

UM ESTUDO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE DUTOS DE GÁS

Wagner Corrêa da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Luiz Satoru Ochi, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2008

DA SILVA, WAGNER CORRÊA

Um Estudo do Problema de Dimensionamento de Dutos de Gás [Rio de Janeiro] 2008
XIII, 113 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Produção, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Gasodutos

2. Heurística

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

À Deus por tudo. Obrigado meu Deus por me dar tanta perseverança!

Ao Professor Virgílio, por todas as oportunidades a mim concedidas, pela força e incentivo, pelo exemplo de educador. Muito obrigado!

Ao Professor Edmar, por ser um mestre tão solícito aos seus alunos. Muito obrigado!

Aos meus pais Walter e Aneide por todo o amor, por minha educação e pelos exemplos; as minhas irmãs: Luzinete, Lindinalva, Wanderléa, Maria e Vera pela atenção e carinho; aos meus irmãos: Carlos e Marcos por sempre me apoiarem; aos meus sobrinhos por serem tão especiais. Amo todos vocês!

À Josiane, meu amor, por todo companheirismo e paciência, por sentir as minhas dores em tantos momentos angustiantes. Você é muito especial! Eu te amo!

Aos amigos do mestrado: Debora, Luciana, Renato, Samuel, Victor, Geiza, Maria e Vinícius. Pelo companheirismo, pela força nos momentos difíceis (que momentos!?), pelas horas de estudo juntos. Vocês são demais! Obrigado por tudo!

À Josiane Baldo e Reginaldo, pela presença constante, pela amizade, pelas palavras de incentivo. Adoro vocês! Muito obrigado!

À Valmária, Fernando e Cleide, pela amizade e pelos conselhos. Obrigado por fazerem parte da minha vida!

À Vanessa e Roberta pelos conselhos e dicas. Muito obrigado!

À Cássia pelas sugestões. Muito obrigado por sua disponibilidade!

Aos amigos da graduação(Riedson, Edinelço, Fabrício, Vanessa, Gerliane, Miguel, Elenilson, Gyslane, Josiane, Nágila, Renato, Telau, Thiago, Paulo, Lessandro) pelas trocas de experiência, pela força e amizade ao longo desses anos. Obrigado por compartilharem de tantos momentos comigo! Vocês são o estopim deste sonho!

Aos amigos Luzia, Marcelo, Lana, Nelson, Adelmo, Tereza, Fidel pela amizade e

força durante esta caminhada, por trazerem mais alegria à nossa vida de estudante. Muito obrigado!

Aos professores da banca examinadora: Laura e Luiz Satoru. Muito obrigado por aceitarem o convite de participar da banca examinadora!

Aos colegas da Pesquisa Operacional Paulo Jorge, Milena, Emília, Edson, Valdir e Marcelo pelas dicas e apoio. Muito obrigado por tudo!

Aos funcionários do programa de Engenharia de Produção-COPPE, em especial a Andréia Lima e Eliana que muito me ajudaram ao longo desses dois anos. Muito obrigado!

Aos amigos da Casa do Estudante/São Mateus-ES: Allan, Expedito, Geraldo, Alexandre, Emílio, Jucélio, Fabíola, Valéria, Thaís, Neuza, Josiana, Simone, Marinalva, Fernanda. Muito obrigado pelas experiências compartilhadas!

Aos professores da graduação: Joccitiel, Jamil, Rocha, Bea Karla. Muito obrigado à todos pela confiança e incentivo!

As bandas Anjos de Resgate, Vida Reluz e Banda Dom. Pela musicalidade divina presente em vários momentos desta caminhada.

À Wagner, Melissa e Herbert, pelas instâncias gentilmente fornecidas. Muito obrigado!

À Agência Nacional do Petróleo (ANP), através do Programa de Recursos Humanos n.º 21 - Programa de Ensino: Economia, Planejamento Energético e Engenharia de Produção na Indústria do Petróleo e Gás (PRH-21), pelo fomento financeiro indispensável para a realização deste trabalho. MUITÍSSIMO obrigado!

Enfim, à todos que me ajudaram nesta caminhada árdua. Muito obrigado!

”‘Eu vejo a vida melhor no futuro...’” (Lulu Santos)

Com todo amor, para:
Aneide e Walter, meus pais;
e para Josiane, minha namorada.

Resumo da Dissertação apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM ESTUDO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE DUTOS DE GÁS

Wagner Corrêa da Silva

Junho/2008

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Edmar Luiz Fagundes de Almeida, D.Sc.

Programa: Engenharia de Produção

O gás natural vem sendo usado de modo crescente como fonte de energia. É considerado como um forte competidor para as outras fontes energéticas, devido às vantagens que apresenta. Há, porém, dificuldades para efetuar o seu transporte e sua distribuição, sendo esta etapa considerada uma das mais complexas na cadeia de suprimentos.

Dentre todas as formas para movimentação do gás, uma das mais convenientes é aquela feita por meio de redes de gasodutos. O duto é o principal componente de uma rede e o seu diâmetro determina a quantidade de gás que pode passar por um trecho em um determinado período de tempo. O custo de aquisição do duto é uma função crescente do diâmetro.

Portanto, este trabalho apresenta um estudo do Problema de Dimensionamento de Dutos em Rede de Distribuição de Gás e apresenta uma resolução aproximada para o mesmo utilizando uma metaheurística GRASP.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Wagner Corrêa da Silva

June/2008

Advisors: Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Edmar Luiz Fagundes de Almeida, D.Sc.

Department: Production Engineering

Natural gas has been used so as growing source of energy. It is regarded as a strong competitor for other energy sources, because of the advantages it presents. But there are difficulties to make its transport and distribution, this step is considered one of the most complex in the supply chain.

Among all forms for handling gas, is one of the most convenient made it through pipeline networks. The product is the main component of a network and its diameter determines the amount of gas that can go through a stretch in a certain period of time. The cost of acquiring the product is a function increasing the diameter.

Therefore, this work presents a study of the problem of Dimensioning Pipeline in Gas Distribution Network and provides a resolution to the even using a metaheurística GRASP.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Relevância do Estudo	4
1.3 Estrutura do Trabalho	5
2 Logística do Gás Natural	6
2.1 Introdução	6
2.2 Composição do Gás Natural	6
2.3 Aspectos da Logística do Gás Natural	9
2.3.1 Exploração	9
2.3.2 Exploração	10
2.3.3 Produção	10
2.3.4 Processamento	11
2.3.5 Armazenamento e Transporte	12
2.3.5.1 Transporte Dutoviário	12
2.3.5.2 Transporte Rodoviário	14
2.3.5.3 Transporte Marítimo	16
2.3.6 Distribuição	20
2.4 Mercado Brasileiro de Gás Natural	22
2.5 Conclusão	23
3 Problema de Dimensionamento de Redes de Gás	25
3.1 Introdução	25
3.2 Equações que modelam o fluxo	25
3.2.1 Perda de Carga	28
3.3 Questões de projeto de redes de distribuição	30
3.4 Revisão Bibliográfica	33
3.5 Conclusão	43
4 Aplicação da Metaheurística GRASP	44
4.1 A Metaheurística GRASP	44
4.1.1 Fase de Construção	46

4.1.2	Fase de Busca Local	49
4.2	Modelagem Matemática do Problema	50
4.3	Grasp para o PDDG	55
4.3.1	Solução Inicial	56
4.3.2	Busca Local	58
4.3.3	Entrada dos dados	60
4.4	Conclusão	68
5	Experimentos Computacionais	69
5.1	Introdução	69
5.2	Dados de Entrada	69
5.3	Resultados	71
5.4	Conclusão	82
6	Conclusão	83
	Referências Bibliográficas	85
	Apêndices	88
A	Instâncias utilizadas	88

Lista de Figuras

2.1	Localização do gás no subsolo	7
2.2	Sistema de Operação de um gasoduto	14
2.3	Evolução da Malha de Gasodutos	15
2.4	Infra-estrutura dutoviária de gás natural no Brasil.	16
2.5	Operação de descarga de GNL	17
2.6	Características de um sistema de GNL	18
2.7	Função de custos entre o GNL e o GNC	19
2.8	Comparação entre os custos de transporte por gasodutos, navios de GNC e navios de GNL.	20
2.9	Diagrama do gasoduto	21
2.10	Evolução da oferta de gás natural no Brasil em 2006/2007	22
2.11	Evolução da demanda por gás natural no Brasil em 2006/2007.	23
2.12	Evolução das vendas	23
3.1	Formação do custo dos dutos	33
4.1	Configuração de uma rede em árvore com única fonte	50
4.2	Construção da solução inicial	56
4.3	Construção da solução inicial	57
4.4	Busca por melhoria da solução inicial	60
4.5	Violação de restrição	62
4.6	Solução obedecendo duto de upstream	62
4.7	Ramificação com os diâmetros definidos	63
4.8	Solução melhor da Ramificação	65
4.9	Solução melhor	67
5.1	Melhores resultados para instância berlin52	72
5.2	Melhores resultados para instância st70	72
5.3	Melhores resultados para instância eil76	73
5.4	Melhores resultados para instância rat99	73
5.5	Melhores resultados para instância kro100	74
5.6	Melhores resultados para instância eil101	74
5.7	Melhores resultados para instância pr107	75
5.8	Melhores resultados para instância pr130	75
5.9	Melhores resultados para instância pr144	76
5.10	Melhores resultados para instância kro200	76

5.11	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	77
5.12	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	77
5.13	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	78
5.14	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	78
5.15	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	79
5.16	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	79
5.17	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	80
5.18	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	80
5.19	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	81
5.20	Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb	81
5.21	Comparação soluções GRASP básico X Heurística de Rothfarb	82

Lista de Tabelas

2.1	Percentual de Produção de Gás Natural - 2006	11
4.1	Pseudocódigo da Metaheurística GRASP	46
4.2	Pseudocódigo Refinado da Fase de Construção	48
4.3	Pseudocódigo da Fase de Busca Local	49
4.4	Dados referentes aos diâmetros	51
4.5	Queda de pressão por perda de carga, duto 24,3 mm	54
4.6	Queda de pressão por perda de carga, duto 155,6 mm	55
4.7	Lista $\beta = 0,5$	58
4.8	Escolha dos candidatos a Lista	59
4.9	Fragmento da Matriz R - Entrada dos dados	61
4.10	Solução inicial para uma ramificação	64
4.11	Solução com redução de diâmetro	66
4.12	Solução com melhoria	66
5.1	Teste para escolha do parâmetro beta	71
5.2	Comparação GRASP X Heurística de Rothfarb	82

Capítulo 1

Introdução

A utilização do Gás Natural no Brasil teve início na década de 1940, com as descobertas de óleo e gás na Bahia. Houve um grande impulso a partir da década de 1980, com a descoberta da Bacia de Campos no Rio de Janeiro, e posteriormente em meados da década de 1990, com a construção do gasoduto Bolívia X Brasil.

Tanto no Brasil quanto em todo o mundo o gás natural tem uma crescente importância para o desenvolvimento econômico. Ele assume papel fundamental na modernização e no aumento da competitividade do parque industrial brasileiro.

O gás natural pode ser usado para fins industriais, comerciais, automobilísticos, residenciais e na geração termelétrica. Dentre as fontes de energia primária mais utilizadas¹, vem ocupando posição de destaque por ser mais seguro, de fácil manuseio e com reduzida emissão de gases poluentes. Surge como excelente opção para a redução de custos e agressões ao meio ambiente, facilita o uso de processos e equipamentos mais eficientes, e é uma fonte de energia muito recomendada pelo Protocolo de Kyoto.

O seu transporte e distribuição é uma atividade logística complexa, que exerce importante papel na composição dos custos que definem o preço final do produto ao consumidor.

Para atender a demanda de energia proveniente de combustível é necessária uma adequada infra-estrutura para levar o gás à residências, indústrias e postos automotivos. Atualmente no Brasil tal infra-estrutura é muito pouco desenvolvida.

Os gasodutos representam uma das formas mais convenientes para realizar o trans-

¹ biomassa, hidroelétrica, nuclear, petróleo e carvão

porte (transmissão) e a distribuição do gás. Eles podem levar o gás desde seu ponto de produção até as empresas distribuidoras.

