



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

EWERLANE CASTRO MENEZES

**ESTUDO DE EXPANSÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL
POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA: POSSÍVEL APLICAÇÃO EM UMA
REGIÃO DE FORTALEZA**

FORTALEZA

2017

EWERLANE CASTRO MENEZES

ESTUDO DE EXPANSÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL
POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA: POSSÍVEL APLICAÇÃO EM UMA
REGIÃO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Petróleo.

Orientador: Prof. Me. Pedro Felipe
Gadelha Silvino.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M51e Menezes, Ewerlane Castro.

Estudo de expansão da rede de distribuição de gás natural por programação matemática: : possível aplicação em uma região de Fortaleza / Ewerlane Castro Menezes. – 2017.
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Petróleo, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Me. Pedro Felipe Gadelha Silvino.

1. Rede de distribuição de Gás Natural. 2. Programação Matemática. 3. Otimização de custos. I. Título.
CDD 665.5092

EWERLANE CASTRO MENEZES

ESTUDO DE EXPANSÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL
POR PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA: POSSÍVEL APLICAÇÃO EM UMA
REGIÃO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Petróleo.

Orientador: Prof. Me. Pedro Felipe
Gadelha Silvino.

Aprovada em: 10/07/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Pedro Felipe Gadelha Silvino (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Vitor Moreira da Rocha Ponte
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Filipe Xavier Feitosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha família, mas principalmente a
minha mãe Regina Lúcia.

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, especialmente minha mãe Regina Lúcia Castro por todo amor dado a mim, em forma de dedicação, investimento em meus estudos e apoio para que eu alcançasse meus objetivos. Ao meu pai Eraldo Menezes por sempre acreditar na minha capacidade e à minha avó Bernarda Castro por todo carinho e incentivo.

À Lahis Muriel por todo companheirismo, suporte e carinho nesse período de construção do meu trabalho e, principalmente, nos momentos mais importantes e difíceis vividos por mim. À Célia Regina por todo apoio e incentivo na minha trajetória, tanto profissional como pessoal.

Aos grandes amigos que conquistei durante o curso Heitor Lemos, Brenda Mendes, Ana Luiza Castro, Amanda Viana, Carol Urzedo, Isabela Vieira, Lia Zíngara, Manuel Rodrigues, Lysle Marjory e Ana Beatriz do Vale, por se fazerem sempre presentes em momentos tanto de alegria como de dificuldades, sejam esses profissionais ou pessoais.

Aos amigos e colegas que foram marcantes no trajeto do curso Nonato Fernandes, Eric Sampaio, Matheus da Silva, Yuri Vasconcelos, Vanessa Oliveira, Hilda Pinho, Luciana Ribeiro, Pablo Vargas e Evellyn Pereira.

Às minhas grandes amigas que estão comigo desde o colégio Luana Ribeiro, Ivna Magalhães e Marcela Yara, por todo carinho e apoio em diversos momentos importantes da minha vida.

Ao Victor Sancho e Marilac Jucá por todo apoio, por acreditarem na minha capacidade e por serem grandes incentivadores da minha carreira profissional.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) por todo o crescimento profissional e pessoal que me proporcionou. A todos os professores que contribuíram de alguma forma para a minha formação, sobretudo ao meu orientador Pedro Felipe Gadelha Silvino por todo o auxílio neste trabalho e em suas disciplinas. Aos professores Vitor Pontes e Rodrigo Vieira por todos os esforços empregados no curso.

“Sonhos são adoráveis. Mas são só sonhos. São fugazes, efêmeros, bonitos. Sonhos não se tornaram realidade só porque você sonhou. É o esforço que faz as coisas acontecerem. É o esforço que cria mudança.”

(Shonda Rhimes)

RESUMO

O combustível Gás Natural tem como característica principal um baixo custo para gerar energia, além de ter propriedades pouco poluentes. No Estado do Ceará, o consumo deste combustível atende aos setores industriais (co-geração de energia) e automotivos, mas é incipiente em setores muito importantes para a economia como o comercial. A construção de infraestruturas para o transporte de Gás Natural é bastante onerosa, dificultando sua ampla oferta no Brasil. A partir disso, é necessário a busca por alternativas que minimizem seus custos de implantação, de forma a possibilitar uma expansão da oferta do combustível em questão. O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de expansão da rede de distribuição do Gás Natural em uma região de Fortaleza, através da identificação da demanda potencial e de um modelo que possibilite um projeto futuro com otimização de custos das instalações. Como metodologia, foram definidos os pontos de demanda na região, referentes a consumidores potenciais de gás natural, e utilizou-se de modelos de programação matemática, dos quais foram solucionados através do programa LINGO, para se alcançar um resultado logístico ótimo. Dada a complexidade computacional dos problemas gerados, foi empregada uma estratégia de decomposição, possibilitando assim a obtenção de resultados viáveis para o problema.

Palavras-chave: Rede de distribuição de Gás Natural. Programação Matemática. Otimização de custos.

ABSTRACT

The Natural Gas fuel has as main characteristic a low cost to generate energy, besides having little polluting properties. In the state of Ceará, the consumption of this fuel serves the industrial sectors (cogeneration of energy) and automotive, but it is incipient in sectors very important for the economy as the commercial one. The construction of infrastructures for the transportation of Natural Gas is quite expensive, making difficult its wide offer in Brazil. From this, it is necessary to search for alternatives that minimize their implementation costs, in order to allow an expansion of the fuel supply in question. The objective of the present work is to carry out a study of the expansion of the Natural Gas distribution network in a region of Fortaleza, through the identification of potential demand and a model that allows a future project with optimization of the costs of the facilities. As a methodology, the points of demand in the region were defined, referring to potential natural gas consumers, and mathematical programming models were used, which were solved through the LINGO program, in order to achieve an optimum logistic result. Given the computational complexity of the problems generated, a decomposition strategy was employed, thus enabling the attainment of viable results for the problem.

Keywords: Natural gas distribution network. Mathematical Programming. Cost optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gás natural associado (GASA).....	12
Figura 2 - Gás natural não-associado (GASN).....	13
Figura 3 - Comparativo de reservas provadas de gás natural por região do mundo, em trilhões de metros cúbicos.	16
Figura 4 - Balanço esquemático de gás natural no Brasil.	18
Figura 5 - Segmentação da Oferta de Gás Natural no Brasil – Média 2016.	18
Figura 6 - Distribuição da Produção Nacional de Gás Natural, por Estado.	19
Figura 7- Distribuição da Produção Nacional de Gás Natural, por Bacia.	20
Figura 8 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural.....	25
Figura 9 – Cogeração de energia.	26
Figura 10 - Esquema de uma UPGN.	27
Figura 11 – Gasodutos no Brasil.	28
Figura 12 – Exemplo de grafo (a) e árvore geradora mínima (b).....	36
Figura 13 – Hierarquia dos problemas de NCFCF.....	36
Figura 14 – Malha viária do bairro Dionísio Torres.....	37
Figura 15 – Reprodução da malha viária do bairro Dionísio Torres no programa AutoCAD.....	40
Figura 16 – Demanda Potencial de GN no bairro Dionísio Torres.	41
Figura 17 – Mapa da Rede de Distribuição ofertada pela CEGÁS (direita) com destaque para as proximidades da região de interesse (esquerda).....	42
Figura 18 – Malha viária do bairro Dionísio Torres, adaptada para o estudo.	43
Figura 19 – Divisão do grafo em dois subgrafos.....	44
Figura 20 – Solução alcançada para o problema em estudo.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Participação do gás natural na oferta de energia primária no mundo (esquerda) e na produção mundial de energia elétrica (direita).....	14
Gráfico 2- Produção (esquerda) e consumo (direita) de gás natural mundial por região, em bilhões de metros cúbicos.....	15
Gráfico 3 - Evolução da distribuição geográfica de reservas provadas mundiais de gás natural.....	16
Gráfico 4 - Reservas provadas de gás natural de 1965 a 2009 no Brasil.....	17
Gráfico 5 – Histórico da Produção de Gás Natural de 2016, MMm3/dia.....	19
Gráfico 6 – Comparativo de emissão de dióxido de enxofre (SO ₂) e óxidos de nitrogênio (NO _X).	21
Gráfico 7 – Comparativo de emissão de monóxido de carbono (CO).	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de gás natural em 2008.....	15
Tabela 2 – Resultados obtidos para o Grafo 1.....	46
Tabela 3 – Resultados obtidos para o Grafo 2.....	46

LISTA DE SIGLAS

ABEGÁS	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BP	British Petroleum
CEGÁS	Companhia de Gás do Ceará
GASA	Gás Associado
GASN	Gás Não-associado
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
GN	Gás Natural
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
MME	Ministério de Minas e Energia
ODCE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PAS	Problema da Árvore de Steiner
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Gás Natural: Caracterização e Aspectos Gerais.....	12
2.1.1 Definição	12
2.1.2 Histórico e Perspectiva Atual do Gás.....	13
2.1.3 Vantagens e Aplicações do Gás Natural	20
2.2 Rede de Distribuição de Gás.....	26
2.2.1 Cadeia Produtiva do Gás Natural	26
2.2.2 Logística da Distribuição de Gás Natural	29
2.3 Alguns Estudos Anteriores	30
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Modelo de Programação Matemática	33
3.1.1 Problema não capacitado de fluxos com custos fixos nos arcos	33
3.1.2 Problema da Árvore de Steiner (PAS)	35
3.2 Metodologia de Desenvolvimento	37
3.2.1 Edição do mapa	37
3.2.2 Identificação da demanda potencial de gás	38
3.2.3 Softwares utilizados no projeto	38
4. RESULTADOS	40
4.1 Análises do Sistema de Interesse	40
4.1.1 O mapa elaborado.....	40
4.1.2 Localização da demanda potencial de GN na área de estudo	41
4.2 Aplicação do Modelo Matemático.....	42
4.2.1 Procedimentos iniciais.....	42
4.2.2 Introdução dos recursos computacionais.....	44
4.2.3 Resultados obtidos.....	46
5. CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

O combustível Gás Natural é um derivado do petróleo de enorme importância estratégica, pois suas reservas provadas são significativas, permitindo o consumo mundial por pelo menos 50 anos, além de estarem dispersas em mais de 90 países. É possível destacar também que o gás natural é o combustível fóssil mais limpo e mais seguro, com um baixo custo de produção. (CINTRA, 2008)

É notória a relevância do gás natural na maioria das matrizes energéticas dos países, sejam eles desenvolvidos ou em desenvolvimento. As principais justificativas que incentivam esta tendência podem ser abreviadas pelo maior volume e dispersão das reservas existentes no mundo, quando comparadas ao petróleo, assim também como a crescente pressão de grupos ambientais favoráveis à utilização de uma fonte energética mais limpa e versátil que pudesse substituir a eletricidade nas residências e estabelecimentos comerciais, o óleo combustível no setor industrial, a gasolina e o diesel no setor de transportes e o carvão para geração termelétrica, com elevada eficiência e menores impactos. (PRAÇA, 2003)

A matriz energética do Estado do Ceará apresenta parcela pouco significativa quanto ao fornecimento de Gás Natural. Diante disto, surgem as questões de pesquisa: como orientar a expansão de infraestrutura de forma a beneficiar o maior número de potenciais consumidores, com o menor custo de investimento? Quais direções adotar para a expansão da rede com custo mínimo em uma área de estudo?

Logo, se faz necessário o estudo para a obtenção de um projeto ótimo de tubulações para distribuição de gás natural, em uma área definida, utilizando conjuntamente a possível malha dutoviária e os potenciais pontos de consumo, de maneira mais econômica. A formulação e a resolução de um modelo de programação matemática, para o projeto de redes de tubulações de gás natural, podem ser utilizadas para conceber redes, com comprimento mínimo, as quais atendam todos os pontos de consumo.

O objetivo geral do presente trabalho é realizar um estudo de expansão da rede de distribuição de Gás Natural em uma região de Fortaleza, através da identificação da demanda potencial e de um modelo de programação matemática que viabilize um projeto futuro com otimização de custos das instalações. Com o intuito de verificar a validade da abordagem a apresentar, trabalhou-se com a malha viária de uma área delimitada geograficamente, um bairro da cidade de Fortaleza. Como objetivos

mais específicos, o trabalho busca: contribuir para o aumento da oferta de Gás Natural, direcionando seu uso para uma região detectando a existência de benefícios para o consumidor; identificar a demanda potencial pelo GN através de uma avaliação dos possíveis consumidores na região de estudo, verificando infraestruturas já existentes e/ou futuras; e aplicar um modelo de programação matemática que possibilite o projeto de redes de distribuição de gás natural com custo mínimo para uma área de estudo.

O presente trabalho é composto por mais quatro etapas bem estabelecidas, estruturadas da seguinte forma: na segunda seção é apresentado o referencial teórico, que consiste em uma revisão bibliográfica sobre o gás natural, expondo conceitos e aspectos gerais relacionados a esse energético; na terceira seção é apresentada a metodologia do trabalho, na qual destaca o modelo utilizado e suas características, além de indicar o desenvolvimento da identificação de demanda de GN e um estudo dos *softwares* a serem utilizados; na quarta seção são mostrados os resultados, onde são relatadas as análises, os procedimentos computacionais e o projeto otimizado; na quinta e última seção são apresentadas as conclusões a respeito da aplicabilidade do projeto obtido e suas possíveis limitações.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

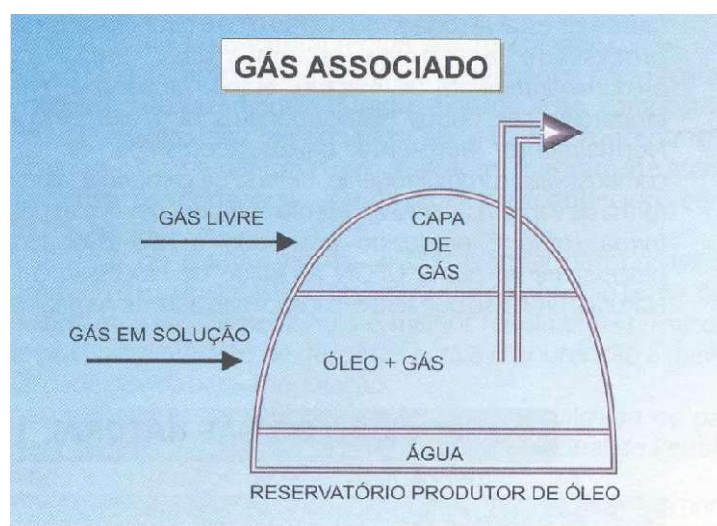
2.1 Gás Natural: Caracterização e Aspectos Gerais

2.1.1 Definição

O gás natural pode ser interpretado como sendo uma mistura de hidrocarbonetos leves que permanece no estado gasoso em temperatura ambiente e à pressão atmosférica. Constituído em sua maior parte por metano (CH_4), a queima desse gás libera uma grande quantidade de energia, sendo considerado um combustível de relevante potencial energético (CASTELANI, 2013).

