vista que o modelo procurou utilizar o máximo possível do investimento disponível a fim de maximizar o lucro, entende-se o motivo pelo qual o oleoduto Pernambuco – Paraíba foi envolvido na resposta, pois mesmo que não se enquadre entre os dutos mais extensos nem entre os com maior fluxo de produto, sua construção aumentou o retorno financeiro em cerca de 600 mil reais.

De acordo com Ferreira e Rodrigues (2014), a aplicação da otimização no planejamento e programação do transporte de derivados de petróleo não apenas aumenta os lucros, como também abre as portas para novos investimentos e crescimento da empresa.

Segundo Pinto (1996), a utilização do *software* GAMS com a finalidade de otimizar uma cadeia de suprimentos, facilita na tomada de decisões em relação a onde os investimentos devem ser feitos, fato que vem de encontro ao objetivo do presente trabalho.

Tomando por base os resultados obtidos no presente trabalho, sugere-se o aprofundamento das pesquisas e o relaxamento das simplificações impostas ao modelo, como por exemplo realizar um estudo aprofundado acerca do trajeto ao qual o duto deve seguir e definir com exatidão a extensão do duto, ou até mesmo o diâmetro do mesmo, é possível também realizar um orçamento a fim de definir com maior precisão o custo de construção dos dutos propostos. É possível também analisar a construção de poldutos destinados ao transporte de mais do que os dois produtos utilizados, como por exemplo óleo combustível.

9 CONCLUSÃO

A otimização vem ganhando cada vez mais espaço no mundo industrializado, devido à crescente competitividade do mercado. A indústria petroquímica não foge do padrão, portanto, também pode se beneficiar da pesquisa operacional de inúmeras formas, uma delas é através do planejamento e programação de sua cadeia de suprimentos. A melhor forma de aplicar a pesquisa operacional em uma tarefa é através do uso de um *software* de otimização, como o GAMS.

A gestão da cadeia de suprimentos da indústria petroquímica é um fator crucial para o lucro da mesma, visto que, grande parte de seus investimentos se concentram no transporte de suas matérias primas e produtos.

O meio de transporte mais utilizado no Brasil é o rodoviário, mesmo que este seja o menos indicado para um país de dimensões tão grandes. Um modal de transporte indicado para grandes distâncias é o dutoviário, o qual é extremamente escasso no país. Logo, tem-se uma oportunidade de investimento com grande potencial de retorno a longo prazo.

Pode-se concluir com os resultados obtidos por meio da modelagem feita no presente trabalho, que a substituição do modal rodoviário pelo dutoviário é na maioria das vezes vantajoso, quando se trata do transporte de derivados de petróleo. A malha dutoviária brasileira está atrasada em relação a de muitos outros países, portanto, a necessidade de investimento nessa área está se tornando cada vez maior.

REFERÊNCIAS

- ANP. **Anuário Estatístico do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2016**. Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis, p. 1–264, 2016.
- ANP. **Anuário Estatístico do Petróleo, gás Natural e Biocombustíveis 2017**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, p. 1-263, 2017.
- BARON, C. **Utilização de softwares na pesquisa operacional**. Revista Brasileira de Iniciação Científica, v. 4, p. 152–170, 2017.
- BIEGLER, L. T.; GROSSMANN, I. E.; WESTERBERG, A. W. **Systematic Methods of Chemical Process Design**. Prentice Hall, 1997.
- BOHRER, C. G.; OBREGÓN, M. F. Q. **A precariedade da infraestrutura portuária pública brasileira sob o prisma da lei 12.815/2016 e seus reflexos na economia nacional**. Derecho y Cambio Social, v. 13, n. 46, p. 1–39, 2016.
- BOSCHETTO, S. N. et al. **An Integrated Framework for Operational Scheduling of a Real-World Pipeline Network**. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. p. 259-264. 2008.
- BROOKE, A. et al. **GAMS Release 2.25 Version 92, Language Guide**. Washington: GAMS Development Corporation Ed., 1997.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. **Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks**. Computers and chemical engineering. v38. p. 185-203. 2011.
- CALDAS, F. V.; AMARAL, S. P. **Gestão ambiental em obras de gasodutos: medidas de controle ambiental formuladas nos estudos de impactos ambientais e sua implantação durante a etapa construtiva**. Niterói, RJ, Brasil. III CNEG. 2006.
- CARDOSO, L. C. **Petróleo do Poço ao Posto**. Qualitymark Editora Ltda., Rio de Janeiro , v. 1, p. 192, 2005
- COELHO, C. W. **Transporte dutoviário: características diante do sistema viário brasileiro**. Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí. p. 1-41. 2009.
- ELKAMEL, A. et al. **A Decomposition Heuristic for Scheduling the General Batch Chemical Plant**. School of Chemical Engineering, Purdue University, 1993.
- FERREIRA, F.; RODRIGUES, J. I. **Aplicação da ferramenta árvore de decisão na gestão de frota de uma distribuidora de combustível**. Monografia pós-graduação em Gestão de Suprimentos. Universidade Federal do Paraná. p. 39. 2014.
- FERREIRA FILHO, V. J. M.; IGNÁCIO, A. A. V. **O uso de software de modelagem AIMMS na solução de problemas de programação matemática**. Pesquisa Operacional, v. 24, n. 1, p. 197–210, 2004.