Embora não exista nenhum mercado onde o gás natural seja essencial, ele é um forte competidor para as outras fontes de energia. Dentre as muitas vantagens que apresenta destacam-se:

- Diversificação da matriz energética;
- Disponibilidade ampla, crescente e dispersa;
- Redução do uso do transporte rodo-ferro-hidroviário;
- Geração de energia elétrica junto aos centros de consumo;
- Baixa presença de contaminantes;
- Rápida dispersão de vazamentos;
- Emprego em veículos automotivos, diminuindo a poluição urbana;
- Combustão facilmente regulável;
- Elevado rendimento energético;
- Admite grande variação do fluxo;
- Pagamento após o consumo;
- Custo bastante competitivo com outras alternativas;
- O gás natural, por ser limpo, não entope os dutos e injetores, além de poder ser queimado diretamente, obtendo-se uma combustão completa.

Para atender ao crescimento da demanda de gás natural exigida pela necessidade de desenvolvimento do país, é fundamental que se tenha garantia de suprimento e preços competitivos com os demais energéticos concorrentes. Para isto é necessário criar condições para atração de novos agentes para o setor e, conseqüentemente, de mais investimentos e diversificação das alternativas de fornecimento, o que é fundamental à garantia deste produto. Isso será conseguido quando se definir com precisão as

atribuições e limites de cada elo da cadeia produtiva da indústria do gás, atacando pontos que sejam obstáculos para investimentos no setor. (ABEGAS 2006)

O índice de consumo do energético no Brasil vem aumentando de forma significativa desde a década de 1970, quando atingia 0,1%. Hoje a participação do gás no setor energético é de 9,4% segundo dados da ABEGÁS (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado). Para continuar crescendo vários, fatores deverão ser levados em consideração, tais como: investimentos na área de produção, oferta crescente e regular do produto, regulamentação do preço, divulgação do seu poder de impacto ambiental e maior investimento na ampliação da malha.

O projeto de uma rede de gás envolve a definição da topologia, as questões econômicas e ambientais da região, entre outras considerações. Uma vez feito isso, deve-se escolher os tipos e os diâmetros dos dutos a serem utilizados para que sejam atendidas as demandas dos usuários da rede. Os diâmetros escolhidos devem ser suficientes para garantir que cada ponto de demanda possua uma certa pressão mínima com o menor custo possível. Este é um problema complexo e que envolve a consideração de muitas restrições. O custo desta fase do projeto corresponde à soma dos custos de aquisição dos dutos e, também, os custos de desapropriação do terreno por onde estes irão passar.

(IAMASHITA, GALAXE, ARICA, JUSTINIANO & IACHAN 2005) relatam que o problema de planejamento de movimentação de gás de uma rede integrada de produção e escoamento é complexo, envolvendo um grande número de variáveis operacionais e restrições. Isto não é diferente quando se trata do dimensionamento dos dutos que compõem as redes para movimentação do gás, são inúmeras as restrições. (CASTRO, FRANÇA, IAMASHITA, DIAS, PORTO & SILVA 2000) explicam que tradicionalmente os modelos matemáticos na área de gás natural são grandes consumidores de dados devido a grande quantidade de equipamentos que compõem a malha de escoamento e também devido a complexidade das características destes equipamentos.

1.1 Objetivos

A decisão acerca da implantação de infra-estruturas de distribuição de gás natural é de natureza estratégica, pois envolve recursos significativos, e seus efeitos econômicos são de longo prazo (PRAÇA 2003). Portanto o objetivo deste trabalho é desenvolver

uma ferramenta computacional que possa auxiliar no projeto de redes de distribuição de gás natural.

Pelas características do gás natural e sua crescente utilização na matriz energética, outras estratégias de suprimento tais como o transporte por meios rodoviários, ferroviários e marítimos, também devem ser estudadas, no entanto o estudo destas alternativas foge ao escopo deste trabalho.

O objetivo geral deste trabalho é estudar o Problema de Dimensionamento de Dutos de Gás (PDDG). Neste estudo foi acrescentada a resolução aproximada do problema utilizando a metaheurística GRASP em algumas instâncias encontradas na literatura.

1.2 Relevância do Estudo

Este trabalho foi motivado pela crescente participação do gás natural na matriz energética brasileira, pelas recentes descobertas e pela pouca literatura que trata do assunto transporte e distribuição de gás natural.

Conforme (FERRARO 2006), a rede de infra-estrutura de um país é essencial e fundamental para o seu crescimento econômico e social. Incluem-se no conjunto da rede de infra-estrutura de uma sociedade as utilidades públicas como os serviços de transporte, coleta de lixo, telecomunicações, água, esgoto e gás, e os serviços públicos como as rodovias e os sistemas de irrigação e drenagem.

Neste contexto, algumas regiões do país não possuem uma infra-estrutura de distribuição de gás ou a infra-estrutura encontra-se em expansão. O estudo do problema de dimensionamento dos dutos através de técnicas de otimização combinatória contribui, na fase de projeto, para redução dos custos de aquisição e implantação dos dutos.

Como dito anteriormente, além de abordar sobre a infra-estrutura de distribuição de gás esta pesquisa propõe a resolução aproximada de um problema de otimização considerado de alta complexidade computacional. O estudo contribui para o aprimoramento das técnicas heurísticas de solução de problemas de otimização aplicados a um sistema de grande importância, como as redes de distribuição de gás natural.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta de forma sucinta, os aspectos logísticos e de mercado do gás natural. Compreende aspectos técnicos e critérios de projeto para a rede de gás. Enfatiza o segmento de transporte e distribuição, que é a base do estudo para a implementação do algoritmo proposto. No capítulo 3 descrevem-se as equações que modelam o fluxo de gás na rede, são levantadas questões de projeto, e apresenta-se uma revisão bibliográfica do assunto. O capítulo 4 descreve a metaheurística GRASP. O capítulo 5 apresenta a aplicação do GRASP ao problema. O capítulo 6 apresenta os experimentos computacionais. O capítulo 7 engloba os comentários finais.

Capítulo 2

Logística do Gás Natural

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar os aspectos da cadeia de suprimento do gás natural concentrando-se nos processos logísticos associados, especialmente na atividade de distribuição, que é o foco desta dissertação.

2.2 Composição do Gás Natural

Assim como o petróleo, o gás formou-se em jazidas subterrâneas como resultado da decomposição de sedimentos naturais ao longo de muitos milhares de anos. Esse gás formado, hoje, é extraído de rochas sedimentares porosas e permeáveis, cobertas por estratos impermeáveis que impedem a saída deste para o exterior. Observe sua localização no subterrâneo na figura (2.1).

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos e outros compostos químicos e é freqüentemente acompanhado por petróleo, por isso é chamado muitas vezes de gás associado.

O gás associado está dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás¹. Assim, a produção de gás é determinada basicamente pela produção de óleo. Já o gás não associado está livre ou em presença de quantidades muito pequenas de óleo. Neste caso só se justifica comercialmente produzir o gás.

¹Parte superior da acumulação rochosa, onde a concentração de gás é superior à concentração de outros fluidos como água e óleo

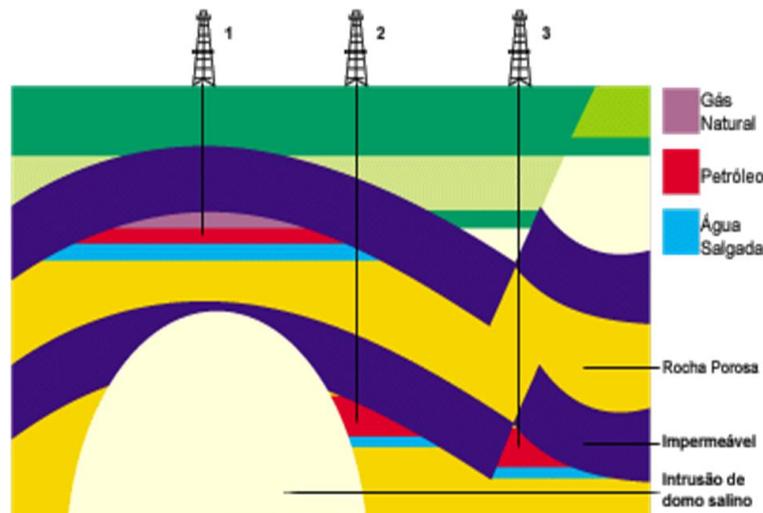


FIGURA 2.1: Localização do gás no subsolo

A composição do gás pode variar bastante, de campo para campo, o que depende da associação ou não ao óleo e também de ter sido ou não processado em unidades industriais. É composto predominantemente de metano, etano, propano e, em menores proporções, de outros hidrocarbonetos de maior peso molecular. Normalmente apresenta baixos teores de contaminantes, como nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre.

Seu manuseio requer alguns cuidados, pois ele é inodoro, incolor, inflamável e asfixiante quando aspirado em altas concentrações. Para facilitar a identificação de vazamentos, geralmente, na etapa da distribuição, compostos à base de enxofre são adicionados ao gás em concentrações suficientes para lhe dar um cheiro marcante, mas sem lhe atribuir características corrosivas ou prejudiciais à saúde, num processo conhecido como odorização.

O gás natural caracteriza-se por sua eficiência, limpeza e versatilidade. É utilizado em indústrias, no comércio, em residências, em veículos e na geração termelétrica. É altamente valorizado em consequência da progressiva conscientização mundial da relação entre energia e o meio ambiente.

As especificações do gás brasileiro para consumo são ditadas pela Portaria nº. 128 de 28 de agosto de 2001, emitida pela ANP, segundo a faixa de poder calorífico. O gás comercializado no Brasil, a menos da Região Norte e Nordeste tem as seguintes especificações:

- Poder Calorífico Superior (PCS) a 0 °C e 1 atm: 38.100 a 46.000 KJ/m^3 e 10,58 a 12,78 KWh/m^3 ;
- Índice de Wobbe: 49.600 a 56.000 KJ/m^3 ;
- Metano, %volume: 86,0 (mínimo);
- Etano, %volume: 10,0 (máximo);
- Propano, %volume: 3,0 (máximo)
- Butano e mais pesados, %volume: 1,5 (máximo);
- Oxigênio, %volume: 0,5 (máximo);
- Inertes ($N_2 + CO_2$), %volume: 4,0 (máximo);
- Nitrogênio, %vol.: 2,0 (máximo);
- Enxofre total: 70 mg/m^3 (máximo);
- Gás Sulfídrico H_2S : 10 mg/m^3 (máximo);
- Ponto de orvalho da água a 1 atm: -45 °C (máximo);
- Isento de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos.

Segundo a (ANP 2006), as principais descobertas de gás natural aqui no Brasil ocorreram na Bacia de Campos-RJ, bacia sedimentar onde se encontra a maior concentração de campos gigantes do país, tais como Albacora, Marlim e Roncador, na Bacia de Solimões-AM, onde se encontram o Pólo de Urucu, onde todo o gás é reinjetado, e a jazida de Juruá, ainda sem aplicação comercial e mais recentemente, em 2003, a descoberta de uma reserva gigante em Santos no litoral de São Paulo.

É importante observar que o volume de gás natural produzido não é disponibilizado para venda em sua totalidade, uma vez que parte do volume extraído é destinado a:

- Consumo próprio - utilizado para suprir as necessidades das instalações de produção;

- Queima e perda - volume extraído do reservatório que foi queimada ou perdida ainda na área de produção, este valor deve atender ao limite superior imposto pela ANP;
- Reinjeção - parcela do gás natural produzido que é injetada de volta nos reservatórios;
- LGN - hidrocarbonetos mais pesados (etano, GLP - Gás Liquefeito de Petróleo e gasolina natural) extraídos do gás natural nas plantas de processamento.

2.3 Aspectos da Logística do Gás Natural

Em linhas gerais, a cadeia de suprimento do gás natural pode ser dividida nas seguintes atividades interligadas (ALONSO 1999):

- Exploração;
- Exploração;
- Produção;
- Processamento;
- Transporte e Armazenamento;
- Distribuição.

As atividades relacionadas à exploração, exploração, produção e processamento são chamadas de *upstream*. Enquanto as atividades relacionadas ao armazenamento, transporte e distribuição são denominadas atividades de *downstream*.

2.3.1 Exploração

A exploração é a etapa inicial do processo de *upstream* e consiste de duas fases: a pesquisa, onde são feitos o reconhecimento e o estudo das estruturas propícias ao acúmulo de hidrocarbonetos, e a perfuração de poços, para comprovar a existência desses produtos em nível comercial.

Esta etapa congrega as atividades de aplicação de ferramentas de avaliação do potencial gasífero de uma região geográfica, estudos geológicos, e a determinação da viabilidade comercial de se produzir o campo.

2.3.2 Exploração

Nesta etapa serão desenvolvidas as atividades de projeto das instalações para permitir a operação comercial do poço e as atividades de perfuração, completação e re-completação, que compreende a colocação das cabeças de vedação, válvulas, comandos remotos e demais acessórios que permitirão a produção dentro dos padrões de segurança.