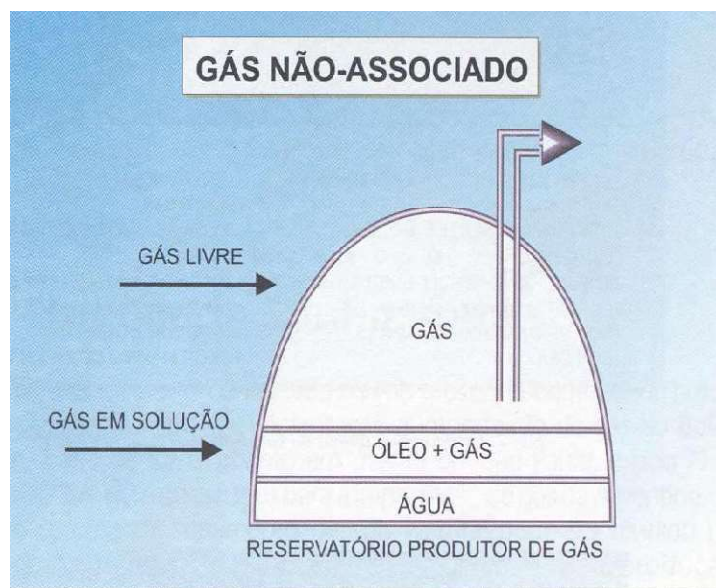
O gás natural tem origem orgânica e pode ser encontrado em rochas sedimentares, ditas porosas, no subsolo terrestre. De acordo com Chaves (2010), o gás é encontrado, em sua maioria, junto a uma grande quantidade de petróleo, recebendo por isso a denominação de gás associado (Figura 1). Quando existe apenas a presença do gás no reservatório ou junto a um pequeno volume de óleo, é chamado de gás não-associado, como demonstrado na Figura 2. O gás natural pode ser obtido em reservatórios localizados no mar ou em terra e a sua composição pode variar de campo a campo, mas geralmente, possui baixos teores de contaminantes, como nitrogênio, enxofre e dióxido de carbono.

Figura 1 - Gás natural associado (GASA)



Fonte: Castelani (2013).

Figura 2 - Gás natural não-associado (GASN)



Fonte: Castelani (2013).

Segundo a lei nº 11.909/09 (Lei do Gás), o gás natural também pode ser definido como todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gaseíferos, cuja composição poderá conter gases úmidos, secos e residuais.

2.1.2 Histórico e Perspectiva Atual do Gás

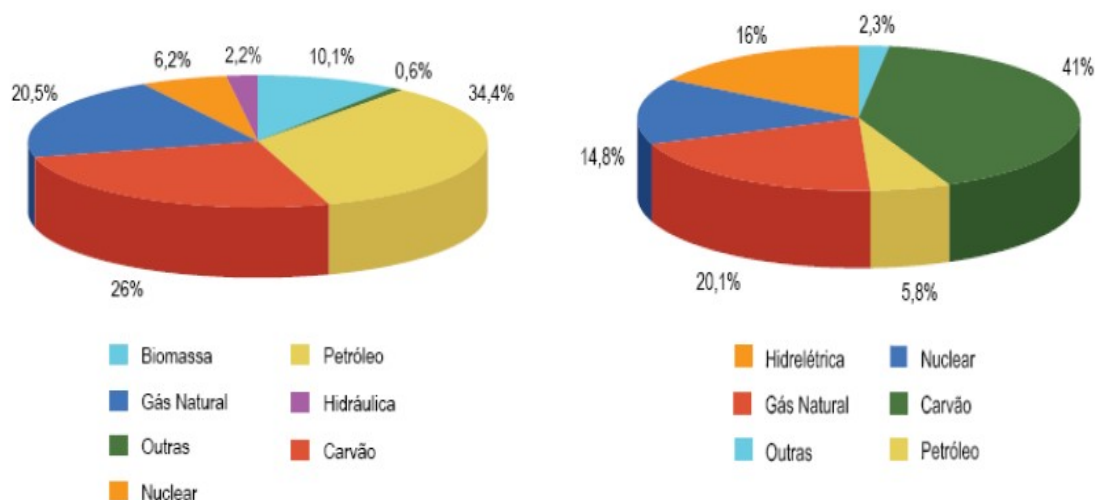
2.1.2.1 Cenário Mundial

Um dos principais registros históricos iniciais de uso econômico ou até mesmo socialmente utilizável do gás natural ocorreu na China do século XVIII e XIX. Os chineses aproveitavam locais de escape de gás natural para construir auto-fornos destinados à produção de cerâmica e para metalurgia, de forma ainda elementar. (CHAVES, 2010)

Ao longo do século XIX, nos Estados Unidos, o gás quando encontrado associado ao petróleo era considerado um empecilho da produção, pois exigia procedimentos de segurança que aumentavam os custos e complicavam as atividades de prospecção. No decorrer do século XX, o gás natural foi se estabelecendo e desde a década de 1980, seu consumo passou a apresentar um grande crescimento e acabou por tornar-se a fonte de energia de origem fóssil a registrar os maiores índices mundiais de expansão (FARIA, 2010).

Não existe exatamente um mercado mundial de gás natural, mas sim mercados regionais, diferentemente do petróleo. Os principais mercados de gás natural são: a Europa, a América do Norte e a Ásia. Cada um deles possui características específicas no que diz respeito à estrutura da oferta e da demanda do produto, o que tem relação direta com os preços do gás natural nesses locais (SOUZA, 2010). O Gráfico 1 permite uma visão mais geral a respeito da presença do gás natural na oferta e produção de energia no mundo.

Gráfico 1 - Participação do gás natural na oferta de energia primária no mundo (esquerda) e na produção mundial de energia elétrica (direita).



Fonte: IEA (2009).

Para garantir o atendimento da demanda prevista, a oferta de gás natural deve ter um aumento de 48 trilhões de pés cúbicos entre 2006 e 2030. Têm-se a expectativa de que os países não membros da OCDE respondam por 84% do mencionado incremento na produção, com destaque para os países do Oriente Médio (EIA, 2009).

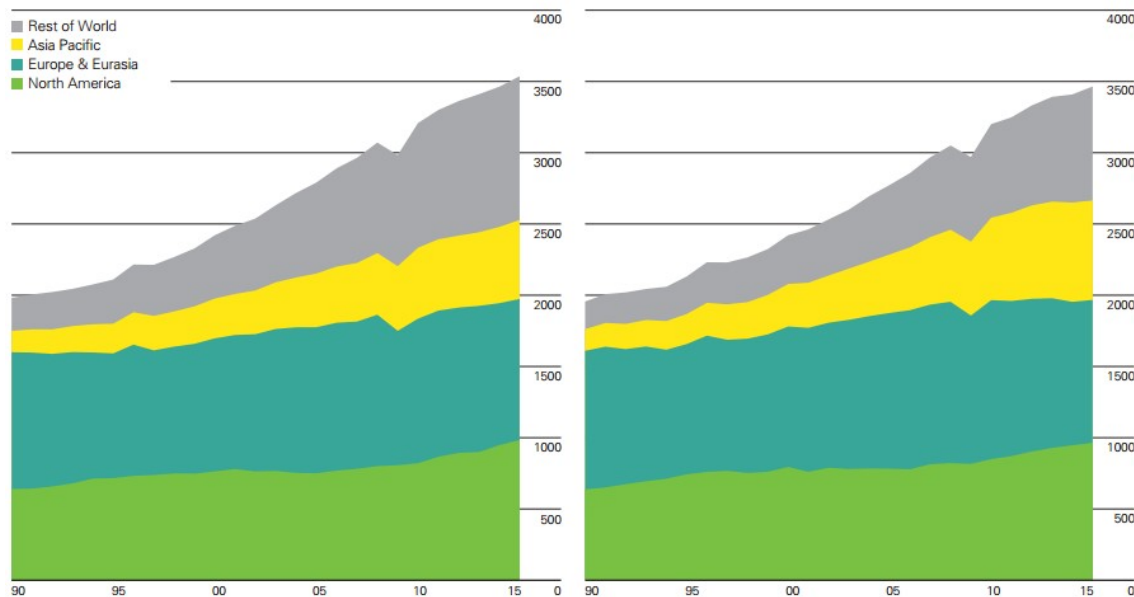
A produção de gás natural possui uma notável concentração em termos de distribuição geográfica. Tanto que o consumo de gás natural no mundo foi de 3.065,6 bilhões de m³ em 2008, sendo que os dez países de maior produção corresponderam a 63,8% desse total, como pode ser verificado na Tabela 1 (SOUZA, 2010). O Gráfico 2 apresenta a produção e o consumo em um estudo mais atual realizado pela BP.

Tabela 1 - Produção de gás natural em 2008.

PAÍS	PRODUÇÃO (bilhões m ³)	%
Rússia	601,7	19,6%
Estados Unidos	582,2	19
Canadá	175,2	5,7
Irã	116,3	3,8
Noruega	99,2	3,2
Argélia	86,5	2,8
Arábia Saudita	78,1	2,5
China	76,1	2,5
Indonésia	69,7	2,3
Reino Unido	69,6	2,3
% total dos 10 maiores		63,80%
Total Mundo	3.065,60	

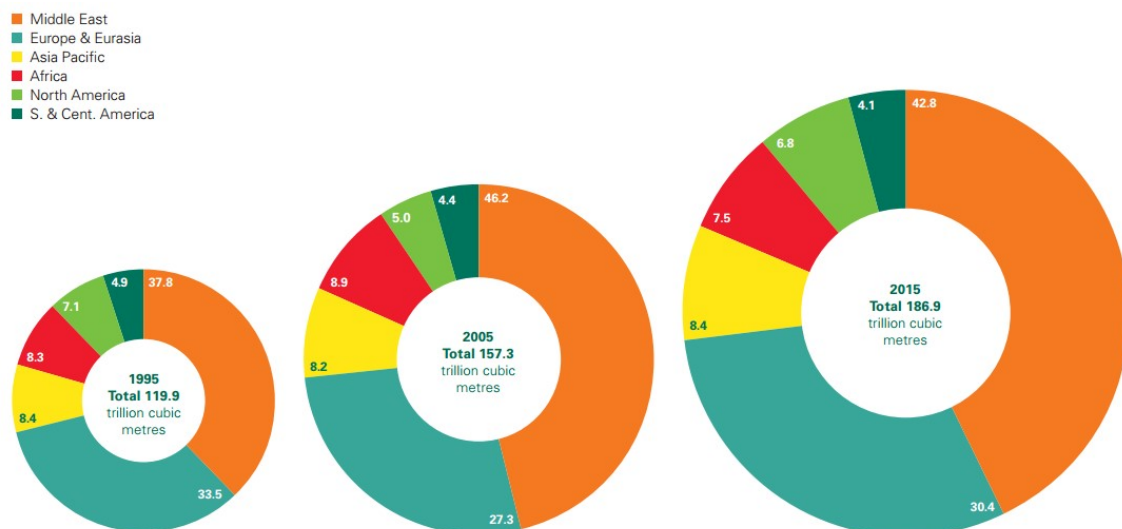
Fonte: Adaptado de BP Statistical Review of World Energy 2009.

Gráfico 2 - Produção (esquerda) e consumo (direita) de gás natural mundial por região, em bilhões de metros cúbicos.



Fonte: BP Statistical Review of World Energy 2016.

Figura 3 - Comparativo de reservas provadas de gás natural por região do mundo, em trilhões de metros cúbicos.

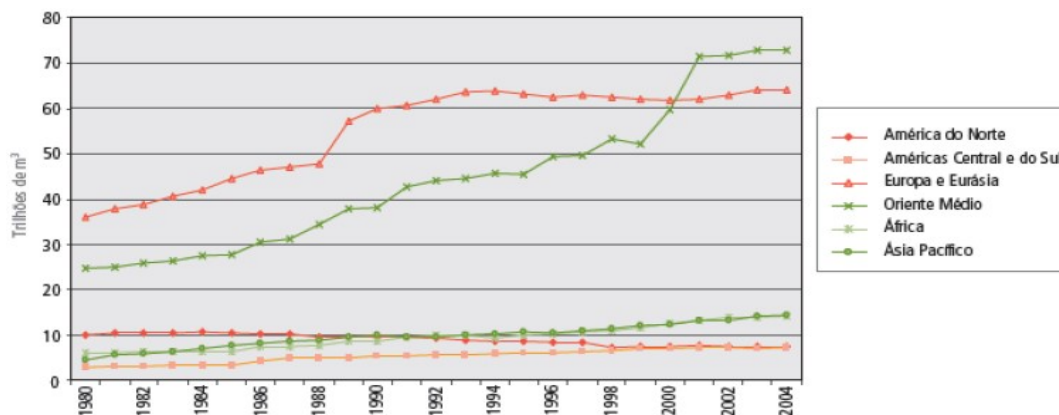


Fonte: BP Statistical Review of World Energy 2016.

Conforme os dados da BP, em seu Statistical Review of World Energy 2016, as reservas provadas mundiais de gás natural alcançavam cerca de 150 trilhões de metros cúbicos no final de 1999.