FIGUEIREDO, R. **GARGALOS LOGÍSTICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS BRASILEIRA**. Centro de Estudos em Logística – CEL/Coppead, 2006.

FLOUDAS, C. A. **Nonlinear and Mixed-Integer Optimization – Fundamentals and Applications**. Oxford University Press, 1995.

FREITAS, K. R. V. **Definição tarifária como instrumento regulatório: precificação do transporte dutoviário de gás natural no Brasil**. Tese Mestrado em Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 205. 2004.

GROSSMANN, I. E. et al. **Mixed-Integer Optimization Techniques for the Design and Scheduling of Batch Processes**. NATO Advanced Study Institute, 1992.

ILOS. **Custos Logísticos no Brasil**. 2013

JOLY, M. **TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO MISTA-INTEIRA PARA O SCHEDULING E GERENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM REFINARIAS DE PETRÓLEO**. Tese (mestrado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

JOLY, M. Refinery production planning and scheduling: The refining core business. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 2, p. 371–384, 2012.

JOLY, M. et al. **ASSESSING THE GAP BETWEEN AGGREGATED AND DETAILED SUPPLY CHAIN PLANNING MODELS FOR THE PETROLEUM INDUSTRY**. Reporte técnico. 2013.

JOLY, M. **Introdução à Programação Matemática Inteira-Mista Linear**, 2017.

LIMA, M. A. L.; SILVA, M. N. DA. **Softwares Para Resolução de Problemas de Programação Linear**. p. 6, 2016.

MENEZES, B. C. et al. **Nonlinear production planning of oil-refinery units for the future fuel market in Brazil: Process design scenario-based model**. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 11, p. 4352–4365, 2014.

NEMHAUSER, G. .; WOLSEY, L. A. **Integer and Combinatorial Optimization**. John Wiley & Sons, 1988.

OWEN, W. **Strategy for mobility**. Washington: The Brookings Institution, 1964.

PEREIRA, D. M. et al. **Apostila de sistemas de transportes**. Universidade Federal do Paraná Setor de tecnologia - Curitiba - PR, p. 1–195, 2013.

PESSANHA, D. M.; SILVA, M. L. S.; SILVEIRA, G. B. **Análise de materiais metálicos utilizados em dutos**. V Congresso Internacional do Conhecimento Científico. 2015.

PINTO, K. C. R. **Aplicação da ferramenta árvore de decisão na gestão de frota de**

uma distribuidora de combustível. Tese Doutorado em engenharia de transportes. Universidade de São Paulo. p. 179. 1996.

RAMALHO, A. **País precisa investir R\$8 bi em dutos.** Instituto de Logística e Supply Chain. 2015.

REKLAITIS, G. V. **Overview of Scheduling and Planning of Batch Process Operations.** NATO Advanced Study Institute, 1992.

SHERALI, H. D.; ADAMS, W. P. **Hierarchy of Relaxations and Convex Hull Characterizations for Mixed-Integer 0-1 Programming Problems.** Virginia Polytechnic Institute, 1989.

SOUZA, E. M. F. et al. **Scheduling a multi-product pipeline network.** Computers and chemical engineering. v53. p. 55-69. 2013.

VAN ROY, T. J.; WOLSEY, L. A. **Solving Mixed 0-1 Programs by Automatic Reformulation.** Oper. Res., v.35, p.45, 1987.

VAZ, A. V. et al. **O modal dutoviário: análise da importância e considerações sobre suas principais características.** Programa de mestrado em engenharia de transportes. Universidade Federal do Ceará. p. 1-10. 2005.