2.3.3 Produção

Até este ponto as indústrias de petróleo e gás natural caminham juntas. Nesta etapa acontecem as atividades de produção, processamento em campo e o transporte até a base de armazenamento ou estação de recompressão mais próxima para o caso de campos *offshore*.

Ao ser produzido, o gás deve passar inicialmente 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.). Neste ponto se estiver contaminado por compostos de enxofre, o gás é enviado para unidades de dessulfurização, onde esses contaminantes serão retirados. Após essa etapa, uma parte do gás é utilizada no próprio sistema de produção, em processos de reinjeção e gás lift², com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório. O restante do gás é enviado para processamento, que é a separação de seus componentes em produtos especificados e prontos para utilização.

A produção do gás natural pode ocorrer em regiões distantes dos centros de consumo e, muitas vezes, de difícil acesso, como, por exemplo, a floresta amazônica (Bacia de Solimões) e a plataforma continental. Por esse motivo, tanto a produção como o

²Gas Lift: gás comprimido a alta pressão que é injetado na coluna de produção em uma determinada profundidade para elevação artificial, isto é, para diminuir o gradiente de pressão da coluna de óleo. O gás lift aumenta a produção de óleo, o que contribui para o aumento da receita do sistema de compressão. (IAMASHITA, 2005)

TABELA 2.1: Percentual de Produção de Gás Natural - 2006

Produção de Gás Natural por Unidade da Federação - 2006										
Estado	RJ	AM	BA	RN	AL	ES	SE	SP	CE	PR
Percentual	46.2	19.1	10.8	6.7	5.8	5.1	3.5	2.0	0.6	0.2

Fonte: (ANP, 2006)

transporte normalmente são atividades críticas do sistema. Em plataformas marítimas, por exemplo, o gás deve ser desidratado antes de ser enviado para terra, para evitar a formação de hidratos, que são compostos sólidos que podem obstruir os gasodutos. Outra situação que pode ocorrer é a reinjeção do gás para armazenamento no reservatório, se não houver consumo para o mesmo, como na Amazônia.

Este é o segmento da cadeia de gás natural com maiores potencialidades competitivas. A concorrência na indústria de gás natural depende de garantir que a competição na produção de gás se repercuta nos mercados consumidores finais do produto, ou seja, depende do número de produtores independentes aos quais os consumidores domésticos têm acesso. Para ampliar o número de produtores independentes é necessário que os grandes consumidores contratem diretamente o gás natural sem precisar do intermediário da distribuidora. A presença de economia de escala no transporte e na distribuição limita a possibilidade de concorrência nestes seguimentos. Sendo assim, a competição no setor de gás natural é basicamente na produção e em segundo plano ocorre no transporte e distribuição.

Atualmente, dez estados da Federação possuem sistemas de produção de gás natural, sendo o Rio de Janeiro o estado com maior produção, veja a relação na tabela (2.1).

2.3.4 Processamento

Nesta etapa, o gás segue para unidades industriais, conhecidas como UPGN - Unidades de Processamento de Gás Natural, onde será desidratado (isto é, será retirado o vapor d'água) e fracionado (retirar as frações pesadas), gerando as seguintes correntes: metano e etano (que formam o gás processado ou residual); propano e butano (que formam o GLP ou gás de cozinha); e um produto na faixa da gasolina,

denominado C5+ ou gasolina natural.

2.3.5 Armazenamento e Transporte

A atividade de armazenamento do gás natural não é comum no Brasil, entretanto nos países de clima frio, é feito o armazenamento em cavernas subterrâneas durante o verão para formar os estoques reguladores para o inverno.

O transporte e a distribuição são considerados a etapa crítica da cadeia de suprimentos.

Um dos aspectos que mais caracteriza o gás natural é a possibilidade de seu estado físico ser adaptado às condições de transporte desde a zona onde é produzido até a região onde será consumido.

Geralmente, o gás natural pode ser transportado por meio de dutos, caminhões e navios.

No estado gasoso, o transporte do gás natural é feito por meio de dutos ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão (como GNC - gás natural comprimido). No estado líquido (como GNL - gás natural liquefeito), o gás pode ser transportado por meio de navios, barcaças e caminhões criogênicos.

Esta etapa constitui o gargalo da rede de gás natural e sobre este atuam as políticas de livre acesso. O ideal destas políticas seria garantir aos consumidores finais a escolha entre os diferentes produtores.

2.3.5.1 Transporte Dutoviário

De acordo com o CTGAS(Centro de Tecnologia do Gás), o transporte de granéis, por gravidade ou pressão mecânica, através de dutos adequadamente projetados à finalidade a que se destinam, é chamado de transporte dutoviário. A pressão mecânica é regulada por meio de compressores.

Os dutos utilizados para o transporte são de aço especial de grande resistência e durabilidade e devem estar totalmente soldados para evitar vazamentos. São revestidos com um material adesivo plástico para impedir a corrosão, o que o torna bastante seguro.

Segundo (BORELLI, NAKA & OLIVEIRA 2001) o gasoduto é o meio mais conve-

niente para realizar o transporte ininterrupto de gás natural *onshore* e para distribuí-lo aos consumidores finais. Este tipo de transporte é composto por gasodutos, sistemas de compressão, redução de pressão, medição, superfície e controle, com a finalidade de colocar gás natural disponível às companhias distribuidoras em todos os pontos de entrega localizados ao longo da diretriz³. Nos pontos de entrega existem os *city gates*, que é um conjunto de instalações contendo *manifolds* e sistema de medição, destinados a entregar o gás natural as distribuidoras. A partir dos *city gates* inicia-se a rede de distribuição de gás, cuja responsabilidade pertence integralmente à Companhia Distribuidora.

O fluxo de gás dentro dos tubos sofre uma perda de energia por atrito, fazendo com que a pressão caia gradativamente, por isso é necessária a instalação de estações de compressão ao longo da malha, para elevar a pressão e permitir a continuidade do fluxo. A figura(2.2)⁴ mostra esquematicamente esta operação. Na parte superior, está indicada a variação da pressão, ela vai caindo ao longo da tubulação, tornando necessária uma estação de compressão para elevá-la e assim, sucessivamente até o ponto de destino.

Os gasodutos representam a maior parte dos dutos do Brasil e destinam-se ao transporte de gases entre centros produtores e centros consumidores. Na figura (2.3) observa-se a evolução desta malha ao longo dos últimos anos.

Na figura (2.4) é apresentada a infra-estrutura dutoviária de gás natural existente no Brasil atualmente.

Dentre os projetos desenvolvidos pela Petrobrás, no sentido de massificar o uso do gás natural, deve-se destacar o Projeto Malhas, que tem por objetivo a expansão do sistema de transporte de gás a alta pressão no país, visando fundamentalmente ampliar e interligar a malha de gasodutos das regiões Nordeste e Sudeste, para o atendimento da demanda por gás das usinas termelétricas constantes do Programa Prioritário de Termelétricidade(PPT).

³Linha básica do caminhamento do gasoduto. Na maioria dos gasodutos, fora das áreas urbanas, coincide com a linha de centro da faixa de domínio. (ABNT 1990) A faixa de domínio é uma área de terreno de largura definida, ao longo da diretriz do gasoduto situado fora da área urbana, legalmente destinada à sua instalação e manutenção, ou faixa destinada, pela autoridade competente, ao gasoduto na área urbana

⁴Fonte:(MARTINEZ & ABREU 2003)

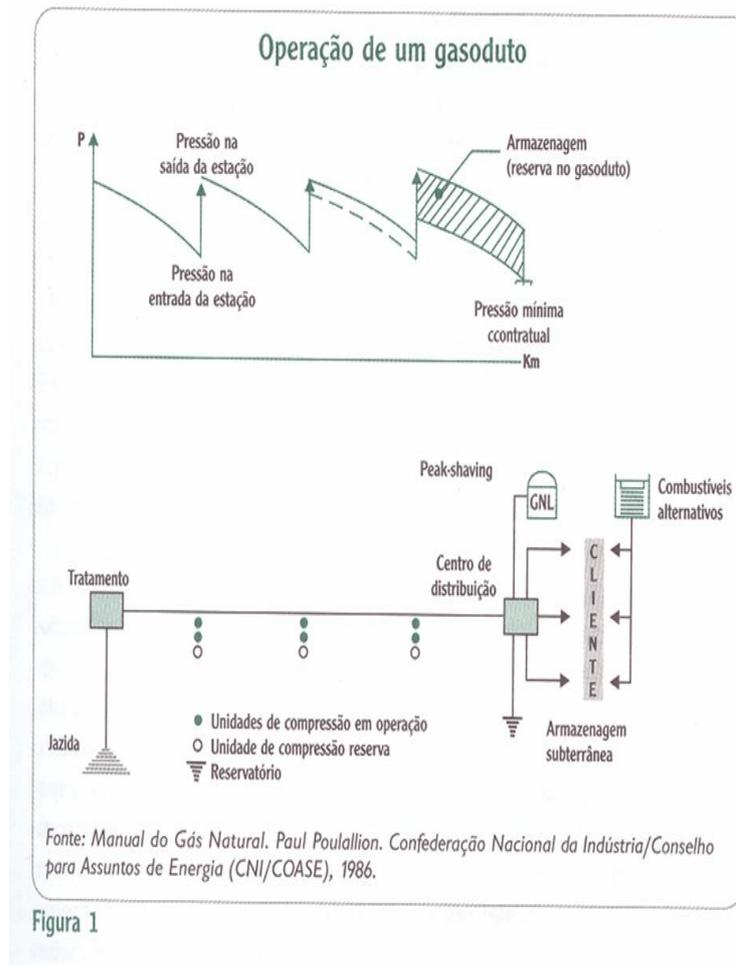


Figura 1

FIGURA 2.2: Sistema de Operação de um gasoduto

2.3.5.2 Transporte Rodoviário

Quando as quantidades e as distâncias a percorrer são pequenas, o transporte do gás no estado gasoso comprimido pode ser feito por barcaças ou caminhões-feixe, armazenado em feixe tubulações. Este meio de transporte pode compor também ao chamado hoje de gasoduto virtual, que segundo (ANICETO, CORTEZ & DIÓGENES 2004) é um sistema que permite o transporte de gás natural por meio de carretas e módulos acoplados a plataformas móveis, onde este gás é comprimido em cilindros que são transportados em caminhões, balsas ou plataformas ferroviárias. Quando o produto chega no local de destino, o módulo é conectado a uma estação de descompressão e, assim, o gás está pronto para ser consumido.

Uma outra alternativa é o transporte do gás natural sob a forma de compostos derivados, que é muitas vezes a forma mais econômica, uma vez que ele é transformado

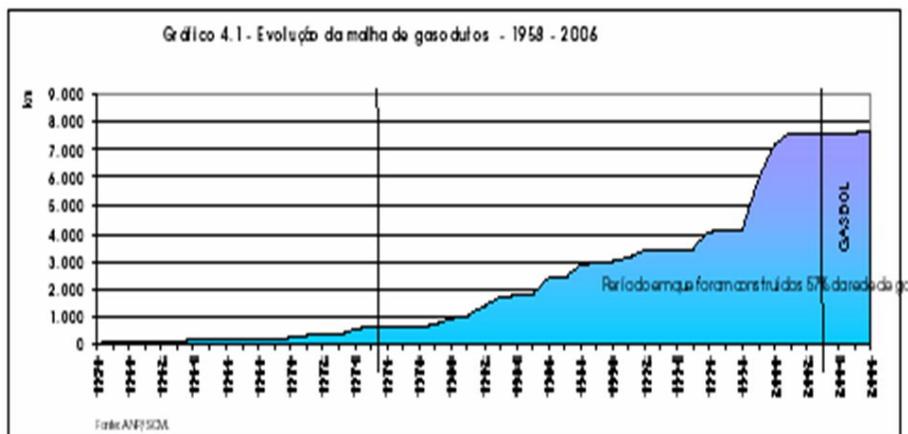


FIGURA 2.3: Evolução da Malha de Gasodutos

em produtos líquidos ou sólidos, que têm custo de transporte menos oneroso.

Uma das soluções mais utilizadas é a produção de metanol (ou álcool metílico), combustível líquido de alto poder calorífico, muito usado em vários países. No Brasil, há restrições quanto ao seu uso como combustível, por apresentar agressividade no contato com as pessoas; sua ingestão, mesmo em pequenas proporções, é perigosa, pois causa envenenamento mortal. É muito mais agressivo que o álcool etílico - álcool da cana-de-açúcar (que também causa envenenamento, em doses maiores).