Nota-se que à medida que se aumentou a prospecção, a produção e o consumo desse combustível (Figura 3), ocorreu, também, o crescimento em cadeia das descobertas de recursos disponíveis desse combustível na natureza. Esse fato propõe uma interessante tendência que não deve ser ignorada (FARIA, 2010). O Gráfico 3 demonstra um pouco dessa evolução de descobertas.

Gráfico 3 - Evolução da distribuição geográfica de reservas provadas mundiais de gás natural.



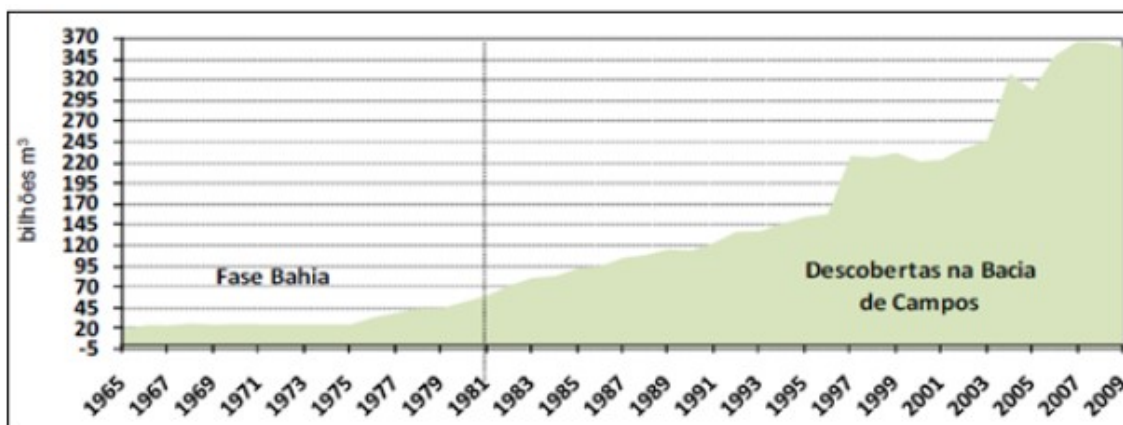
Fonte: Chaves (2010).

2.1.2.2 Gás Natural no Brasil

A indústria de gás natural no Brasil deu seus primeiros passos na década de 1940 com as descobertas de óleo e gás na Bahia. Nessa época, a produção de gás natural era praticamente toda destinada às indústrias localizadas no Recôncavo Baiano. No final da década de 1950 já se verificava uma produção de 1 milhão de metros cúbicos de gás por dia, valor este que subiu para 3,3 milhões de metros cúbicos uma década mais tarde e já atendia a uma refinaria e a todo o pólo petroquímico de Camaçari (CHAVES, 2010).

Com a descoberta da Bacia de Campos, as reservas provadas brasileiras aumentaram praticamente cinco vezes no período de 1980 a 2009, como é mostrado na Gráfico 4, e cresceu a participação do gás natural na matriz energética nacional para cerca de 2,7% (FARIA, 2010).

Gráfico 4 - Reservas provadas de gás natural de 1965 a 2009 no Brasil.



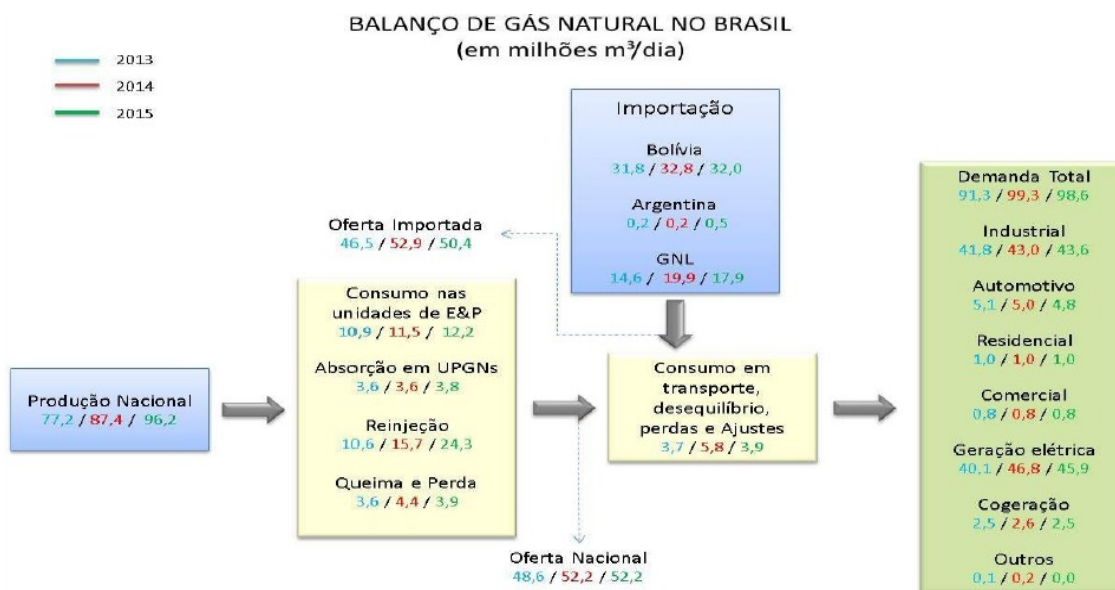
Fonte: Faria (2010).

Na última década, com as descobertas nas bacias de Santos e do Espírito Santo, as reservas brasileiras de gás natural tiveram aumentos significativos (Gráfico 4). Existe a perspectiva de que as reservas mais novas e as reservas da região do pré-sal tenham capacidades ainda maiores para exploração (CHAVES, 2010).

Apesar disso, o baixo preço do produto e a dependência do gás importado, são apontados como um dos inibidores de novos investimentos. A insegurança provocada pelo rápido crescimento da demanda e interrupções intermitentes no fornecimento boliviano após o processo de estatização do gás na Bolívia levaram a

Petrobrás a investir mais em produção nacional e na construção de infra-estrutura de portos para importação de GNL (CHAVES, 2010).

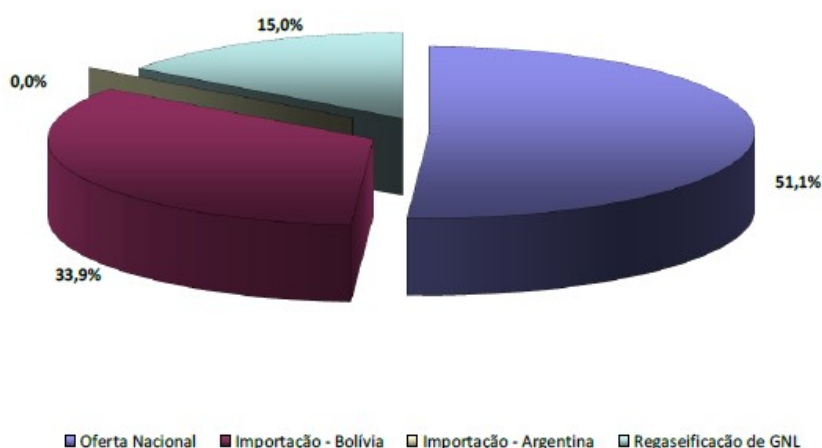
Figura 4 - Balanço esquemático de gás natural no Brasil.



Fonte: Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural – MME, 2016.

A Figura 4 exibe um comparativo dos anos 2013, 2014 e 2015, de forma esquemática, das movimentações gerais do gás natural no Brasil, ilustrando um pouco o cenário mais recente. Já a Figura 5 mostra como a oferta desse combustível estava distribuída em 2016.

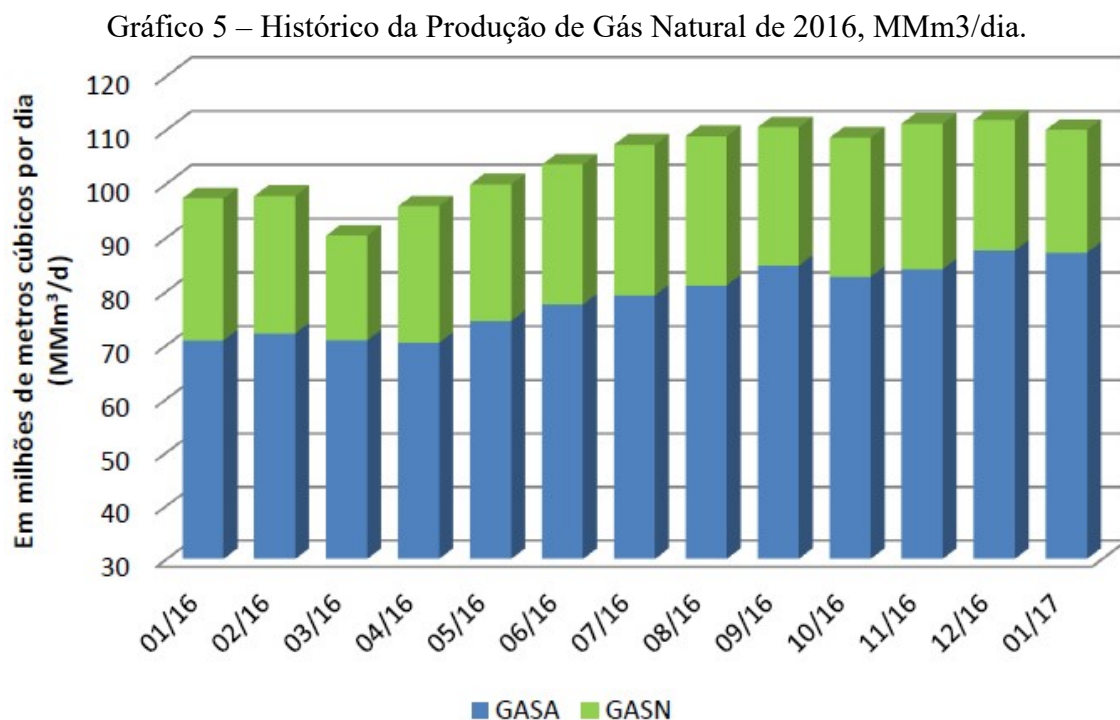
Figura 5 - Segmentação da Oferta de Gás Natural no Brasil – Média 2016.



Fonte: Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural – MME (2016).

De acordo com o Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural (ANP - jan/2017), no último ano, a produção de gás natural no Brasil teve um crescimento no começo de 2016, porém se manteve mais estável em seus últimos meses, como ilustrado

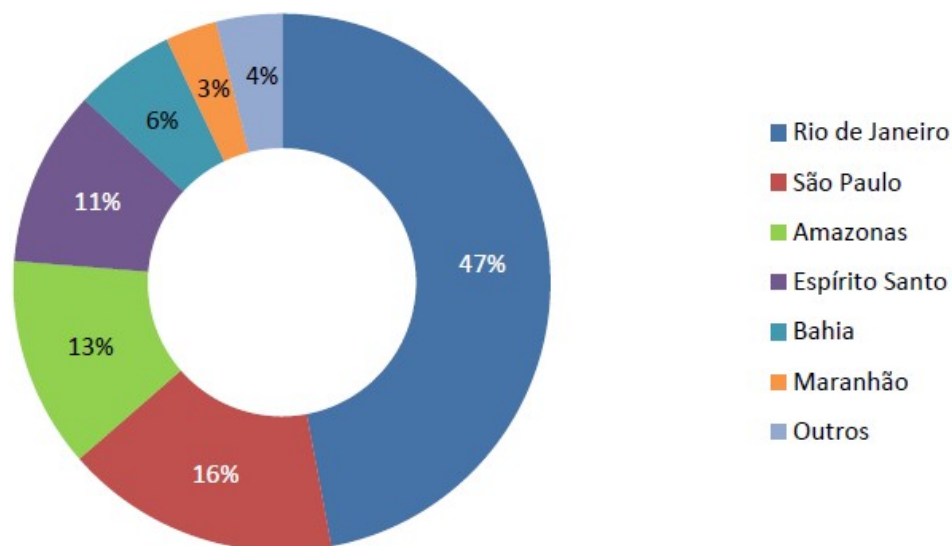
no Gráfico 5, em termos de Gás Natural Associado (GASA) e Gás Natural Não Associado (GASN).



Fonte: Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – ANP (Jan/2017).

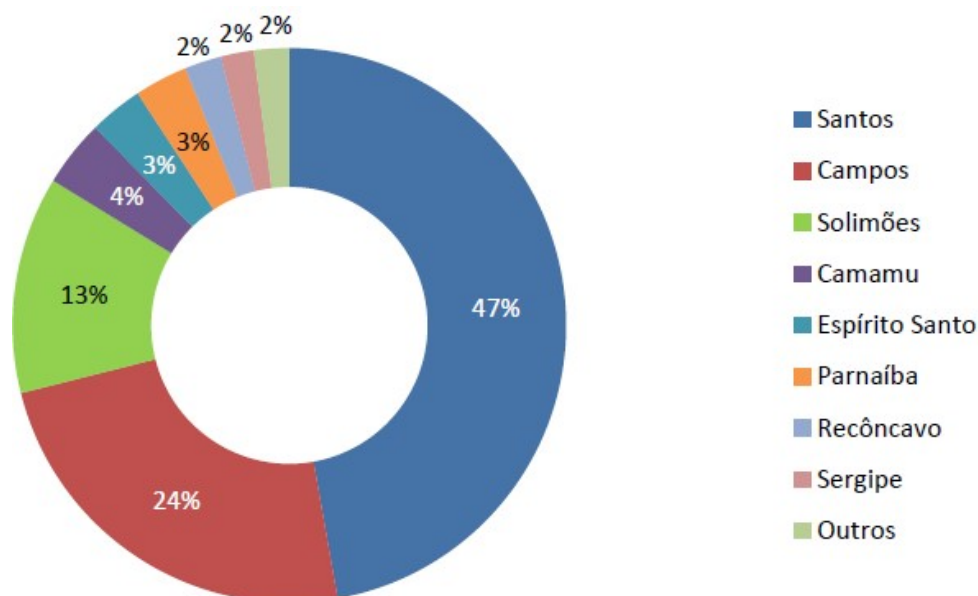
As Figuras 6 e 7 ilustram um pouco, de forma mais geral, o cenário nacional no aspecto produção de gás natural.

Figura 6 - Distribuição da Produção Nacional de Gás Natural, por Estado.



Fonte: Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – ANP (Jan/2017).

Figura 7- Distribuição da Produção Nacional de Gás Natural, por Bacia.



Fonte: Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – ANP (Jan/2017).

2.1.3 Vantagens e Aplicações do Gás Natural

A característica mais importante do gás natural é a versatilidade. Esta fonte de energia pode ser utilizada tanto na geração de energia elétrica, quanto em motores de combustão do setor de transportes, na produção de chamas (como substituto ao gás liquefeito de petróleo, GLP), calor e vapor. Por esse motivo, a aplicação se torna possível em todos os setores da economia: indústria, comércio, serviços e residências (ANEEL, 2008).

2.1.3.1 Algumas vantagens da utilização de Gás Natural

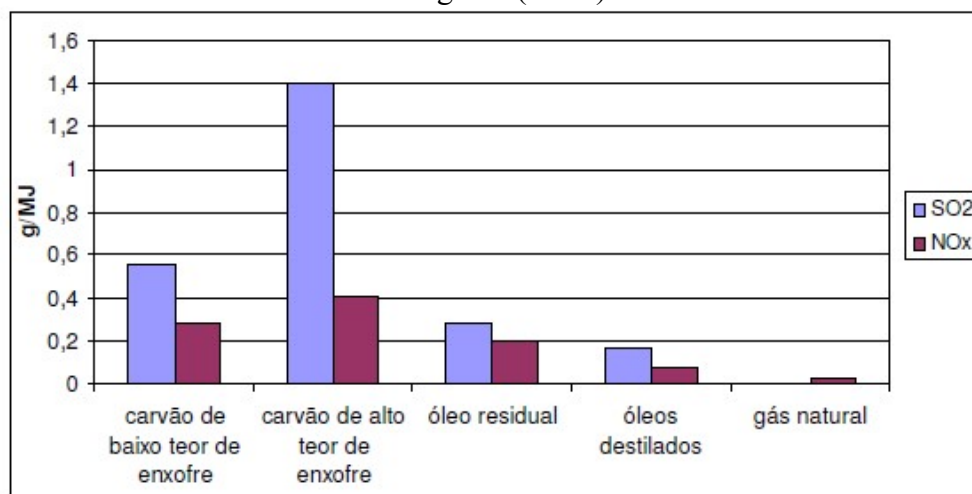
Uma característica bem relevante a respeito do gás natural é que, pela predominância do metano na constituição do gás, muitas das análises físicas e termodinâmicas podem ser feitas como se este fosse o único gás presente na substância, facilitando bastante a obtenção de resultados (CHAVES, 2010).

Dentre as principais vantagens do uso de gás natural, um aspecto muito importante é a ausência de compostos sulfurados e nitrogenados em sua composição. Isso possibilita que a combustão desse gás seja realizada sem a emissão de substâncias

bastante prejudiciais ao meio ambiente, tais como dióxido de enxofre (SO_2), um dos componentes da chuva ácida, e óxidos de nitrogênio (NO_x), que contribuem para a destruição da camada de ozônio. Além disso, tendo conhecimento de que a combustão do gás natural é mais completa, o monóxido de carbono (CO) é emitido em baixíssimas quantidades para a atmosfera (CINTRA, 2008).

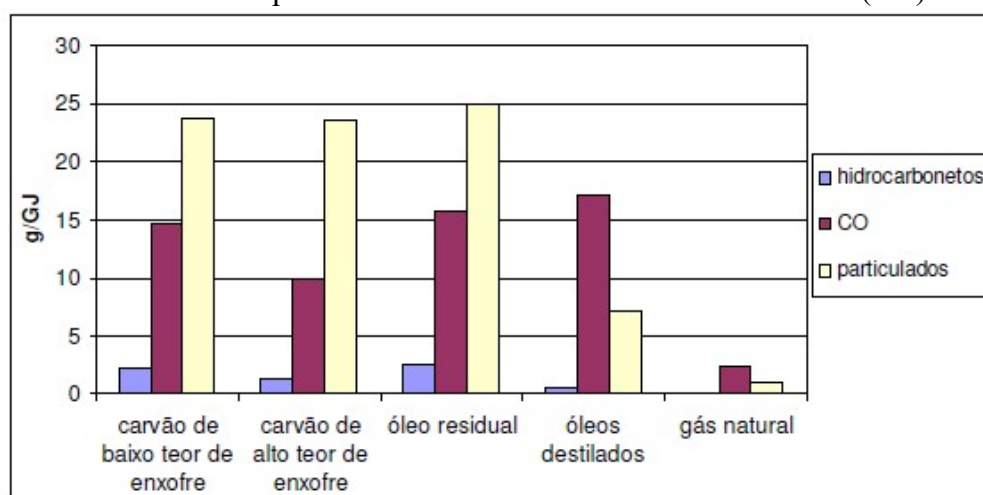
Os Gráficos 6 e 7 demonstram um comparativo entre alguns combustíveis e o gás natural, em termos da emissão de alguns gases (MELO, 2006).

Gráfico 6 – Comparativo de emissão de dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x).



Fonte: Melo (2006).

Gráfico 7 – Comparativo de emissão de monóxido de carbono (CO).



Fonte: Melo (2006).

Quanto a aspectos de confiabilidade e segurança, o gás natural tem mais vantagens em relação ao gás liquefeito de petróleo, tendo que o GLP é integrado em sua

maior parte de propano e butano, compostos mais pesados que o ar. Portanto, em ocorrências de vazamento, o GLP tende a se acumular nos arredores dos locais de escape, o que pode gerar explosões na presença de faíscas e centelhas elétricas. Por outro lado, o gás natural sendo constituído de metano e etano, é mais leve que o ar e tende a dispersar-se rapidamente (PRAÇA, 2003).

O gás natural não é quimicamente tóxico, logo a sua ingestão ou inalação acidental não acarreta danos à saúde. As substâncias integrantes do gás natural são inertes no corpo humano, não causando intoxicação (CHAVES, 2010).

De acordo com Praça (2003), pela perspectiva econômica, um traço importante do gás natural é que sua queima não causa a deposição de impurezas nas superfícies de troca térmica, o que evita a corrosão e prolonga a vida útil dos equipamentos. Além disso, o sistema de canalização usado para suprimento primário do gás evita a utilização de espaços destinados à estocagem de combustíveis líquidos ou sólidos no local de consumo.

Na generalidade, um dos grandes diferenciais ligados ao gás natural é a sua imensa versatilidade. A sua vasta possibilidade de usos o coloca como um concorrente potencial de quase todos os outros combustíveis alternativos. Entretanto, simultaneamente, o gás natural não possui uma aplicação na qual ele seja imprescindível e para o qual não se tenha competidores (PRAÇA, 2003).

2.1.3.2 Setor Residencial e Comercial

O GN também pode ser empregado ao consumo residencial, em que o mercado está em verdadeira expansão, notadamente nos grandes centros urbanos do país. As companhias distribuidoras estaduais possuem planejamentos de ampliação de suas redes, com investimentos significativos em conversões e adaptações nas residências. Com simplicidade e segurança, o gás natural pode ser utilizado em residências para aquecer água e cozinhar, climatizar ambientes, entre outras aplicações como: em sistemas de refrigeração, lavadoras/secadoras, lareiras, saunas, aquecedores de ambiente e de piscina. Em situações na qual a residência não tenha instalações que possibilitem o uso do gás natural, pode-se optar por adaptações e conversões nas instalações internas da casa ou do prédio (PRAÇA, 2003).

Segundo Melo e Medina (2005), com funcionalidade similar ao setor residencial, o gás natural também tem emprego no setor comercial, produzindo água

quente e climatizando ambientes. Por essa razão, a diversidade de usuários engloba hotéis, restaurantes, hospitais, creches, lavanderias e escolas. Edifícios comerciais com grande porte, universidades, hospitais e shopping centers também podem adotar o ar condicionado central com tecnologia a gás natural. A opção mais econômica para um esquema de climatização é o ar condicionado central a gás natural, sendo uma boa alternativa para grandes estabelecimentos. Com seu uso é possível uma redução de até 99% no consumo de energia elétrica, promovida pelo mecanismo a gás em comparação com o dispositivo elétrico. Onde se pode alcançar até 30% de economia com a operação.

2.1.3.3 Setor Industrial

Neste setor, o gás natural pode ser usado como combustível para suprimento de calor, de força motriz e para geração de eletricidade. Tem aplicação também como matéria-prima nos setores químicos e petroquímicos, sobretudo na produção de metanol, e na fabricação de fertilizantes, para na geração de ureia e amônia. Pode ser empregado ainda como redutor siderúrgico na produção de aço (PETROBRAS, 2017).

Para a indústria, a combustão limpa é uma vantagem proporcionada pelo gás natural, livre de agentes poluidores, ideais para processos que exigem a queima em contato direto com o produto final, como na indústria de cerâmica, fabricação de vidro e cimento (PETROBRAS, 2017).

Sendo um combustível multifuncional, o GN pode ser empregado em diversos equipamentos, como caldeiras, secadores, fornos, turbinas, atomizadores, geradores de fluido térmico, gás, ar quente e água quente, estufas, empilhadeiras, entre outros. A utilização do gás natural nas indústrias vem permitindo benefícios consideráveis para o meio ambiente, além de reduzir os custos com manutenção de máquinas, transporte e estocagem de combustível, e melhorando a segurança, eficiência dos equipamentos e a qualidade do produto final (MELO; MEDINA, 2005).

2.1.3.4 Setor de Transportes

O Gás Natural Veicular (GNV) é o gás natural comprimido só que a uma pressão de aproximadamente 220 atm e armazenado em cilindros que são embarcados no automóvel. Do ponto de vista ambiental, a grande vantagem do GNV é a quase ausência das emissões de fuligem e de compostos de enxofre, quando comparadas aos

motores a diesel, álcool ou gasolina. Ultimamente, o GNV tem crescido com relativa rapidez no segmento de transportes, principalmente em zonas metropolitanas, congestionadas e cuja qualidade do ar se apresenta em estado precário (PRAÇA, 2003).

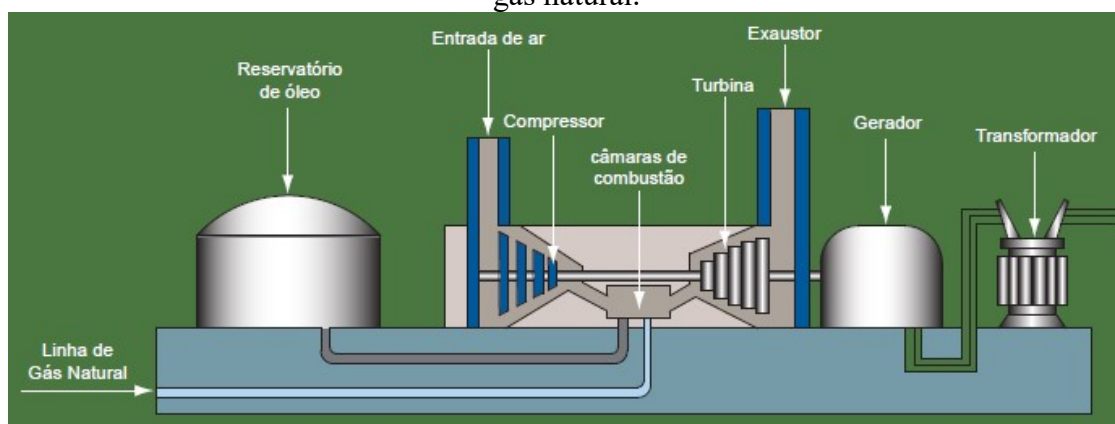
O gás natural no setor de transportes apresenta-se como a estratégia mais viável para o atendimento no curto e médio prazo de regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, principalmente nas grandes zonas metropolitanas. O uso em larga escala do GNV nas grandes cidades brasileiras é uma alternativa bastante realista e rapidamente disponível para a diminuição dos impactos ambientais negativos do setor de transportes (PRAÇA, 2003).

Ainda que atualmente o mercado de GNV esteja mais desenvolvido para veículos leves, ele também pode ser utilizado em veículos pesado. No entanto alguns outros fatores precisam ser avaliados relacionados a este assunto. O principal se remete à demanda de óleo diesel, seu principal concorrente para tal uso. Esta demanda é influenciada pelo cenário econômico, pela progressão dos modais de transporte e pela difusão do biodiesel (MELO; MEDINA, 2005).

2.1.3.5 Geração de Eletricidade

Se tendo uma disponibilidade de gás natural, é também favorável o seu uso para a geração de energia elétrica, cogeração e refrigeração, em processos complementares às demandas energéticas das indústrias, residências e estabelecimentos comerciais. Existem casos que a geração distribuída de energia pode representar não somente uma "energia complementar", mas sim a fonte única para suprir as demandas dos segmentos citados, por se localizarem distantes das redes de transmissão ou por precisarem de energia própria (MELO; MEDINA, 2005). A Figura 8 apresenta em forma de esquema como pode ser feita a geração de eletricidade por meio do GN.

Figura 8 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural.



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil. ANEEL (2008).

Por volta da década de 80, ocorreu uma grande transformação no paradigma tecnológico da geração elétrica mundial, principalmente nos países que não dispunham de amplo potencial hidrelétrico. A geração elétrica destas nações dependia de forma fundamental de centrais nucleares ou termelétricas, complementadas ainda por unidades de geração a gás natural para atender as demandas de pico. Contudo, as unidades de geração a gás natural começaram a ter um papel cada vez mais relevante. Grandes centrais elétricas alimentadas por gás natural passaram a ser construídas para operação na base, visando principalmente moldar o setor elétrico a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas e que estabelecem sérias restrições ao uso do óleo combustível, do diesel e do carvão (PRAÇA, 2003).