No extremo sul do Chile, próximo à Terra do Fogo, onde há grandes reservas de gás natural, existe uma das maiores plantas produtoras de metanol do mundo, que exporta principalmente para os Estados Unidos, pois o consumo chileno deste produto é muito pequeno. Unidades similares foram implantadas na Venezuela e em Trinidad e Tobago.

Também é bastante comum a produção de fertilizantes nitrogenados junto à região de produção do gás natural, utilizando-o para fixar o nitrogênio do ar. Outros compostos químicos podem ser assim produzidos, visando a redução dos custos do transporte.

Há pouco tempo apareceu a possibilidade de produzir combustíveis líquidos - gasolina, querosene, óleo diesel - a partir do gás natural. Esta tecnologia, conhecida em língua inglesa pela sigla GTL (gas to liquids), é a aplicação de um processo conhecido há décadas (Síntese de Fischer-Tropsch), modernizado pela empresa americana Syntroleum. Há uma grande expectativa com o sucesso desta alternativa, que está recebendo grandes investimentos, pois ela permitiria viabilizar o aproveitamento de reservas de gás natural afastadas dos centros de consumo para uso como combustíveis convencionais.



FIGURA 2.4: Infra-estrutura dutoviária de gás natural no Brasil.

2.3.5.3 Transporte Marítimo

Somente o GNL possui viabilidade econômica para o transporte de gás natural em navios, mesmo assim apenas para grandes volumes e distâncias. Os navios são do tipo apresentado na figura (2.5), esta mostra o momento de descarga do combustível de um navio supridor para um navio tipo SRV (Shuttle and Regasification Vessel).

Os navios que levam o GNL das unidades de liquefação⁵ aos pontos de regaseificação⁶ dispõem de reservatórios termicamente isolados, capazes de suportar a temperatura do gás durante o transporte, não havendo refrigeração na viagem. Além disso, o GNL é normalmente usado como combustível, e uma pequena parte volta com o navio para manter o tanque frio.

Geralmente os navios que fazem o transporte marítimo possuem capacidade para transportar 135.000 m^3 de GNL de uma vez e os que fazem o transporte fluvial através de barcaças ou navios de pequeno porte possuem capacidade que varia de 600 a 6.000

⁵A unidade de liquefação é o elemento central de um projeto de GNL, é nela onde a temperatura do gás é reduzida a -161°C , ponto em que ele se torna líquido, com uma redução de volume de cerca de 600 vezes. Compõem-se basicamente de uma unidade de tratamento, do conjunto de trocadores de calor e dos tanques de armazenagem.

⁶Seus principais elementos são os tanques de estocagem e os regaseificadores.

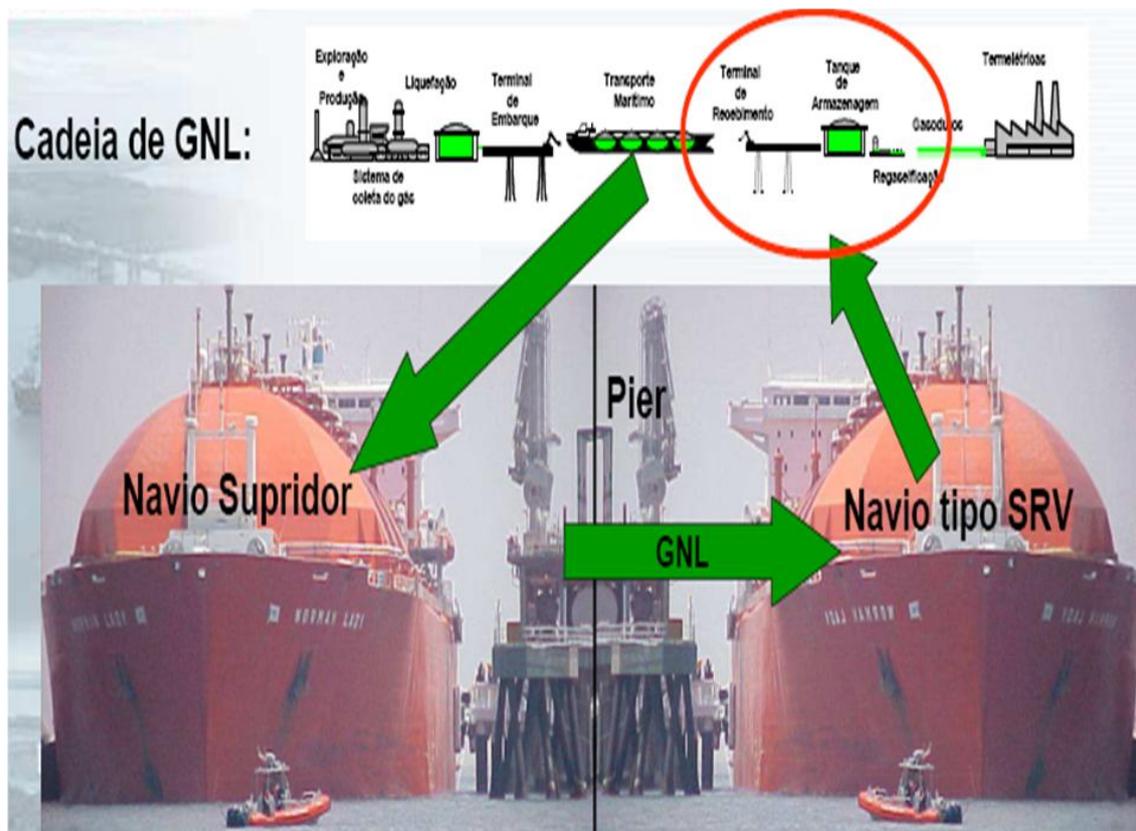


FIGURA 2.5: Operação de descarga de GNL

m^3 de GNL. No terminal marítimo o GNL é armazenado em tanques criogênicos e o gás é enviado ao sistema de transporte dutoviário, depois de passar pelos pontos de regaseificação.

Um projeto de GNL é uma seqüência de atividades que vão desde o reservatório de gás até o usuário final. Na figura (2.6)⁷ é apresentado um resumo dos principais elos desta cadeia: produção do gás, liquefação, transporte marítimo, regaseificação no destino e distribuição, até chegar ao usuário final.

Atualmente o transporte de GNC é feito por carretas ou trens, para atender regiões que não são atendidas por gasodutos. Porém existem projetos de construção de navios para transporte de GNC. O navio GNC visa atender uma demanda que não se justifica ou não é possível a construção de gasodutos, e que os navios GNL não são economicamente viáveis. A idéia é transportar quantidades menores que as transportadas por navios GNL e por distâncias menores.

No sistema de transporte via GNC, primeiramente retira-se o gás natural em um

⁷Fonte:(?)

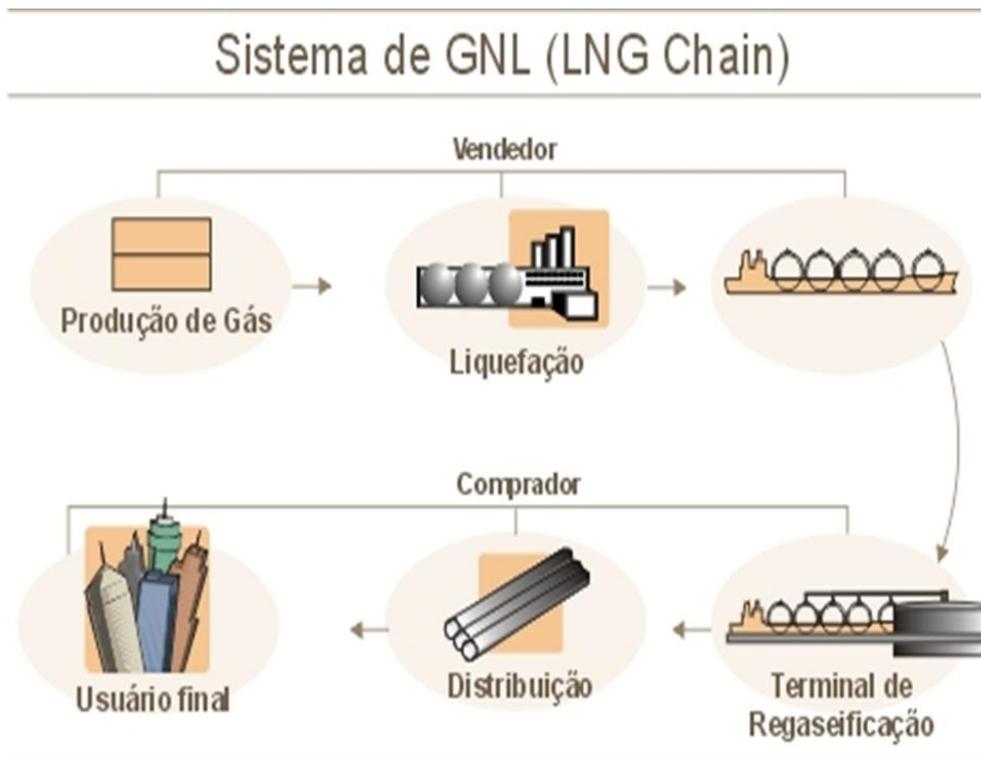


FIGURA 2.6: Características de um sistema de GNL

ponto de coleta do gasoduto. Em seguida, comprime-se o gás através de uma estação de compressão até encher o reservatório, para depois transportar o gás até o ponto de consumo. Após o transporte, será feita a transferência do gás dos reservatórios para um ponto de armazenamento no destino final.

O transporte de GNC por navios, ainda em fase de projeto, irá contribuir para uma maior flexibilidade em relação aos atuais modais de transporte. Os custos operacionais e a eficiência do transporte serão os grandes destaques dos navios GNC.

Os custos de transporte do GNL têm como principal variável a distância entre o terminal de exportação e o terminal de importação para uma determinada demanda. A função custos é crescente em relação à distância. O figura (2.7) faz um comparativo de custos entre estes dois modais.

A figura (2.8) apresenta a viabilidade comparativa em termos de distância do mercado consumidor e volume de produção entre gasodutos, navios de GNC e navios de GNL.

Diferentemente da importação de gás através de gasodutos, o GNL pode ser comprado no mercado mundial em contratos flexíveis, de acordo com a necessidade de

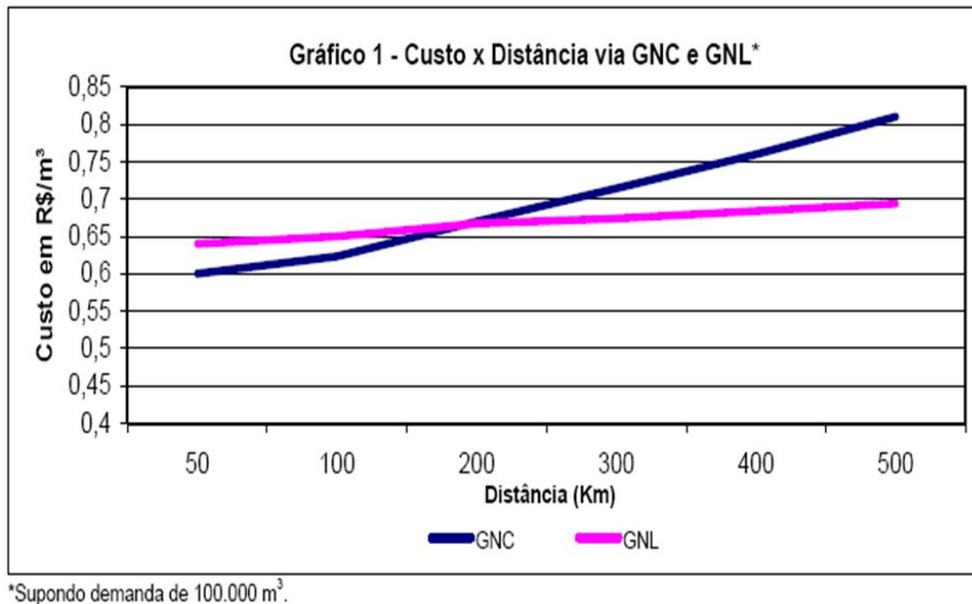


FIGURA 2.7: Função de custos entre o GNL e o GNC

suprimento. Outra vantagem: o período seco no Sudeste-Nordeste do Brasil (maio a outubro), quando é maior a probabilidade de aumento da demanda brasileira por GNL, para alimentação das usinas termelétricas, coincide com o período de menor demanda no Hemisfério Norte (verão), quando diminui a necessidade de uso de gás natural para calefação.