2.1.3.6 Cogeração

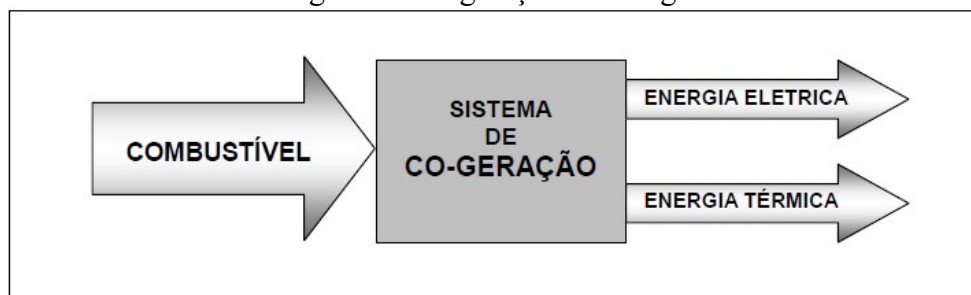
SANTOS (2002) define:

“A cogeração é a produção combinada de energia elétrica, através da produção de energia mecânica, e de energia térmica (produção de calor ou frio), a partir de uma única fonte de combustível. Para tanto, podem ser utilizados todos os tipos de resíduos industriais, bem como outros combustíveis que, normalmente, já são utilizados pelos processos industriais das empresas, tais como: gás natural, óleo combustível, óleo diesel ou biomassa”.

A cogeração pode ser obtida através de ciclos de vapor simples, em ciclos com turbinas a gás ou em ciclos com motores térmicos. No primeiro caso, empresas que possuem caldeiras para a geração de vapor podem mantê-las em funcionamento quando

o vapor não estiver sendo utilizado, e direcioná-lo para turbinas apropriadas que gerarão eletricidade. Dependendo das condições específicas, essa eletricidade poderá ser utilizada pela própria empresa (autoprodução) ou vendida para a companhia elétrica.

Figura 9 – Cogeração de energia.



Fonte: Brasil, 2005.

O processo de cogeração (Figura 9) apresenta muitos aspectos que motivam as empresas para esta alternativa. A primeira que vem à tona é quanto à redução de custos operacionais. Em muitas empresas a participação do custo de energia no custo final do produto pode ser muito grande e a possibilidade de aumentar a eficiência no aproveitamento da energia adquirida é sempre atraente (BRASIL, 2005).

2.2 Rede de Distribuição de Gás

2.2.1 Cadeia Produtiva do Gás Natural

2.2.1.1 Exploração

Relaciona todo o conjunto de tarefas destinadas à determinação da existência ou não de reservas de gás natural. Os principais aspectos deste elo da cadeia produtiva do gás natural são os elevados investimentos demandados, assim como o risco associado à atividade de prospecção. É nesta etapa que se realizam os estudos de viabilidade técnica e comercial do desenvolvimento dos poços produtores. (CHAVES, 2010)

A exploração, primeira vinculação da indústria de petróleo e gás natural, está dividida basicamente em pesquisa e perfuração. A pesquisa faz a verificação e o estudo das estruturas propícias ao acúmulo de hidrocarbonetos. Uma vez identificados todos estes fatores, é feita a perfuração do poço, para comprovar a existência desses produtos em nível comercial (CASTELANI, 2013).

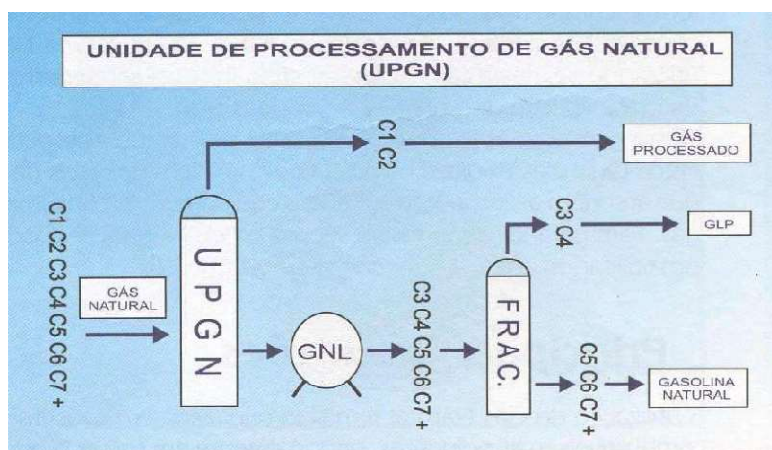
2.2.1.2 Produção

Quando produzido, o gás deve passar primeiramente por vasos separadores, que são equipamentos projetados para retirar a água, os hidrocarbonetos, que estiverem em estado líquido, e as partículas sólidas (pó, produtos de corrosão, etc.). Se estiver contaminado por compostos de enxofre, o gás é enviado para unidades de dessulfurização, onde esses contaminantes são retirados. Depois desse estágio, uma parte do gás é empregada no próprio sistema de produção, em processos conhecidos como reinjeção e gás lift, com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório. A outra parte do gás é enviado para processamento, que é a separação de seus componentes em produtos especificados e prontos para utilização (CASTELANI, 2013).

2.2.1.3 Processamento

Nesta etapa, segundo Castelani (2013), o gás é conduzido até as Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN) para ser tratado, como ilustrado na Figura 10. Nestas UPGN's, é realizada a separação das frações mais leves do gás natural e se obtêm o gás natural seco (metano - C1 e etano - C2), o Gás Liquefeito de Petróleo - GLP (propano - C3 e butano - C4) e a gasolina (pentano e superiores – C5 +).

Figura 10 - Esquema de uma UPGN.



Fonte: Castelani (2013).

Ao ser retirado de uma UPGN, o gás natural deve apresentar determinadas propriedades, que permitam sua utilização adequada. Nestas unidades, o gás é separado e a sua composição é padronizada, adequando-o ao consumo final. Através deste

processo, obtêm-se o gás natural processado, GLP e a gasolina natural (SILVESTRE, 2012).

2.2.1.4 Transporte

Castelani (2013) relata que no estado líquido, como gás natural liquefeito - GNL, o transporte pode ser efetuado por meio de navios, barcaças ou caminhões criogênicos, à baixas temperaturas (-160°C) e pressão próxima da atmosférica. Nessas circunstâncias, seu volume é reduzido cerca de 600 vezes. Logo, para ser utilizado, o gás deve ser revaporizado em equipamentos adequados.

No estado gasoso, o transporte do gás natural é feito por meio de gasodutos ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão (como gás natural comprimido - GNC). Em ambos os casos o transporte é realizado na temperatura ambiente e a altas pressões, as quais podem chegar a 230 bar em cilindros e 120 bar em gasodutos (CASTELANI, 2013). A Figura 11 mostra um pouco da estrutura de transporte de gás por gasodutos no país.

Figura 11 – Gasodutos no Brasil.



Fonte: ABEGÁS (2017).

Gasodutos são compostos por sistemas de compressão, redução de pressão, medição, supervisão e controle. Eles têm como finalidade colocar o gás natural à

disposição das Companhias Distribuidoras em pontos de entrega ao longo da linha de transporte, denominados "City-Gates" (CASTELANI, 2013).

2.2.1.5 Distribuição

A rede de distribuição é a fase final do sistema, consistindo na chegada do gás ao consumidor, que pode ser residencial, comercial, industrial e automotivo. Nesse estágio, o gás já deve atender a padrões rígidos de especificação e estar praticamente isento de impurezas, para não causar problemas aos equipamentos nos quais será utilizado como matéria-prima ou combustível. As redes de distribuição transportam volumes menores de gás natural a menores pressões, com tubulações de diâmetros menores que na rede de transporte. É esta rede que recebe o gás dos gasodutos e o leva até as indústrias e aos centros urbanos e por fim, até o consumidor final, através de ramificações menores de modo a atender os bairros ou distritos. (SILVESTRE, 2012)

Para o atendimento ao consumidor são implantados, pela companhia distribuidora, uma extensa rede de gasodutos, instalada ao longo de rodovias, ruas e avenidas levando o gás natural até os locais de consumo. Além da rede de distribuição o gás pode ser distribuído na forma comprimida (como GNC) em cilindros, ou ainda, liquefeito (como GNL). (CASTELANI, 2013)

2.2.2 Logística da Distribuição

É de grande importância que as distribuidoras de gás natural observem toda a diversidade de aspectos logísticos relacionados à distribuição física de produtos. Praça (2003) ressalta que para uma empresa, independentemente do seu ramo de atuação, determinar como distribuir os seus produtos, se faz necessário a formatação de um planejamento estratégico a fim de montar um sistema logístico integrando centros distribuidores, rotas de transporte, níveis de estoque e procedimentos para processar pedidos que contribuam para o sucesso do negócio. A partir disto, diversas decisões devem ser tomadas no sentido de definir:

- ✓ Onde as fábricas devem ser localizadas;
- ✓ Quais fornecedores deverão ser utilizados;
- ✓ Quantos centros de distribuição a empresa deve operar;
- ✓ Onde eles devem estar localizados;

- ✓ Que clientes ou zonas de mercado devem ser supridos de cada centro de distribuição;
- ✓ Que linhas de produto devem ser produzidas ou estocadas em cada fábrica ou centro de distribuição;
- ✓ Que modalidades de transporte devem ser usadas para suprimento e para distribuição.

As decisões relacionadas a estas questões são de responsabilidade da gestão empresarial e consistem nas políticas e linhas de ações adotadas para efetivar a atividade industrial, devendo ser analisadas conjuntamente e de forma sistêmica, pois como tais questões possuem forte interdependência, não podem ser vistas de forma sequencial ou segmentada (SILVESTRE, 2012).

Por sua vez, BALLOU (2009) afirma que o cliente é o foco central dos esforços empresariais. Sendo assim, o conhecimento prévio de suas características, o monitoramento de suas necessidades e a determinação das diferenças dessas necessidades é fundamental para a concepção da estratégia para melhor atendê-lo.

2.3 Alguns Estudos Anteriores

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos anteriores que abordam temáticas semelhantes a este estudo, onde tratam assuntos envolvendo redes de distribuição de gás, assim como metodologias que buscam a otimização e/ou expansão de redes.

Segundo Costa, Gouvea e Goldberg (2003), a grande responsabilidade de se projetar uma rede de distribuição do gás aumenta à medida que novos investimentos são realizados. Em seu trabalho é realizada uma investigação do uso das técnicas de otimização combinatória e de diversas técnicas da computação evolucionária, objetivando encontrar opções de traçado para atingir novos pontos e determinar o dimensionamento dos tubos da rede de distribuição em expansão, considerando o atendimento da demanda necessária e visando minimizar os custos envolvidos na implantação da rede.

Alves e Goldberg (2002) afirmam que a distribuição de gás natural é feita principalmente por frotas de veículos e redes fixas. No Brasil são poucas as regiões abastecidas por redes, dado seu custo elevado, e com o crescimento da demanda por gás

natural torna-se necessário otimizar sua política de distribuição e integrar, se possível, num só sistema essas estratégias. Logo, o trabalho feito por eles consiste em, dado um conjunto de clientes com suas demandas associadas, os custos de operação e a capacidade de uma frota de veículos de transporte, definir os clientes indicados a serem incorporados ao atendimento via rede ou serviço móvel. São também conhecidos os custos de implantação e operação da nova rede, que deverão ser extintos num dado intervalo de tempo. O trabalho tem como proposta abordar o problema por meio de uma heurística transgenética que pretende mesclar soluções que visem minimizar os custos sob a ótica de cada subsistema de atendimento, comparando seus resultados a outro algoritmo evolucionário.

De acordo com Bandeira (2005), a busca pela sustentabilidade e pela maior eficiência na oferta de energia tem direcionado à substituição gradual da energia elétrica pelo uso do Gás Natural no setor residencial. Em vista disso, a autora reporta um estudo que tem como finalidade a elaboração de uma metodologia de suporte à expansão da rede de distribuição de Gás Natural realizando uma análise da morfologia urbana obtida pela Sintaxe Espacial, melhorando a eficiência na construção de uma rede ao direcionar o atendimento para os locais onde se concentra a maior demanda de origem residencial. O trabalho em questão procura classificar e agrupar na área de estudo (parte da cidade de Fortaleza), fazendo considerações sobre algumas perspectivas de planejamento, as áreas de demanda residencial potencial, facilitando, assim, a determinação de caminhos de expansão da rede a serem priorizados, conforme critérios de cunho político e de mercado.

Na visão de Massara (2007), para a tomada de decisão para construção e ampliação das redes de infra-estrutura, devem ser considerados diferentes fatores para a priorização do atendimento a áreas que constituirão um mercado consumidor potencial para o serviço em questão. Portanto, a autora propõe a análise conjunta de aspectos sociais, técnicos e econômicos relacionados ao processo de ocupação dos grandes centros urbanos, no qual seria base de uma verificação de estimativas de mercado, custos e técnicas mais adequadas para a extensão da infra-estrutura de distribuição canalizada de Gás Natural. É sugerida a criação de um modelo que agregue a compreensão da dinâmica urbana às estratégias de ampliação da rede de distribuição de gás, identificando as possibilidades de consumo em faixas de atratividade.

A metodologia foi desenvolvida por Massara (2007) através da organização de quatro bancos de dados: aspectos sócio-econômicos, planejamento urbano, projeções de demanda por estratificação em tipos de uso do solo e sistema canalizado. Associando elementos sociais ao consumo estimado por tipo de ocupação do solo e aos aspectos de ramificação da rede, permitindo que a metodologia classifique cada distrito que integre uma cidade conforme a viabilidade (atratividade) de implantação da rede de distribuição de gás e os locais com potencial de adensamento da rede já existente. O modelo testado para o mercado no Município de São Paulo foi generalizado em sistema computacional, o que possibilita a sua utilização em outras cidades brasileiras, a fim de apontar a capacidade de o gás natural deslocar outras formas de energia final nos usos urbanos.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho busca realizar um estudo de caso que viabilize a expansão da rede de distribuição de Gás Natural em uma região de Fortaleza, através da identificação da demanda potencial e de um modelo de programação matemática que permita um projeto futuro com otimização de custos das instalações. Tem o propósito de verificar a validade da abordagem a se apresentar, trabalhando com a malha viária de uma área delimitada geograficamente, na qual será o bairro Dionísio Torres.