Enfim, para atender a demanda brasileira de gás natural, há a necessidade de transportá-lo a grande distância, sendo assim, estudos técnico/econômicos devem ser realizados para indicar quais os sistemas mais adequados de transporte, o que envolve a análise dos seguintes aspectos, (BORELLI et al. 2001):

- Distância Envolvida;
- Trajeto;
- Demanda;
- Custo do Gás;
- Custo do Investimento;
- Custo Financeiro;
- Meio Ambiente;

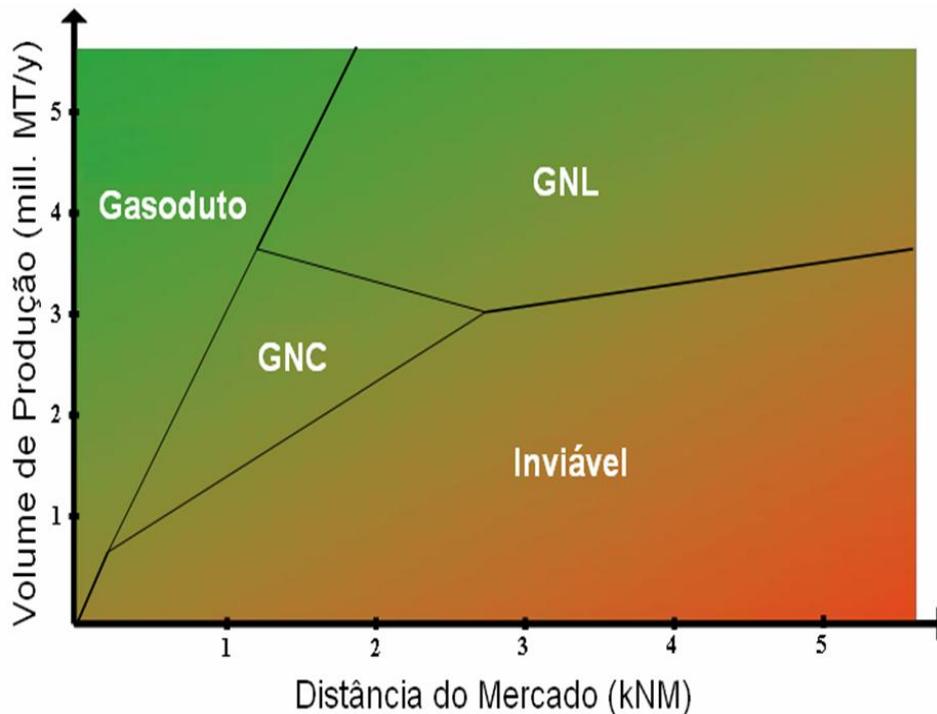


FIGURA 2.8: Comparação entre os custos de transporte por gasodutos, navios de GNC e navios de GNL.

- Segurança;
- Prazo de Implantação.

2.3.6 Distribuição

Segundo (ABNT 1990), a distribuição de gás é a atividade de fornecimento do combustível por meio de dutos, aos estabelecimentos consumidores (residenciais, comerciais, industriais, outros) através de rede de uma companhia distribuidora.

A diferença entre transporte e distribuição de gás é feita pelo consumo de gás envolvido. Quando se trata de deslocar grandes volumes de gás através de gasodutos de grandes diâmetros desde os campos de produção até os *city gates* temos o caso de transporte. Quando a atividade de deslocamento do gás é feita no interior das grandes cidades até chegar aos consumidores finais ou para atendimento a clientes industriais na periferia, temos o caso de distribuição.

Na figura (2.9) pode-se observar que a rede de distribuição de gás fica compreendida entre o *city gate* e a estação de medição e regulagem e pressão (EMRP) ou medidor do

consumidor.

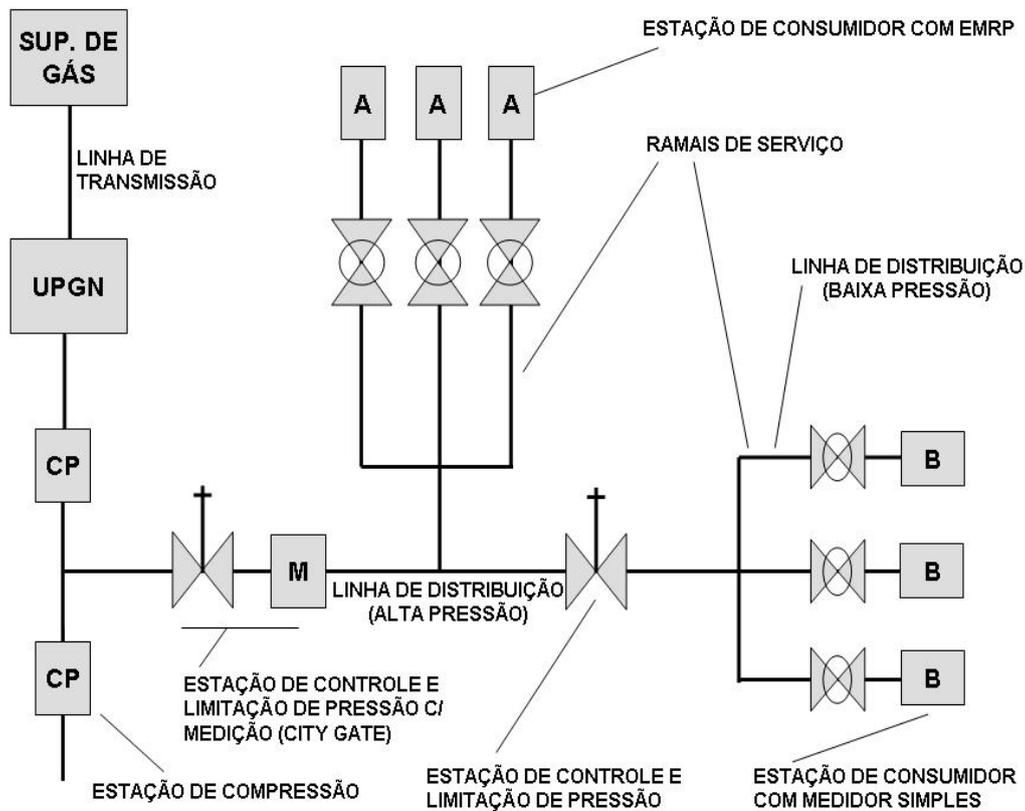


FIGURA 2.9: Diagrama do gasoduto

A pressão de fornecimento do gás natural à rede de distribuição está na faixa de $71.4kg/cm^2$, sendo rebaixada para $35.7kg/cm^2$ nos respectivos *city-gates*. As redes de distribuição foram projetadas para operarem na faixa de $35.7kg/cm^2$ de pressão, e se encarregam de transportar o gás para os diversos consumidores, que o receberão numa pressão de até $2.04Kg/cm^2$.

Ao longo da malha dutoviária podem existir ERP's - Estações Redutoras de Pressão intermediárias, que reduzem a pressão e trabalham com redes secundárias de baixa pressão. As redes secundárias são projetadas para operarem com uma pressão máxima de $4.08kg/cm^2$ e são normalmente construídas em polietileno de alta densidade.

Definidos o traçado e os diâmetros da rede de distribuição, o projeto deverá contemplar o detalhamento das ERP's, dos sistemas de odorização de gás e das válvulas em geral.

2.4 Mercado Brasileiro de Gás Natural

Segundo a (ABEGAS 2006), enquanto a comercialização do gás natural cresce no mundo inteiro a taxa média de 2,4 % ao ano, no Brasil este crescimento chega a 20 % ao ano.

Resume-se o potencial competitivo no setor de gás natural através da função dos seguintes aspectos geográficos:

- Do número de produtores independentes e campos de exploração existentes em condições economicamente viáveis para ofertar gás natural;
- Da dispersão em que as fontes se encontram em torno dos centros de consumo, isto é quanto menor o poder de determinado gasoduto em atender o mercado consumidor.

As figuras (2.10) e (2.11) demonstram a evolução da oferta e da demanda de gás natural no Brasil em 2006/2007:

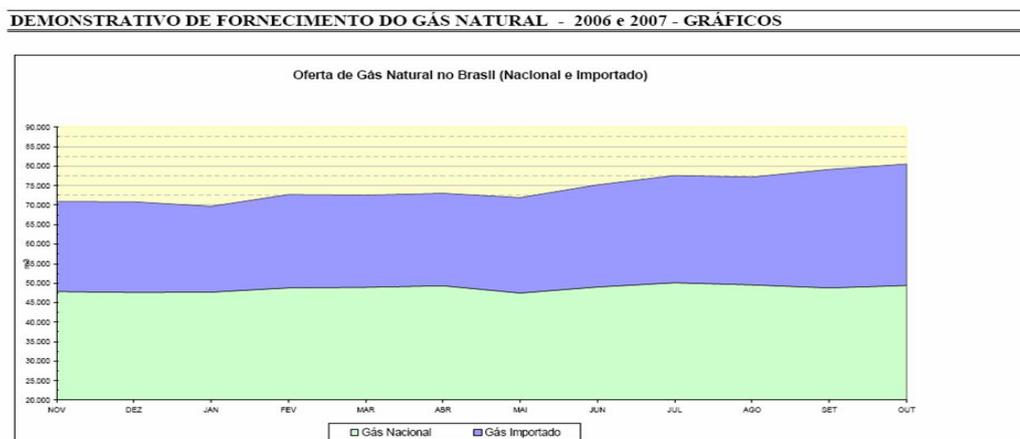


FIGURA 2.10: Evolução da oferta de gás natural no Brasil em 2006/2007

Observe a evolução das vendas na figura (2.12)⁸ nos últimos dez anos, segundo a ANP.

O setor que mais consome gás natural é o industrial, seguido da geração termelétrica e do setor automotivo. O setor que mais cresce é o automotivo, seguido do residencial e o industrial.

⁸Fonte:(ANP 2006)

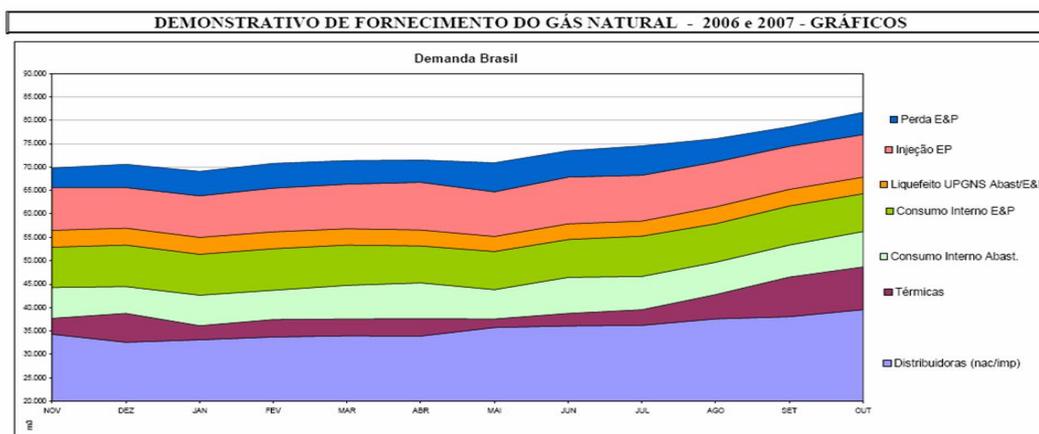
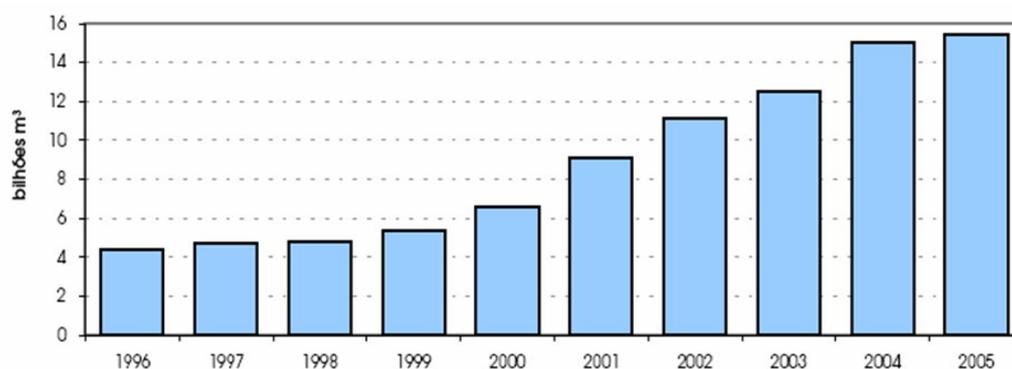


FIGURA 2.11: Evolução da demanda por gás natural no Brasil em 2006/2007.