Esse capítulo irá salientar os métodos que serão desenvolvidos pelo estudo, onde primeiro é exposto o modelo de programação matemático a ser utilizado e posteriormente são descritos a forma como será construído o mapa e a definição de demandas potenciais da região. Por fim, são mencionados também os softwares que serão empregados e suas funcionalidades para o projeto.

3.1. Modelo de Programação Matemática

3.1.1 Problema não capacitado de fluxos com custos fixos nos arcos

Problemas de fluxo em redes são modelos com grande potencialidade de aplicação prática com empregos nas áreas de transportes, produção, hidráulica, dentre outras (HILLIER e LIEBERMAN, 1995; GOLDBARG e LUNA, 2005). Como exemplos desta classe de problemas de otimização, é possível ressaltar o problema do caminho mais curto entre dois pontos, o problema de fluxo máximo em uma rede e a árvore geradora mínima. Existe uma importante classe de problema de fluxo em redes nomeada pela literatura como *fixed-charge network flow problem*, ou, em português, problema de fluxo com custos fixos nos arcos (TEIXEIRA, PRATA e NOBRE JÚNIOR, 2009).

Dado um grafo $G = (V, E)$, sendo V o conjunto de nós existentes e E o conjunto de arestas existentes (ligações entre os nós), no qual há um custo fixo para implantação de cada aresta, ofertas e demandas de um determinado produto nos vértices. Diante disso, surge o questionamento: Como estabelecer uma rede que possibilite o fluxo de menor custo? A esse problema de otimização dá-se o nome de problema não capacitado de fluxos com custos fixos nos arcos (NCFCF). Pode-se, então, formular o seguinte modelo de programação inteira mista (CRUZ *et al.*, 2001):

Minimizar:

$$\sum_{(i,j) \in A} (c_{ij} \cdot x_{ij} + h_{ij} \cdot y_{ij}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in \delta^-(i)} y_{ji} - \sum_{j \in \delta^+(i)} y_{ij} = \begin{cases} -\sum_{k \in D} d_k, \forall i \in S, \\ 0, \forall i \in T, \\ d_i, \forall i \in D \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{ij} \leq \left(\sum_{k \in D} d_k \right) x_{ij}, \forall (i,j) \in E \quad (3)$$

$$y_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in E \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in E \quad (5)$$

Em que:

c_{ij} : custo fixo associado à implantação do arco (i,j) ;

x_{ij} : variável binária que igual à 0, se o arco (i,j) não é utilizado, sendo 1 caso contrário;

h_{ij} : custo variável por unidade de fluxo no arco (i,j) ;

d_k : demanda no nó k ;

y_{ij} : quantidade de fluxo no arco (i,j) ;

S : conjunto de nós de oferta;

T : conjunto de nós de passagem (nós de Steiner);

D : conjunto de nós de demanda;

A : subconjunto de V equivalente a $T \cup D$.

A função objetivo a ser minimizada reproduz o custo de implantação e de operação da rede. As restrições do tipo (2) asseguram a conservação de fluxo nos vértices do grafo. As restrições do tipo (3) garantem que exista fluxo apenas nos arcos em que a variável binária tem valor unitário. Já as restrições do tipo (4) certificam a não-negatividade das variáveis de fluxo, e, por fim, as restrições do tipo (5) tem relação com o caráter binário das variáveis de decisão. (TEIXEIRA, PRATA e NOBRE JÚNIOR, 2009)

A restrição de capacidade dos arcos serve apenas para forçar que o custo fixo seja incluído na função objetivo quando o fluxo é positivo. Problemas com esta característica são conhecidos como problemas de fluxo não capacitado (TEIXEIRA, PRATA e NOBRE JÚNIOR, 2009).

O NCFCF é um problema de programação inteira mista por que a variável x é binária e a variável y pode assumir valores contínuos de fluxo. Sua complexidade é do tipo NP-difícil e algumas referências sobre heurísticas para sua resolução podem ser encontradas em Goldbarg Luna (2005).

A literatura destaca inúmeras aplicações do problema de fluxo com custo fixo, como, por exemplo, projeto de circuitos elétricos, planejamento de redes de telecomunicações, projeto de utilidades (água, esgoto, drenagem, gás, óleo, energia elétrica, telefonia, fibra ótica, etc.), planejamento de redes de tráfego, dentre outras. (TEIXEIRA, PRATA e NOBRE JÚNIOR, 2009)

3.1.2 Problema da Árvore de Steiner (PAS)

Diversos problemas clássicos de otimização, como, por exemplo, o problema de Steiner e o problema de caminho mais curto em um grafo, são casos particulares do problema de fluxo com custos fixos nos arcos.

O Problema da Árvore de Steiner (PAS) é um problema de otimização proposto por Fermat no século XVII e a primeira solução foi proposta por Torricelli em 1640. O nome Steiner é devido a Jakob Steiner, que estudou e relatou esse problema como “Problema da Árvore de Steiner Euclidiana” e as soluções como “Árvore Geradora Mínima”. (SILVA, 2012)

O problema é caracterizado pela busca da árvore de amplitude mínima (*Minimum Spanning Tree* - MST) de um grafo $G=(V, E)$, sendo V o conjunto finito de nós e sendo $V' \subseteq V$ o conjunto de nós terminais (especiais), o qual deve ser relatado na solução final. Após encontrar MST $G'=(V_T, E_T)$, todos os nós terminais devem ser apresentados, e (SILVA, 2012):

- V_T deve conter todos os nós de V' ($V_T \subseteq V'$);
- G' deve ser um grafo conectado.

Quando V é representado por S (nós de Steiner) e T (nós terminais) tem-se:

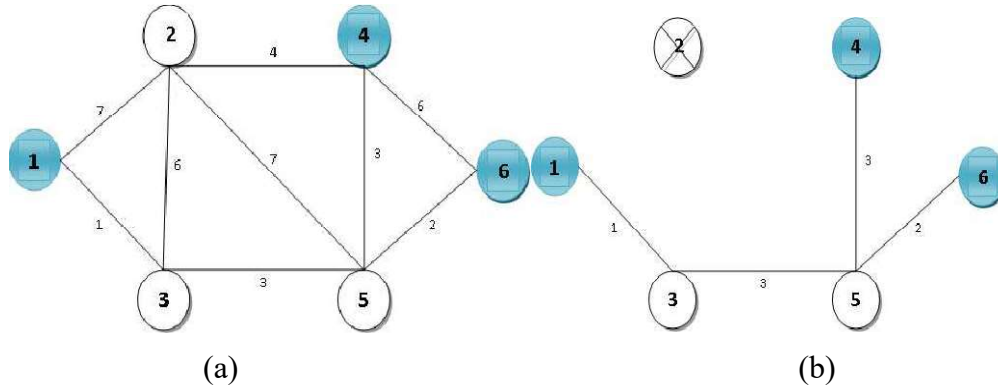
- $S \subseteq V$ e $T \subseteq V$
- $S \cup T = V$
- $S \cap T = \emptyset$

No exemplo da Figura 12, o grafo não direcionado é:

- $G=(\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \{1-2, 1-3, 2-3, 2-4, 2-5, 3-5, 4-5, 4-6, 5-6\})$

- $V' = (1, 4, 6)$
- $MST = (1-3, 3-5, 5-4, 5-6)$ com mínimo = 9.

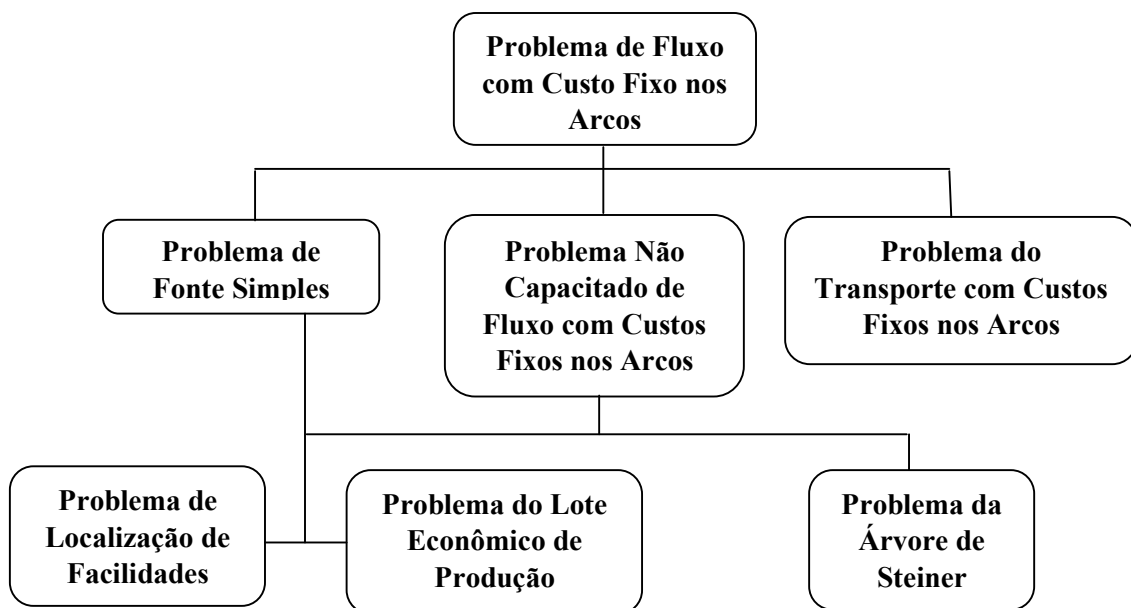
Figura 12 – Exemplo de grafo (a) e árvore geradora mínima (b).



Fonte: Silva, 2012.

O problema de Steiner é um caso particular do NCFCF, com $h_{ij} = 0$. A Figura 13 mostra um pouco mais da hierarquia desse tipo de problema.

Figura 13 – Hierarquia dos problemas de NCFCF.



Fonte: Adaptado de Teixeira, Prata e Nobre Júnior (2009).

3.2 Metodologia de Desenvolvimento

3.2.1 Edição do mapa

O mapa a ser produzido neste trabalho será de uma região da cidade de Fortaleza, mais especificamente do bairro Dionísio Torres (Figura 14). Segundo dados retirados do site da Prefeitura de Fortaleza (2017), a capital do Estado do Ceará possui hoje em dia uma destacada expressão econômica regional, tendo o maior Produto Interno Bruto (PIB) entre as capitais do nordeste e o 8º entre as do Brasil. A distribuição do Gás Natural em Fortaleza e demais municípios próximos atendidos se faz através de uma rede de gasodutos com cerca de 160 km e, com a construção do Gasoduto Guamaré-Fortaleza-Pecém, a CEGÁS proporcionou a seus clientes uma rede de distribuição com interligação desde Salvador, no Estado da Bahia, até Pecém, no Estado do Ceará, aumentando ainda mais a disponibilidade desse energético (CEGÁS, 2008).

Dadas essas informações, o estudo realizado neste trabalho tem uma grande relevância por buscar contribuir com o desenvolvimento da cidade e principalmente do bairro, em termos econômicos, energéticos e comerciais.

A estruturação de um mapa adequado para o que o estudo propõe necessita de informações muito atuais dos espaços a serem avaliados, como disposição de ruas e avenidas. Além de dados sobre a malha viária da região a ser estudada também é preciso se ter conhecimentos sobre os espaços urbanos, como áreas edificadas e possíveis áreas de preservação e de risco.

Figura 14 – Malha viária do bairro Dionísio Torres.



Fonte: Fortaleza em Mapas, 2017.

Para a construção do mapa é fundamental também a utilização do programa AutoCAD, ferramenta muito útil no desenvolvimento de projetos estruturais como este.

3.2.2 Identificação da demanda potencial de gás

Além da elaboração de um mapa, para que o estudo alcance seu objetivo é de extrema importância a identificação adequada de possíveis consumidores existentes no espaço de interesse. Os pontos de demanda podem ser definidos pelos estabelecimentos existentes que já façam o consumo regular de gás natural e por empresas/complexos residenciais que sejam potenciais consumidores caso essa priorização de distribuição seja feita de forma favorável ao seu uso.

Dessa forma, podem-se classificar esses pontos de demanda de acordo com o seu emprego e, para esse estudo, serão apontados dois grupos:

- Com utilização no setor automotivo: postos de combustível que comercializam GNV, já que possuem grande relevância no meio urbano;
- Com utilização nos setores comercial: dos usuários engloba hotéis, restaurantes, hospitais, creches, lavanderias e escolas. Edifícios comerciais com grande porte, universidades e shopping centers também podem adotar o ar condicionado central com tecnologia a gás natural. A opção mais econômica para um esquema de climatização é o ar condicionado central a gás natural, sendo uma boa alternativa para grandes estabelecimentos.

É possível identificar esses estabelecimentos através de uma pesquisa dos empreendimentos da região e tendo um critério de escolha para os locais que ainda não utilizam o GN.

A área de Fortaleza escolhida para o estudo, o bairro Dionísio Torres, não possui uma grande distribuição de gás natural em seu espaço, porém detém pontos de demanda relevantes para a análise e pontos de oferta já existentes, de acordo com as instalações da CEGÁS. Diante do exposto, justifica-se a escolha dessa região para o estudo de caso a ser realizado.

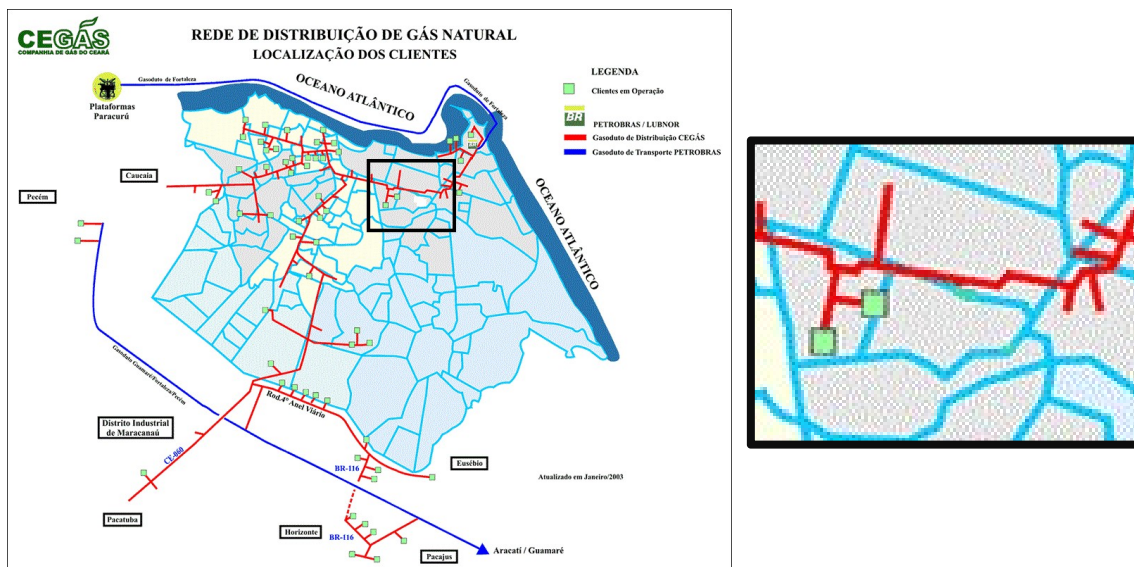
3.2.3 Softwares utilizados no projeto

O trabalho está desenvolvido principalmente com a utilização de dois softwares, onde um deles é o AutoCAD, que no primeiro momento se faz necessário

porque a identificação de demanda e aquisição de dados para a aplicação do modelo é realizada através da construção de um mapa, baseado na malha viária da região de interesse, e dos arcos que serão aplicados no modelo. Esse software é empregado geralmente para a elaboração de peças de [desenho técnico](#) e criação de modelos em duas dimensões (2D) e três dimensões(3D). Além dos desenhos técnicos, o software vem proporcionando, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos. É amplamente aplicado em ramos da [arquitetura](#), engenharia civil, [engenharia elétrica](#) e em vários outros campos da [indústria](#), assim como em projetos estruturais como este.

Já para a resolução do modelo de programação inteira mista apresentado na seção anterior, foi escolhido o software LINGO. Este software é uma ferramenta abrangente projetada para tornar a construção e resolução de modelos de otimização matemática mais fáceis e eficientes. O LINGO fornece um pacote completamente integrado que inclui uma linguagem desenvolvida para expressar modelos de otimização, um ambiente completo para criar e editar problemas e um conjunto de solucionadores internos rápidos capazes de resolver de forma eficiente a maioria das classes de modelos de otimização. Os principais recursos do LINGO incluem: linguagem de modelagem algébrica, modelar de forma interativa ou criar aplicativos *turnkey*, potentes solucionadores e ferramentas (*General Nonlinear Solver, Multistart Solver, Mixed Integer Solver, Simplex Solvers, Stochastic Solver, Quadratic Recognition Tools, Linearization Tools, Model and Solution Analysis Tools*, etc.). A utilização deste software é fundamental para a obtenção dos resultados.

Figura 17 – Mapa da Rede de Distribuição ofertada pela CEGÁS (direita) com destaque para as proximidades da região de interesse (esquerda).



Fonte: Adaptado de CEGÁS (2008).

Além dos pontos de demanda, também são importantes para a análise os pontos de oferta existentes na região. Para a aplicação do modelo, serão consideradas as instalações da CEGÁS nas imediações do bairro Dionísio Torres de acordo com a Figura 17.

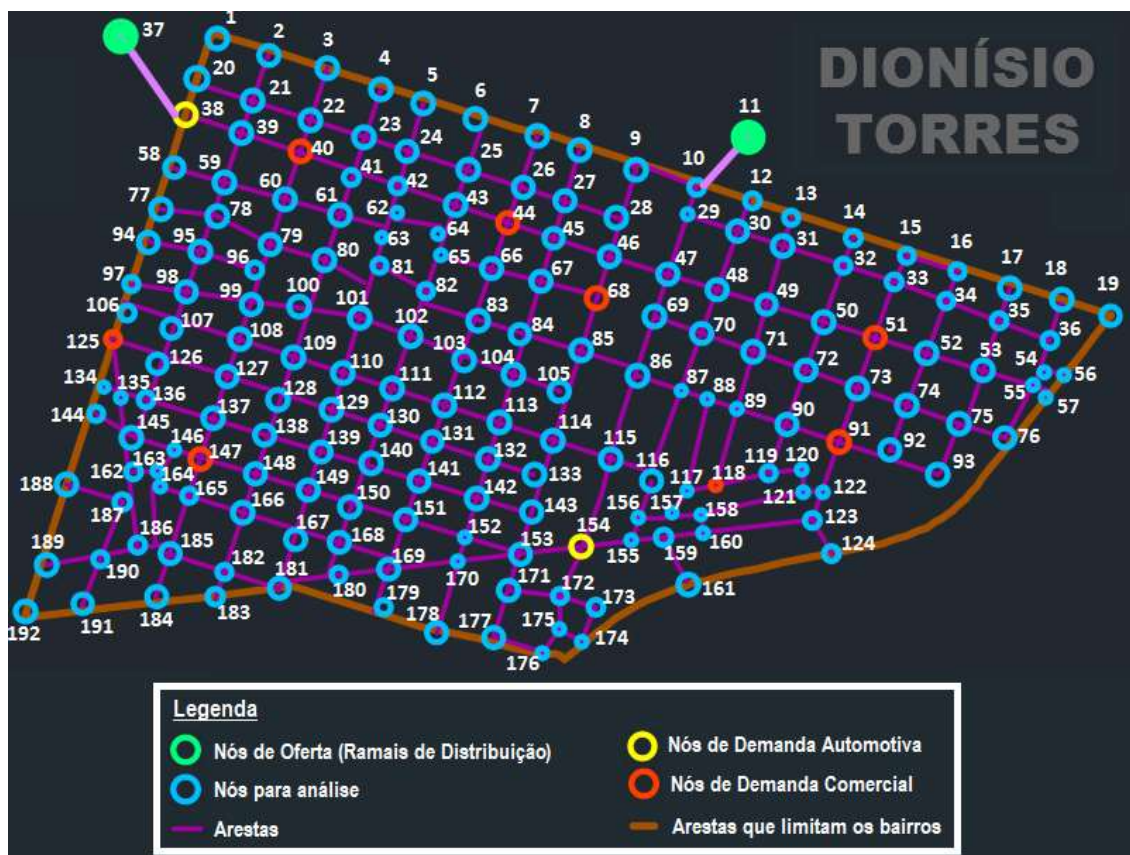
4.2 Aplicação do Modelo Matemático

4.2.1 Procedimentos iniciais

Sabendo que uma rede de distribuição de gás natural pode se expandir de acordo com a malha viária existente, foi desenvolvido um mapa específico, adaptado da região de interesse, para a aplicação do modelo, representado pela Figura 18. Neste mapa as vias são representadas por arestas, assim como os encontros das arestas são caracterizados por nós.

Os nós são os pontos enumerados de 1 a 192, dentre os quais estão diferenciados por cor em quatro categorias: nós de oferta em verde, nós para análise em azul, nós de demanda automotiva em amarelo e nós de demanda comercial em vermelho.

Figura 18 – Malha viária do bairro Dionísio Torres, adaptada para o estudo.



Fonte: Produzido pela autora.

Os ramais dutoviários já existentes nas proximidades do bairro que irão fornecer gás natural para os pontos de consumo. Logo, estes foram definidos como sendo os pontos de oferta. Na Figura 18, é possível visualizar que esses pontos de distribuição são os nós 11 e 37, onde se buscou uma adaptação dos locais de acordo com as informações contidas na Figura 17 e as necessidades de aplicação do modelo. O transporte de gás deve ser realizado de um ou de ambos os pontos de oferta estipulados.

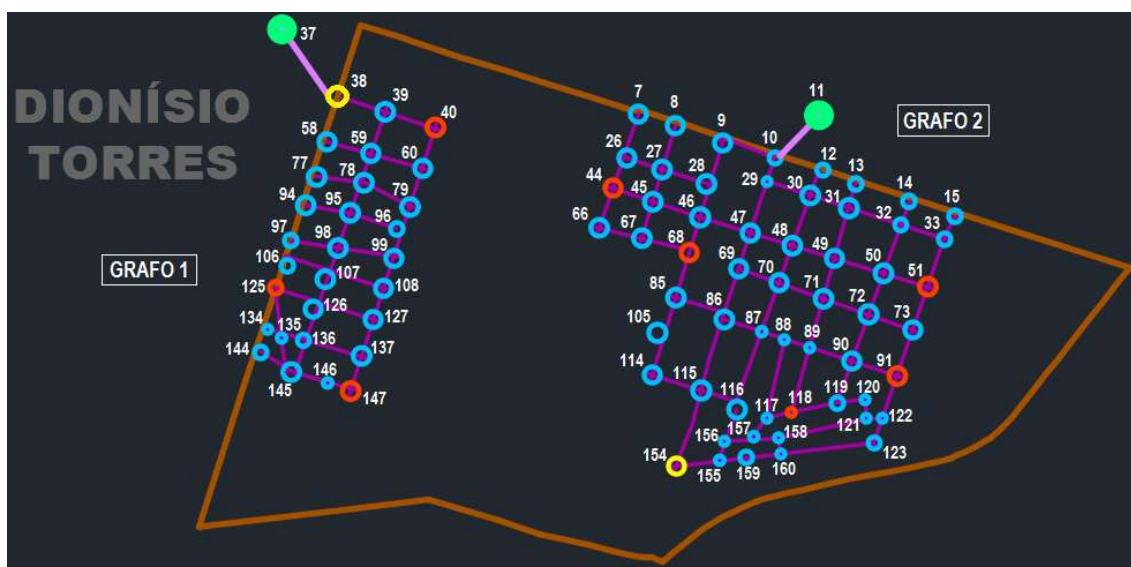
Fazendo a consideração dos pontos de demanda já determinados anteriormente, os nós de demanda automotiva serão os pontos 38 e 154 e os nós de demanda comercial serão os pontos 40, 44, 51, 68, 91, 118, 125 e 147. Os nós de análise são os demais pontos que serão avaliados pelo estudo, por onde será definido o caminho a ser seguido pelas tubulações de transporte de gás para que os custos sejam mínimos e todos os pontos de consumo atendidos, de forma otimizada.

4.2.2 Introdução dos recursos computacionais

Os dados de entrada do modelo são os arcos que representam as arestas do mapa mostrado na Figura 18. É possível notar que o esforço computacional para encontrar uma solução ótima vai depender diretamente do número de arcos do grafo, do qual reproduz a malha viária.

Como foram dispostos dois pontos de oferta, pela organização espacial dos nós de demanda em relação aos nós de oferta, foi analisada a possibilidade de dividir o grafo, com o intuito de melhorar a aquisição de resultados e diminuir a dificuldade do problema computacional. Isto se deve pelo problema de convergência percebido na obtenção da solução utilizando o grafo total, no qual o software não conseguiu apresentar resultados em tempo viável para o estudo. Com isso, o trabalho foi desenvolvido a partir de dois subgrafos originados do primeiro. Usando esse ajuste logístico, houve uma redução considerável da quantidade de arcos como consequência da divisão (Figura 19), já que foi verificado que algumas regiões do grafo não possuíam pontos de demanda em suas proximidades.

Figura 19 – Divisão do grafo em dois subgrafos.



Fonte: Produzido pela autora.

Para seguir sequência com o modelo, é necessária obtenção da matriz de adjacências do grafo em estudo, a qual determina as relações de conexão entre os vértices, bem como contém os comprimentos dos arcos do grafo.

A primeiro momento, utilizando o *software* Autocad, foi encontrado o comprimento de cada arco dos subgrafos da Figura 19. Os comprimentos foram

coletados a partir do mapa elaborado, dos quais tentam ser fieis a realidade, mas possuem caráter ilustrativo, apenas para utilização nesse trabalho. Em seguida foi criada uma planilha no Microsoft Excel, intitulada “Vetores Distância”, com os nós iniciais, os nós finais e o comprimento dos arcos, para cada arco do grafo. Dada a existência de dois grafos, foram elaborados dois vetores distâncias, como mostrado no Apêndice A.

Para o Grafo 1, foi constatado que o número de arcos é igual a quarenta e seis, implicando que a matriz de adjacências para este terá dimensão (46x46). Já para o Grafo 2, foi verificado que o número de arcos é igual a noventa, o que significa que a matriz de adjacências para este terá dimensão (90x90).

Após concluído este procedimento, foi criada uma outra planilha no Microsoft Excel para estruturar a matriz de adjacências correspondentes aos dados do “Vetor de distância”. Esta matriz, por condições de resolução do problema, deve ser quadrada e simétrica.

Com base nos vetores distância, são encontradas as relações de adjacência entre os nós, de forma que o elemento correspondente à linha do nó inicial e à coluna do nó final seja preenchido com a distância entre eles. A montagem da matriz foi realizada de forma sistemática, portanto, quando não houve ligação, ou seja, quando não se tinha arco interligando os dois nós, o elemento correspondente na matriz foi ocupado com o valor (-1).

Posteriormente, foram elaborados também os vetores oferta e demanda, dos quais os dois apresentam elementos com valores binários. No vetor de demanda, foi atribuído o valor zero para os elementos correspondentes aos nós que não representam pontos de demanda e, no caso contrário, os elementos assumem o valor um, de forma que o número de pontos de demanda é igual ao número de elementos que assumem o valor um. Para a construção do vetor de oferta, o procedimento é equivalente.

A fim de se obter a resolução do modelo de otimização combinatória apresentado, foi empregada a ferramenta computacional LINGO, *software* amplamente difundido no meio corporativo, destinado à modelagem de problemas de programação linear, inteira e não-linear, como descrito na seção 3.2.3.