Fontes: Petrobras/SERPLAN; Petrobras/Unidade de Negócios Gás Natural (Tabela 3.27).
 Nota: Inclui o consumo das Fábricas de Fertilizantes Nitrogenados (FAFEN) pertencentes à Petrobras.

FIGURA 2.12: Evolução das vendas

2.5 Conclusão

O gás natural está altamente valorizado em consequência da progressiva conscientização mundial da relação entre energia e meio ambiente.

Os maiores produtores deste combustível no Brasil são os estados do Rio de Janeiro e do Amazonas, no entanto, no Amazonas, há uma grande distância dos centros consumidores, não há uma infra-estrutura para transporte e distribuição e por isso nem todo o gás é disponível para consumo.

O transporte e a distribuição de gás pode ser feito por três modos: dutoviário, rodoviário e marítimo, sendo o transporte dutoviário considerado o meio mais conveniente. No entanto, os custos de implantação dos dutos são elevadíssimos.

A comercialização do gás natural no Brasil cresce a altas taxas, por isso é necessário

investir em formas de abastecimento para suprir as necessidades dos centros consumidores. Além dos benefícios já citados, a utilização do gás representaria uma alternativa para a redução da poluição do ar das grandes cidades.

O capítulo subsequente abrange a definição e a revisão bibliográfica do problema que será tratado nesta dissertação.

Capítulo 3

Problema de Dimensionamento de Redes de Gás

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o problema de dimensionamento de dutos de gás natural. Para se construir uma idéia consistente sobre o problema faz-se necessário estudar as equações que modelam o fluxo de gás, a perda de carga nos tubos, as questões envolvidas no projeto e a revisão bibliográfica sobre o assunto.

Para modelar matematicamente um problema deste tipo é preciso primeiro, descrever detalhadamente as equações que regem o fluxo de gás na tubulação.

3.2 Equações que modelam o fluxo

Segundo (SCHROEDER JR. 2001), nestes dois séculos de existência da indústria do gás natural, a comunidade científica tem se empenhado em desenvolver equações úteis para relacionar o fluxo de um gás através de uma tubulação com as propriedades tanto do gás como do duto com as condições operacionais de uma rede, tais como pressão e temperatura.

(SCHROEDER JR. 2001) descreve as equações que governam o fluxo de fluidos compressíveis através de dutos, dando ênfase particular àqueles utilizados dentro da indústria do gás, e destacando uma equação conhecida como Equação Fundamental

(3.6), que governa fluxos e fluidos compressíveis em uma dimensão.

Dentre as expressões descritas por (SCHROEDER JR. 2001) segue-se:

- Equação de Weymouth

Usada para escoamento de gases em duto, em terrenos que possuem gradiente de elevação (aclive/declive).

$$Q = 433.49 \frac{T_b}{P_b} D^{8/3} e \left(\frac{P_1^2 - P_2^2 - H_c}{LGT_a Z_a} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

onde:

H_c é um fator de correção

$$H_c = \frac{0.06835G(H_2 - H_1)P_{media}^2}{ZT_a} \quad (3.2)$$

e,

- D = diâmetro interno do duto
- e = eficiência do gasoduto
- f = fator de atrito
- G = peso específico do Gás Natural
- L = comprimento do duto
- P_b = pressão base
- P_1 = pressão de entrada

- P_2 = pressão de saída
- Q = taxa de fluxo
- T_a = temperatura média
- T_b = temperatura base
- Z_a = fator de compressibilidade

O fator de atrito para a Equação de Weymouth (3.3) decresce consistentemente com o aumento do tamanho do duto, sendo mais apropriado para situações onde exista fluxo alto.

$$f = \frac{4}{(11.18D^{1/6})^2} \quad (3.3)$$

- Equação de Panhandle

$$Q = 0.010019 \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1.02} D^{2.53} e^{\left(\frac{P_1^2 - P_2^2 - H_c}{LG^{0.961} T_a Z_a} \right)^{0.51}} \quad (3.4)$$

O fator de atrito para a Equação de Panhandle (3.5) varia com o Número de *Reynolds*, sendo mais apropriado quando este possui um valor muito alto.

$$f = \frac{4}{(16.49(N_{re})^{0.01961})^2} \quad (3.5)$$

- Equação Fundamental

A Equação Fundamental (3.6) dá o resultado final para o fluxo em um duto horizontal.

$$Q = C \frac{T_b}{P_b} D^{2.5} e^{\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{LGT_a Z_a f} \right)^{0.5}} \quad (3.6)$$

onde:

C constante 0,0011493 (conversão de sistemas de unidades)

3.2.1 Perda de Carga

A força que é perdida quando o gás percorre um tubo pelo atrito das moléculas do gás com a parede do tubo e com os choques entre elas mesmas é o que define a perda de carga. Esta força perdida depende do tipo de tubo e do produto transportado e pode ser calculada pelo fator de atrito.

Para todas as equações que medem o fluxo de gás faz-se necessário o cálculo do fator de atrito, uma vez que este tem fator determinante na vazão. Para determiná-lo, deve-se caracterizar o fluxo de um fluido através de um grupo de variáveis adimensionais conhecido como Número de *Reynolds*, N_{re} (SCHROEDER JR. 2001), (CASTRO 2004) e (COSTA 2004). Ele é representado por uma função do número de *Reynolds* e da rugosidade relativa do duto (rugosidade absoluta dividida pelo diâmetro interno do duto)

O cálculo de N_{re} pode ser calculado pela equação (3.7) apresentada em (SCHROEDER JR. 2001).

$$N_{re} = \frac{49.44QGP_b}{\mu DT_b} \quad (3.7)$$

onde:

- N_{re} = número de *Reynolds*
- D = diâmetro do duto
- G = peso específico do gás
- Q = taxa de fluxo do gás
- T_b = temperatura base
- μ = viscosidade do fluido

O cálculo da perda de carga pode ser feito pela primeira vez, quando em 1932 e 1933, Nikuradse desenvolveu várias experiências com o objetivo de estudar o escoamento em dutos. Estas experiências consistiram na determinação da perda de cargas provocadas por escoamento no interior de dutos circulares com rugosidade artificial. Ao dispôr os resultados obtidos nas experiências num diagrama em que figurava o logaritmo do factor de atrito em função do logaritmo do número de *Reynolds*(Diagrama de Moody), Nikuradse observou que existiam três regimes bem distintos:

1. **O regime laminar**, onde o fator de atrito depende apenas do número de Reynolds, existindo uma relação linear entre ambas as grandezas expressa pela fórmula de Hagen-Poiseuille.

$$f = \frac{64}{N_{re}} \quad (3.8)$$

Nesta zona de taxas de fluxo extremamente baixas o fluido escoa em uma direção.

2. **O regime parcialmente turbulento**, onde o fator de atrito continua a depender unicamente do número de Reynolds. O fluxo é governado pela lei de Prandtl-Von Karman.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(N_{re}\sqrt{f} - 0.8) \quad (3.9)$$

Nesta zona de taxa de fluxo moderada o fluido escoa tanto lateralmente como na direção primária do duto embora exista ainda uma camada laminar fora da zona de rugosidade.

3. **O regime turbulento** caracterizado pelo fator de atrito ser independente do número de Reynolds e depender apenas da rugosidade relativa do duto(quociente entre a rugosidade absoluta e o diâmetro da duto - ϵ/D) sendo a relação de dependência expressa pela fórmula de Nikuradse.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\epsilon}{3.7D}\right) \quad (3.10)$$

que é equivalente a

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{D}{\epsilon}\right) + 1.14 \quad (3.11)$$

Nesta zona de taxa de fluxo extremamente alta o fluido escoa em completa tur-

bulência tanto lateralmente no duto como na direção primária e o fator de fricção independe da taxa de fluxo.

4. **O regime de transição parcialmente turbulento-turbulento**, onde o fator de atrito tem um comportamento instável. Depende simultaneamente do número de Reynolds e da rugosidade relativa do duto. Para representar o fator de atrito nesta região uma fórmula comumente usada é a de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{N_{re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.12)$$

O fator de atrito pode ser calculado pela fórmula de Colebrook-White(4) usando o Método de Newton, veja em (BARROSO, BARROSO, CAMPOS FILHO, CARVALHO & MAIA 1987). Geralmente este é calculado através de equações implícitas, e não existe um método exato para seu cálculo. Dessa forma, o desenvolvimento das equações 3.1 e 3.4 tornaram este cálculo mais simples.

3.3 Questões de projeto de redes de distribuição

O dimensionamento de redes de distribuição de gás é definido como:

1. hidráulico - é feito a partir da definição dos consumidores a serem atendidos, do traçado e extensões da rede, dos critérios de pressões máximas e mínimas de operação, das vazões dos consumidores e das características do gás;
2. mecânico - é o que define basicamente a especificação do material e a espessura da parede requerida para os tubos e demais componentes da tubulação, para resistir a pressão interna e externa, e também o nível de inspeção das soldas das juntas dos tubos durante a construção.

A abordagem neste trabalho é referente ao dimensionamento hidráulico e julga-se conhecida a topologia da rede.

Para o dimensionamento de uma rede de gás é preciso definir o seu *layout* e, havendo feito isto, escolhem-se os tipos de dutos que deverá compô-la. Para obtenção deste

layout deve-se levar em consideração estudos geográficos e sociais da região onde a rede será implantada. Além disso, para modelar matematicamente este problema será necessário acrescentar algumas restrições quanto às pressões, continuidade de fluxo, volume de tráfego nas vias públicas e aos diâmetros que comporão a rede.

Este problema é tido com um problema de otimização com restrições, (SURRY, RADCLIFFE & BOYD 1995) destacam que além das equações de continuidade do fluxo existem outras restrições importantes, como:

- Os dutos selecionados devem permitir que a demanda dos clientes sejam atendidas de forma que em cada ponto de demanda seja disponibilizada certa pressão mínima;
- Cada duto não incidente a algum ponto de suprimento, deve ter ao menos um duto de *upstream* (duto que recebe o direcionamento do fluxo) de diâmetro igual ou maior que o seu.

Um projeto adequado para uma rede de distribuição de gás canalizado deve contemplar diversas fases ou etapas, e envolver uma série de aspectos até a sua conclusão final (RODRIGUES 2004):

1. A escolha do mercado potencial a ser atendido é o ponto de partida do projeto, em virtude da construção de uma rede de distribuição de gás somente ser viável, caso existam consumidores potenciais que venham a remunerar o investimento realizado.
2. A definição do local de instalação da malha dutoviária envolve obtenção de licenças ambientais de construção e operação, além da possibilidade de desapropriação de terrenos particulares. Em algumas situações, o traçado original do projeto poderá sofrer diversas alterações em função desses aspectos ou, até mesmo, em função de possíveis dificuldades do terreno, somente encontradas durante a fase de construção.
3. Em projetos de sistemas abertos (tubulação contínua), além das condições mínimas de pressão, um gradiente de pressão constante deve ser mantido em todos os ramos do sistema, evitando estrangulamentos ou refluxos.

4. Definidos os diâmetros e o traçado da rede de distribuição, o projeto deverá contemplar o detalhamento das Estações Redutoras de Pressão - ERPs, dos sistemas de odorização de gás e das válvulas em geral.

Em função do item (2), diversos traçados alternativos são preliminarmente estudados.

Além destes aspectos, no trajeto de um ramal dutoviário deve-se considerar a possibilidade de suprir vários clientes. Portanto, é necessário analisar se não é mais vantajoso construir um ramal mais extenso, mas que atenda a diversos consumidores, ou se é melhor implantar um ramal menor que seja específico para determinado consumidor. Outro item que deve ser bem observado na fase de projeto é a possibilidade de, futuramente, expandir a rede.

Quanto a estrutura física da tubulação, os gasodutos são responsáveis por levar o gás desde o ponto de produção até as empresas distribuidoras, sendo que as redes ou linhas de distribuição serão a conexão final com o consumidor. A rede completa é formada por peças cilíndricas de aço ou polietileno¹, de seção circular, que se interconectam. A seção dos dutos é projetada para atender o fluxo de gás, e a espessura da parede para suportar a pressão de operação e os demais esforços solicitantes sobre o mesmo.