Para que o LINGO possa processar os dados, é necessária a criação de um programa, correspondente ao modelo de estudo, que esteja na linguagem específica do *software*. Logo, a matriz de adjacências e os vetores de demanda e oferta são os dados de entrada do programa elaborado, no qual a resolução teve por base o Problema da Árvore de Steiner. Os dados de saída foram os arcos que apresentaram menores

distâncias, quantos foram necessários para a solução, as distâncias de cada um e o somatório mínimo da rede (conjunto de arcos).

4.2.3 Resultados obtidos

O software LINGO foi colocado em operação para os dois grafos, obtendo resultados particulares em cada situação de trabalho. Os resultados alcançados no Grafo 1 estão dispostos na Tabela 2 e de, forma análoga, os resultados para o Grafo 2 estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 – Resultados obtidos para o Grafo 1.

Grafo 1 - Resultados	
Nº de Arcos Resposta: 14	Arcos Resposta: 37-38, 38-39, 39-40, 40-60, 60-79, 79-96, 96-99, 99-108, 107-108, 106-107, 106-125, 108-127, 127-137 e 137-147.
Somatório Mínimo de Distâncias (m): 1455,91	

Fonte: Produzida pela autora.

Tabela 3 – Resultados obtidos para o Grafo 2.

Grafo 2 - Resultados	
Nº de Arcos Resposta: 19	Arcos Resposta: 10-11, 9-10, 9-28, 28-46, 45-46, 44-45, 46-68, 68-85, 85-86, 86-115, 115-154, 86-87, 87-88, 88-89, 89-118, 89-90, 90-91, 73-91 e 51-73.
Somatório Mínimo de Distâncias (m): 2234,21	

Fonte: Produzida pela autora.

Como solução, foi buscada não só a quantidade mínima de arcos, mas também foi analisado o somatório mínimo dos comprimentos dos arcos. Isto se deve pela importância dada as distâncias que serão percorridas no transporte do gás, o que implica diretamente no custo de todas as instalações, principalmente de tubulações.

A resolução do problema em questão também teve como objetivo a descrição do caminho a ser seguido, que seria exatamente a determinação de quais arcos representariam a resposta e quais direções seriam tomadas a partir de cada ponto.

A Figura 20 mostra os grafos já com a solução final alcançada. Nela é possível observar de forma mais clara a expansão da rede de distribuição de gás proposta pelo trabalho, que se encontra destacada em cor branca.

Figura 20 – Solução alcançada para o problema em estudo.



Fonte: Produzido pela autora.

De acordo com a divisão realizada, onde cada ponto de oferta (ramais de distribuição de gás já existentes) atende a um conjunto de pontos de demanda (consumidores potenciais), a solução encontrada conseguiu indicar a viabilidade de aplicação do modelo proposto.

É relevante destacar que os resultados ótimos alcançados valem para os grafos menores da maneira em que estão dispostos, pois não é possível garantir que essa também seria a melhor solução para o problema avaliado como um todo, usando o grafo maior como base dos procedimentos de cálculo (Figura 18).

5. CONCLUSÃO

A princípio, como análise da área de interesse, foi proposta a obtenção de um mapa para o desenvolvimento do estudo e a localização dos pontos de demanda e oferta de GN. O mapa com base na malha viária do bairro Dionísio Torres foi elaborado através do AutoCAD, que se demonstrou uma ferramenta muito eficiente na produção do projeto. Logo depois, na realização da pesquisa dos pontos de demanda, foi notável o desenvolvimento econômico da região, onde se detectou uma quantidade considerável de possíveis pontos de demanda, porém somente alguns foram escolhidos para o estudo.

Durante a aplicação matemática da teoria do Problema de Steiner, foi possível observar que o LINGO tem dificuldades no processamento quando se tem uma grande quantidade de dados de entrada, que era o caso do primeiro grafo proposto. Onde, para a obtenção de resultados, foi necessária uma estratégia de divisão logística do grafo mais complexo em dois mais simples e menores, diminuindo boa parte dos dados de entrada. Portanto, por meio da modelagem efetuada se alcançou uma maior compreensão da complexidade do problema e, além disso, foi verificado que esse processo pode ser aplicado também a redes urbanas, como em telecomunicações, captação de águas pluviais, entre outras.

É relevante salientar também que não é possível garantir que a solução apresentada seja a solução ótima do problema global, mas que é uma solução de boa qualidade, uma vez que é constituída pelas soluções ótimas dos subproblemas determinadas pela estratégia de decomposição.

A metodologia proposta neste trabalho indicou eficiência em termos de expansão da rede de distribuição através da identificação das demandas e ofertas de GN de forma geral. Diante de todas as aplicabilidades desse derivado do petróleo e de suas diversas vantagens frente a outros energéticos, um projeto ótimo incentiva esforços direcionados para o emprego de metodologias que possam ser mais econômicas. Sendo uma delas a programação matemática, um suporte que mostra uma boa utilidade em projetos de redes de infraestruturas.

Através deste trabalho, foi possível apontar as demandas potenciais existentes na região de estudo, avaliando seus pontos de consumo nos setores automotivo e comercial. Com isso, os resultados obtidos com o modelo, é viável uma

futura expansão da rede e o aumento da oferta de GN no bairro, influenciando assim na economia e trazendo mais desenvolvimento para a população local.

Sugere-se para pesquisas futuras, a análise de outros bairros de Fortaleza, que, como o Dionísio Torres, também não possui uma rede de distribuição de gás que atenda a sua demanda de forma suficiente. Da mesma forma, pode ser realizada a mesma análise com outras metodologias e usando outros modelos, buscando custos mínimos. Um estudo mais voltado para aspectos financeiros seria de grande utilidade também, avaliando principalmente os custos dos materiais necessários e das instalações de uma forma mais específica.

REFERÊNCIAS

ABEGÁS - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado.

Gasodutos. Sobre o Gás Natural. Disponível em:

<http://www.abegas.org.br/Site/?page_id=842> Acesso em: 23 de abril de 2017.

ANEEL.**Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Cap. 6 – Gás Natural. Parte III: Fontes Não-renováveis. Aneel, 2008. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap6.pdf>. Acesso em: 25 de março de 2017.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.** São Paulo: Editora Bookman, 2009.

Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural. Departamento de Gás Natural. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. Ministério de Minas e Energia. Edição nº 107, 2016.

Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural- Circulação Externa. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Edição nº 77, Janeiro 2017.

BP.**BP Statistical Review of World Energy.** June 2009;

BP. **BP Statistical Review of World Energy.** June 2016.

BRASIL, N. P. **Apostila de Cogeração. Notas de aula de cogeração do Curso de Engenharia de Equipamentos.** Universidade Federal Fluminense (UFF). Niterói, RJ. Edição de agosto de 2005. Disponível em:

<http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf>

Acesso em: 20 de abril de 2017.

CHAVES, F.S. **Otimização da Operação da Rede de Gás Natural para Suprimento das Termelétricas por Programação Não-Linear.** Departamento de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro – RJ. Janeiro, 2010.

COPERGÁS. **Geração Cogeração**. Vantagens. Disponível em: <<https://www.copergas.com.br/produtos/geracaocogeracao/>> Acesso em: 08 de maio de 2017.

CRUZ, F.R.B.; COLOSINO, E.A.; MATEUS, G. R. **Algoritmo para o problema não capacitado de fluxos com custos fixos nos arcos: uma comparação estatística**. Pesquisa Operacional, V.21, n.2, p.123-136, 2001.

Energy Information Administration - EIA; **International Energy Outlook 2009**; Estados Unidos da América, 2009

FARIA, L.F. R. **A Integração dos Mercados de Gás Natural e Energia Elétrica no Brasil**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte – MG, 2010.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to Operations Research**. United States of America: Editora McGraw-Hill, 1995.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Cogeração**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp> Acesso em: 08 de maio de 2017.

GÁSBRASILIANO. **Guia de Cogeração e Geração de Energia Elétrica a Gás Natural**. Programa P&D e C&R Ciclo 2014_2015. Disponível em: <<https://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/informacoes-tecnicas/arquivo/guia-de-cogeracao-formatado.pdf>> Acesso em: 08 de maio de 2017.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear – modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

MASSARA, V. M. **A Dinâmica Urbana na Otimização da Expansão da Infraestrutura de Gás Natural**. Tese (Doutorado – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MELO, O. **Despacho integrado da geração termelétrica e da produção e transmissão de gás natural**. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

MELO, M. S. M. e MEDINA, P. L. M. **Gás Natural: Análise Econômica da Demanda Focada no Setor Industrial.** Curso de Engenharia de Produção. Departamento de Engenharia Industrial. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

PETROBRAS. **Gás Natural Industrial.** Disponível em:
<<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/gas-natural-industrial/>> Acesso em: 12 de abril de 2017.

PRAÇA, E.R. (2003). **Distribuição de gás natural no Brasil: um enfoque crítico e de minimização de custos.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 159 fl.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **A cidade.** Disponível em:
<<https://www.fortaleza.ce.gov.br/a-cidade>> Acesso em: 3 de junho de 2017.

SANTOS, E. M. (2002). **Gás natural – estratégias para uma energia nova no Brasil.** Editora Annablume. 1ª ed. Rio de Janeiro/RJ;

SILVA, H. A. **Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento de Redes.** Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2012.

SILVESTRE, J. H. I. **A distribuição de gás natural canalizado.** Monografia de Conclusão do Curso de Ciências Econômicas. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis – RS, 2012.

SOUZA, F. J. R. **O setor de gás natural no mundo.** Nota Técnica. Consultoria Legislativa. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados – Centro de Documentação e Informação. Fevereiro, 2010.

TEIXEIRA, A. B. T. ; PRATA, B. A. ; NOBRE JÚNIOR, E. F. **Projetos de redes de distribuição de gás natural: uma abordagem baseada em programação matemática.** In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA REGIÃO NORDESTE, 4., 2009, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SEPRONe, 2009.

APÊNCICE A

**VETORES DISTÂNCIA DOS GRAFOS UTILIZADOS PARA A RESOLUÇÃO
DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**

Vetor Distância 1 - Arcos Grafo 1			
Qte	Nó Inicial	Nó Final	Tamanho do Arco (m)
1	37	38	209,89
2	38	39	124,89
3	38	58	99,91
4	39	40	127,38
5	39	59	109,9
6	40	60	107,75
7	58	77	116,49
8	58	59	106,85
9	59	60	129,03
10	59	78	71,98
11	60	79	97,86
12	77	78	119,86
13	77	94	71,13
14	78	79	124,7
15	78	95	82,99
16	79	96	64,65
17	94	95	107,72
18	94	97	93,58
19	95	96	129,38
20	95	98	88,87
21	96	99	67,62
22	97	98	113,91
23	97	106	49,87
24	98	99	136,57
25	98	107	60,28
26	99	108	78,52
27	106	107	110,99
28	106	125	70,32
29	107	108	136,1
30	107	126	79,78
31	108	127	79,25
32	125	126	111,09
33	125	134	120,78
34	125	135	101,85
35	126	127	140,77
36	126	136	95,69
37	127	137	96,62
38	134	135	39,1

Vetor Distância 1 - Arcos Grafo 1 cont.			
Qte	Nó Inicial	Nó Final	Tamanho do Arco (m)
39	134	144	64,64
40	135	136	59,39
41	135	145	86,87
42	136	137	142,01
43	136	145	82,87
44	137	147	84,07
45	144	145	106,24
46	145	147	151,97
84	155	156	49,4
85	155	160	151,46
86	156	157	71,96
87	157	158	54,39
88	158	121	217,45
89	158	160	37,54
90	160	122	227,37

Vetor Distância 2 - Arcos Grafo 2			
Qte	Nó Inicial	Nó Final	Tamanho do Arco (m)
1	7	8	96,44
2	7	26	111,44
3	8	9	124
4	8	27	123,71
5	9	10	131,36
6	9	28	120,91
7	10	11	141,39
8	10	29	59,58
9	10	12	119,36
10	12	13	105,16
11	12	30	68,86
12	13	14	116,6
13	13	31	68,77
14	14	15	115,28
15	14	32	58,98
16	15	33	43,57
17	26	27	100,29
18	26	44	78,67
19	27	28	122,89
20	27	45	80,52
21	28	46	70,61
22	29	30	110,56
23	29	47	119,91
24	30	31	97,8
25	30	48	127,98
26	31	32	132,04
27	31	49	128,53
28	32	33	109,95
29	32	50	125,43
30	33	51	122,44
31	44	45	100,07
32	44	66	105,57
33	45	46	121,31
34	45	67	91,54
35	46	47	131,32
36	46	68	89,6
37	47	48	105,91
38	47	69	90,51
39	48	49	107,39
40	48	70	95,98

Vetor Distância 2 - Arcos Grafo 2 Cont.			
Qte	Nó Inicial	Nó Final	Tamanho do Arco (m)
41	49	50	125,4
42	49	71	100,5
43	50	51	114,34
44	50	72	111,29
45	51	73	110,18
46	66	67	105,47
48	67	68	120,28
49	68	85	113,37
50	69	70	105,52
51	69	86	127,65
52	70	71	113,6
53	70	87	131,2
54	71	72	117,79
55	71	89	131,97
56	72	73	115,83
57	72	90	118,57
58	73	91	127,78
59	85	86	130,02
60	85	114	196,72
61	86	87	97,31
62	86	115	179,28
63	87	88	58,01
64	87	116	167,19
65	88	89	62,6
66	88	117	199,17
67	89	90	105,79
68	89	118	169,7
69	90	91	114,43
70	90	119	105,51
71	91	122	108,76
72	114	115	123,94
73	115	116	92,81
74	115	154	190,49
75	116	156	103,32
76	117	118	69,27
77	117	157	44,65
78	118	119	114,26
79	119	120	69,7
80	120	121	46,76

Vetor Distância 2 - Arcos Grafo 2			
Cont.			
Qte	Nó Inicial	Nó Final	Tamanho do Arco (m)
81	121	122	43,65
82	122	123	62,29
83	154	155	103,78
84	155	156	49,4
85	155	160	151,46
86	156	157	71,96
87	157	158	54,39
88	158	121	217,45
89	158	160	37,54
90	160	122	227,37