No Brasil, os dutos são produzidos em série de diâmetros discretos e número de materiais, e para um material o custo por unidade de comprimento do duto é uma função crescente do diâmetro, observe figura (3.1). A pressão cai ao longo do duto, para um fluxo pré-fixado, sendo uma função decrescente do diâmetro, deste modo diâmetros maiores dão geralmente uma rede mais segura quanto ao suprimento. O problema é, portanto, selecionar os diâmetros dos dutos no traçado da rede tal que eles sejam suficientemente grandes para fornecer segurança de suprimento ao cliente com o menor custo possível. (COSTA, GOUVÊA & GOLDBARG 2003) e (CASTRO 2004) destacam que a solução final a ser adotada está muitas vezes a cargo do projetista e não exclusivamente dependente dos resultados do dimensionamento.

Pelo que foi exposto até agora nesta seção, pode-se concluir que o custo final da rede é representado pela soma dos custos contidos na aquisição e implantação dos dutos.

¹ Os dutos de polietileno são utilizados em redes de distribuição

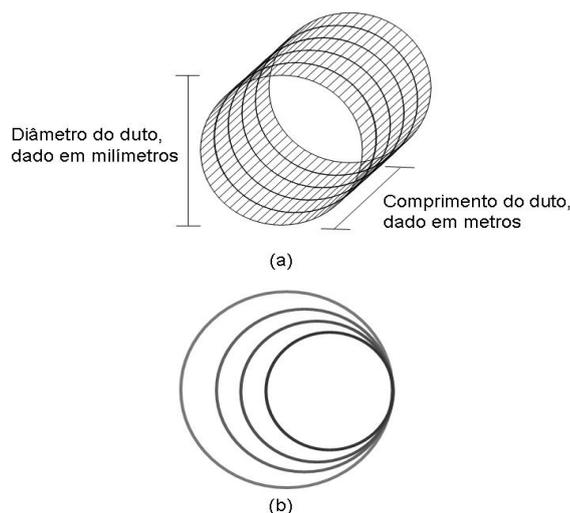


FIGURA 3.1: Formação do custo dos dutos

Para encontrar a política ótima de atendimento da rede de demanda depende-se da formulação e análise de um enorme número de configurações e políticas viáveis, trata-se de um problema considerado de alta complexidade computacional.

Como já citado, tradicionalmente os modelos matemáticos na área de gás natural são grandes consumidores de dados devido a grande quantidade de equipamentos que compõem a malha de escoamento e também devido a complexidade das características destes equipamentos (CASTRO et al. 2000).

Enfim, para determinação da configuração ótima devem ser consideradas as restrições, que só poderão ser verificadas a partir da resolução da equação não linear de fluxo de gás na rede.

Na próxima seção, serão apresentadas as abordagens que foram encontradas na literatura para o problema de dimensionamento de dutos e alguns outros trabalhos correlacionados.

3.4 Revisão Bibliográfica

Nesta revisão, o primeiro trabalho encontrado na literatura foi o de (ROTHFARB, FRANK, ROSENBAUM, STEIGLITZ & KLEITMAN 1969). Este trabalho compreende a otimização da topologia da malha de gasodutos direcionados das plataformas de produção de gás no mar para uma estação de compressão no continente.

No artigo de (ROTHFARB et al. 1969), o problema da otimização da topologia de uma malha de transmissão de gás *offshore* foi dividido em três subproblemas, são eles:

1. Determinação da combinação ótima, dentre os diâmetros disponíveis, para a tubulação, que minimize o custo;
2. Escolha da arborescência de custo mínimo capaz de escoar a produção;
3. A capacidade de a arborescência ter a topologia alterada para prever ampliações e reduções.

Foi assumido que os diâmetros escolhidos compõem a alocação ótima do custo do projeto. Portanto, o segundo problema consiste em gerar uma árvore que representará a topologia da malha de gasodutos.

O algoritmo foi desenvolvido com base na técnica de Programação Dinâmica e utiliza métodos heurísticos de busca local. O objetivo é construir a rede de gasodutos de coleta mais econômica com fluxo orientado para estação de compressão localizada no continente (anti-raiz), e que não possua ciclos.

A busca local se inicia através da alocação parcial dos diâmetros em alguns ramos, deixando em aberto a escolha dos diâmetros dos ramos remanescentes. Em função do elevado número de soluções possíveis, o método deve ser capaz de identificar e eliminar as alocações não viáveis logo no início do processo para manter o número de soluções tratável.

No algoritmo, as árvores modificadas que reduzem o custo, são utilizadas como ponto de partida para a nova busca local. A capacidade dos programas estava limitada a 50 nós e a determinação da configuração do arranjo dos diâmetros dos dutos era precedida pela seleção da árvore de custo mínimo.

(D., D. & RADCLIFFE 1994) desenvolveram um algoritmo genético para o problema do dimensionamento de dutos e usaram uma função de penalidade para levar em consideração tanto as restrições de pressão mínima como de dutos de *upstream*. As soluções são representadas como uma seqüência de n inteiros, onde n é o número de dutos da rede, cada inteiro indicando o índice do diâmetro a ser escolhido para um dado trecho de duto. O índice de um duto (i, j) - com o gás fluindo de i para j , ou seja, quando o nó i está no único caminho entre o nó j e a raiz - é igual ao valor j . Em

outras palavras, rotula-se cada duto ou arco da árvore com o mesmo rótulo do nó para o qual aquele duto entrega o gás diretamente. Dando continuidade a este trabalho (SURRY et al. 1995) propõe uma solução para o problema utilizando a abordagem de algoritmos genéticos através do método COMOGA (Constrained Optimization by Multi-Objective Genetic Algorithms - Otimização com Restrições através de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo). O *design* de uma rede de gás envolve a definição do *layout*, e havendo feito isto, escolhe-se os tipos de dutos. O *layout* é geralmente determinado como a rota das estradas, mas a seleção dos tipos de dutos é atacada como um problema de otimização. Eles tratam as restrições do problema, sejam explícitas ou implícitas, como um critério separado em uma formulação multi-objetivo. O método consiste em reduzir o problema a um de bi-critério, condensando todas as restrições em um único critério ao calcular um *ranking* de Pareto para cada solução da população (número de soluções que as dominam) com respeito ao nível de violação das restrições originais. O método então tenta minimizar tanto o custo quanto o *ranking* de Pareto através de um esquema *annealing* reverso que ajusta a probabilidade de selecionar e substituir indivíduos da população de acordo com um ou outro critério, em uma seleção por torneio binário. O COMOGA ajusta a probabilidade de escolher indivíduos para recombinação baseado no custo da solução ou no *ranking* de Pareto das violações de restrição se a proporção de soluções viáveis na população não está próxima o suficiente a um parâmetro alvo.

No trabalho exposto, a rede considerada é de cunho real, cada duto é selecionado num conjunto de seis diâmetros disponíveis, dando um aumento no espaço de busca de $6^{25} \cong 3 \times 10^{19}$. Entretanto, a densidade de redes válidas no espaço de busca é extremamente baixa - amostra aleatória de mais de 3×10^7 pontos produzidos somente uma configuração é admissível. Os dutos conectam 25 nós, 23 dos quais são nós de demanda e dois dos quais são nós de origem com pressão definida.

O algoritmo apresentado segue os seis principais passos:

1. Calcula a violação das restrições de todas as soluções;
2. É construído o Ranking de Pareto, baseado nas violações das restrições (por exemplo, contando o número de membros da população dominado por outra solução.

3. Os indivíduos são avaliados (pelo cálculo da aptidão)
4. São selecionados uma determinada proporção de indivíduos para serem pais baseados no custo e outros no ranking das restrições.
5. Os operadores genéticos são aplicados (cruzamento, mutação, etc.).
6. A proporção de indivíduos selecionados é ajustada caso o número de soluções viáveis encontradas não esteja próxima a proporção pretendida.

Os resultados obtidos foram comparados aos resultados obtidos pela empresa British Gas, que resolveu o problema através de uma aproximação heurística.

As redes eram instaladas usando os resultados obtidos a partir da aproximação heurística. Esta heurística determina uma boa configuração de dimensionamento de dutos assumindo uma queda constante de pressão sobre toda rede e supondo alguns diâmetros iniciais. Isto sempre produzirá uma rede válida (isto é, uma que satisfaça as restrições), mas não normalmente uma configuração ótima. A heurística procede otimizando localmente a solução, reduzindo repetidamente alguns diâmetros enquanto mantém a rede válida. Eventualmente este processo termina quando nenhum tubo pode ter seu diâmetro reduzido enquanto mantém a rede válida.

Os resultados conseguidos pela abordagem de algoritmos genéticos foram 4% melhores que os resultados encontrados pela técnica heurística.

Quanto aos dois últimos artigos supracitados, os autores argumentam que o método COMOGA atinge um desempenho similar ao do algoritmo genético com função de penalidade, mas necessita de consideravelmente menos experimentação e é muito menos sensível aos parâmetros envolvidos em seu projeto.

(OSIADACZ & GÓRECKI 1995) publicam um trabalho onde fazem uma revisão sobre os métodos disponíveis para projetar redes de distribuição, estes podendo ser divididos em três grupos, a saber:

1. Métodos heurísticos
2. Métodos que assumem uma série contínua de diâmetros
3. Métodos de otimização discreta

Neste trabalho foi proposto um método de solução que a cada iteração minimiza uma aproximação quadrática para uma função Lagrangiana sujeito a aproximações das restrições sequencialmente linearizadas.

No trabalho de (COSTA 2004) são apresentadas várias abordagens para o problema, tais como: heurística construtiva de (ROTHFARB et al. 1969), Algoritmo Genético de (SURRY et al. 1995), Simulated Annealing, Busca Tabu, Algoritmo Genético Híbrido. A rede usada como teste é do tipo ramificada e acíclica. São conhecidas a vazão nos dutos e a pressão mínima nos pontos de demanda. Em sua pesquisa, foi observado que a abordagem construtiva obtém dimensionamentos de menor custo em comparação com as outras abordagens. Em contra-partida, a limitação de memória associado à abordagem construtiva limitou seu desempenho a casos com menos de 1600 dutos, enquanto as outras abordagens permanecem capazes de oferecer soluções a instâncias com até 3037 dutos.

O algoritmo Simulated Annealing e a abordagem Genética Híbrida obtiveram números elevados de soluções viáveis. Embora a Busca Tabu não tenha conquistado tantas soluções viáveis quanto as duas anteriores, ela consegue encontrar mais soluções que o Algoritmo Genético de (SURRY et al. 1995), que mostra dificuldades em atingir dimensionamentos viáveis para casos com mais de 100 dutos.

(CASTRO 2004) apresenta em seu trabalho algumas abordagens, como: Algoritmo Genético (AG), Algoritmo Memético (AM) e Algoritmos Transgenéticos (AT). A rede considerada é do tipo ramificada sem ciclos. São conhecidas a vazão nos dutos e a pressão mínima nos pontos de demanda. Em seu trabalho é relatado que, apesar do AM requerir mais tempo computacional devido a procedimento de busca local, ele mostrou-se equivalente em desempenho ao AG para um mesmo tempo de execução. O AT mostrou pequena superioridade em relação as instâncias testadas com 22,81% de soluções melhores que os outros dois algoritmos.

(RODRIGUES 2004) trata do mesmo problema de otimização que (ROTHFARB et al. 1969), ou seja, o problema da coleta de gás em malhas de gasodutos *offshore*. Para resolvê-lo baseou-se na codificação sucessora em Algoritmos Genéticos.

A codificação rotula os nós da antiarborescência com letras do alfabeto e permite que os genes assumam os rótulos das letras em função da sua posição nos percursos da antiarborescência. A codificação é realizada indiretamente no cromossomo, asso-

ciando os nós antecessores aos sucessores e vice-versa. Este procedimento denota a existência de um arco unindo o gene antecessor ao gene sucessor. Os genes representam as plataformas de exploração e produção de gás natural.

A proposta da codificação sucessora decorre do fato de que o fluxo de gás produzido pelas plataformas deve ser orientado para a estação de compressão localizada no continente.

O algoritmo opera em estágios simultâneos como descritos abaixo:

1. Definição da topologia ótima da rede - corresponde ao estágio da geração da população de cromossomos tipo cadeia de caracteres alfabéticos, que por meio de subrotinas de reparo, mantém a topologia de arborescência dos cromossomos, enquanto são submetidos aos processos de seleção e cruzamento visando otimização das distâncias a serem percorridas pela malha de gasodutos;
2. Dimensionamento dos diâmetros dos gasodutos - corresponde ao estágio da geração da população de cromossomos tipo cadeia de caracteres numérica, que por meio de subrotinas de teste, verificam se as restrições matemáticas do modelo estão sendo atendidas e através do processo de seleção e cruzamento otimizam a alocação dos diâmetros para minimizar os custos da rede de gasodutos.

Na maioria dos problemas convencionais de árvores capacitadas existe uma raiz, que se comporta como uma fonte, despachando fluxo para os pontos de demanda, no problema em estudo tem-se um único sumidouro e múltiplas fontes. Portanto, todo o fluxo das plataformas são orientados para a estação de compressão para que a conectividade esteja garantida.

Para realizar os testes foram consideradas informações da Bacia de Campos-RJ. Foram adotadas as seguintes premissas:

- A localização de cada plataforma, representada por um nó da árvore é suposta conhecida, foram arbitradas coordenadas hipotéticas dos nós;
- São conhecidas as capacidades de produção diárias de cada nó da árvore;
- A pressão máxima foi definida como a máxima pressão que os gasodutos podem suportar;

- A pressão mínima foi definida como a pressão inferior à pressão de fornecimento à estação de compressão;
- A pressão dos poços deve ser maior ou igual a pressão máxima;
- As ligações sempre estão operacionais, e todos os poços são interligados ao continente.
- Na modelagem do fluxo foi considerado um transporte monofásico e utilizou-se a equação de Panhandle.

A medida que o gasoduto passa por uma nova plataforma, a vazão recebe um incremento no valor de sua produção. Portanto, a restrição de capacidade deve ser testada sempre que se estabelece uma ligação entre duas plataformas. Ao aumentar a vazão, deve-se verificar se o diâmetro obtido via Equação de Panhandle mantém as velocidades econômicas de escoamento do gás e se a pressão máxima não seria ultrapassada.

Conhecendo-se a topologia da antiarborescência, a vazão de gás que sai de um determinado nó corresponde ao somatório das vazões que convergiram para aquele ponto e da produção de gás gerada no próprio nó. Para que a antiarborescência corresponda a uma resposta viável, o sentido de orientação do fluxo de gás deve estar orientado dos pontos de maior pressão para os pontos de menor pressão

A seleção dos diâmetros constitui um processo adicional de geração de uma nova população de cromossomos, cujos genes correspondem a seqüência de alocação dos diâmetros padronizados. Os cromossomos com o código genético da seqüência de alocação de diâmetros estão relacionados aos cromossomos com a seqüência de nós, que definem a topologia da antiarborescência. A combinação das informações contidas nos dois cromossomos permite o cálculo do *fitness*, que corresponde ao custo total do investimento na rede de gasodutos. A resposta ótima do problema é uma combinação viável que tenha o melhor *fitness*, ou seja, o menor custo associado.

(DUARTE 2006) expõe uma extensão da heurística construtiva primeiramente tratada por (ROTHFARB et al. 1969) e depois por (COSTA 2004). O algoritmo utiliza da técnica de programação dinâmica para repetidamente reduzir a instância em questão a um problema equivalente de menor dimensão. A mesma idéia que foi aplicada por

(COSTA 2004), porém este não introduziu no seu algoritmo uma forma de lidar com as restrições de *upstream*. (DUARTE 2006) também apresenta uma abordagem Busca Tabu. O algoritmo proposto é implementado de forma a trabalhar apenas com soluções viáveis, o que significa que os movimentos considerados em sua estrutura de vizinhança nunca geram soluções que violam as restrições do problema. Isto simplifica a função objetivo utilizada, no sentido de que não é necessária a aplicação de funções de penalidade para tratar com quebras das restrições e o objetivo é simplesmente minimizar o custo total de instalação da rede de distribuição de gás projetada. Vale lembrar que a rede de gás considerada neste trabalho é do tipo ramificada em formato de árvore em grafo. São conhecidas a vazão no duto e a pressão mínima nos pontos de demanda.

(CASTRO et al. 2000) resolve o problema de movimentação e utilização de gás natural através de um modelo matemático (PLANGÁS)² que visa maximizar os ganhos econômicos envolvendo as receitas ligadas à utilização e venda do gás natural menos os custos operacionais envolvidos, otimizando a utilização das instalações e cumprindo com os compromissos contratuais com clientes e usuários do sistema de gás. Ele consiste em prever os volumes de gás a serem movimentados e disponibilizados para as diversas utilizações (venda, consumo interno nas plataformas, injeção, etc.) na malha de gás. Para resolvê-lo foi utilizado um modelo matemático de programação linear com variáveis inteiras 0-1, que descreve o comportamento dos principais componentes da malha, e que é acionado para um horizonte de 1 a 36 meses, a depender do plano.

O problema inicial para o desenvolvimento do modelo matemático foi o levantamento de uma malha lógica, que representasse a malha física operacional, no nível de detalhes e simplificações adequado. Cada plataforma foi analisada separadamente, bem como as ligações entre elas através dos gasodutos.

Dando continuidade a este trabalho, (IAMASHITA et al. 2005) propõe um algoritmo genético híbrido, onde diversas gerações de possibilidades operacionais são obtidas por técnicas genéticas e os balanços de fluxo e pressão no gasoduto, que determinam o grau de adaptação dessas soluções, são realizados com técnicas exatas.

A estrutura matemática que define este problema de maximização do lucro da previsão de movimentação de gás na sua formulação original (modelo misto inteiro não lin-

²O PLANGÁS é um sistema da Petrobrás que utiliza um modelo matemático de otimização com programação linear (apoiado por um banco de dados), responsável pela elaboração da previsão otimizada e integrada da movimentação de gás da Bacia de Campos-RJ

ear) é complexa do ponto de vista de otimização. Em particular, sabe-se que este é um problema não convexo e NP-completo, isto é, neste caso, o tempo utilizado para solucionar o problema cresce exponencialmente com o tamanho do problema. (IAMASHITA et al. 2005)

Pelos resultados encontrados, os autores acreditam que este modelo pode ser utilizado para planejamento e dimensionamento, em função da precisão dos resultados, principalmente para o cálculo de fluxo e perda de carga na malha de gasodutos. Este novo módulo utiliza a equação de perda de carga na sua formulação original (quadrática), o que permite tratar o problema mais próximo da realidade operacional, proporcionando uma melhoria no cálculo de perda de carga e fluxos de gás através de redes de gasodutos que podem conter vários ciclos.

Além da rede da Bacia de Campos-RJ, este modelo pode ser utilizado em qualquer localidade, inclusive em grandes redes complexas de gasodutos terrestres com estações recompressoras. A precisão e rapidez dos resultados também podem tornar o modelo apto para utilização *on-line* de operação dos gasodutos e inclusive para dimensionamento destas redes.

Em se tratando de problemas de otimização em redes de transmissão de gás, (RIOS MERCADO, WU, SCOTT & BOYD 2002) apresenta uma abordagem que pode ser usada para reduzir significativamente a dimensão do problema, sem desfazer a sua estrutura, tornando a solução mais acessível. O problema tratado foi de minimização do custo de combustível pela estação de compressão. Na prática este tipo de instância é muito grande em termos do número de variáveis de decisão e o número de restrições é muito complexo devido à presença de não-linearidade.

Existem ainda alguns trabalhos de assunto correlacionado tal como o problema de dimensionamento dos canos de rede de distribuição de água.

Um problema muito parecido com o do tema desta dissertação é o problema da otimização de redes de distribuição de água. Em um problema de otimização de redes de distribuição de água, a disposição dos canos é conhecida e tem-se como objetivo a determinação dos diâmetros de modo a minimizar o custo de implantação da rede, mantendo a pressão mínima nos nós acima de um determinado limite e satisfazendo a demanda dos consumidores. Sobre este assunto, (GOMES NETO & DIAS 2007) expõe uma modelagem matemática baseado na programação linear sequencial.

Neste modelo é considerado a utilização de bombas, uma vez que elas tem grande importância na manutenção e no aumento das cargas nos nós de demanda, sendo amplamente utilizada em redes onde os nós fontes (caixas d'água) não atendem toda a demanda por carga ou quando a topografia exige que se transporte água a pontos elevados. O objetivo, então, foi determinar os diâmetros dos canos da rede e as cargas de fornecimento das bombas de modo a minimizar os custos.

Os diâmetros foram tratados como variáveis reais e, ao final de cada iteração, foram arredondados para os valores comerciais levando em conta que a carga nos nós esteja sempre acima dos valores mínimos estipulados.

(C. & L. 2004) propõem um algoritmo de busca tabu para encontrar o projeto de menor custo de redes de distribuição de água. A estrutura matemática do problema é idêntica a do problema da rede de distribuição de gás natural, mesmo em se tratando de um tipo diferente de fluido a ser distribuído, nela inclui-se as preocupações com restrições similares de pressão mínima e dutos de *upstream*.

O algoritmo sugerido começa de uma solução viável trivial onde a todos os dutos é atribuído o maior diâmetro disponível e, para cada movimento sucessivo na vizinhança, se diminui o diâmetro de um dos dutos, ao mesmo tempo mantendo válida a solução com respeito a todas as restrições, de forma a obter a solução de menor custo na vizinhança. Quando o algoritmo encontra uma solução na qual nenhum duto pode ter o diâmetro diminuído sem tornar a solução inviável, se faz um movimento de diversificação, ou seja, se aumenta o diâmetro de um dos dutos, selecionado de acordo com um dos seguintes critérios:

1. O duto cujo diâmetro é aumentado é aquele que apresenta o menor valor de um parâmetro dado pela multiplicação do número de mudanças no diâmetro do duto durante o procedimento de busca pelo número de vezes em que o duto foi atribuído ao valor do diâmetro aumentado;
2. Ou o duto escolhido é aquele cujo diâmetro tem se mantido o mesmo pelo maior período nas iterações anteriores

Enfim, a utilização de técnicas heurísticas visando à solução de problemas de otimização combinatória, tal como o problema do dimensionamento de dutos, é jus-

tificada pela complexidade dos mesmos, o que geralmente inviabiliza a utilização de técnicas exatas para resolvê-los.

3.5 Conclusão

Para estudar o problema do dimensionamento de dutos de gás, deve-se antes, estudar o comportamento do gás na tubulação, isto pode ser feito estudando as equações Fundamental, de Weymouth, de Panhandle, que descrevem o fluxo e o relacionam com as propriedades tanto do gás como do tubo.

Só se viabiliza a construção de uma rede sendo respeitadas as questões de projeto, destacando-se: a escolha do mercado, as licenças ambientais, a desapropriação de terrenos, o detalhamento das Estações Redutoras de Pressão, dos sistemas de odorização de gás e das válvulas em geral.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura fazem uso das metaheurísticas para solucionar este problema, dentre elas destaca-se o Algoritmo Genético.

Capítulo 4

Aplicação da Metaheurística GRASP

4.1 A Metaheurística GRASP

Uma heurística refere-se a um método de busca de soluções em que não existe qualquer garantia de sucesso. O sucesso do método pode ser expresso quantitativa ou qualitativamente. Em um problema de otimização o sucesso pode ser representado pela obtenção da solução ótima. (GOLDBARG & LUNA 2005)

Para (RIBEIRO 1996), metaheurísticas são procedimentos destinados a encontrar uma boa solução, eventualmente a ótima, consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual tem que ser modelada para cada problema específico.

Segundo (NORONHA 2000), o sucesso de uma heurística depende de sua capacidade de: adaptação a instâncias especiais, escapar de ótimos locais, fazer uso da estrutura do problema, estrutura eficiente de dados, pré-processamento, boas técnicas para construir soluções iniciais, reinicializar procedimentos, melhoria de solução através de busca local, randomização controlada, diversificação de busca quando nenhuma melhoria adicional parece possível, intensificação da busca em regiões promissoras.

Diversas propostas de metaheurísticas surgiram nos últimos anos impulsionadas pelos problemas pertencentes à classe NP-difícil, dentre elas destacam-se: GRASP (FEO & RESENDE 1995), Busca Tabu (GLOVER & LAGUNA 1997), Algoritmos Genéticos

(HOLLAND 1975), Colônia de Formigas (DORIGO & GAMBARDILLA 1997).

Segundo (GOLDBARG & LUNA 2005), nas metaheurísticas existe invariavelmente uma estratégia geral de solução, cabendo apenas adaptá-lo ao caso específico.

As heurísticas modernas tem despertado crescente interesse da comunidade científica, tanto pelo bom retorno dado ao compromisso do objetivo, como em virtude da qualidade das soluções encontradas, tornando-se uma alternativa cada vez mais interessante para a solução aproximada de grande parte das aplicações reais dos modelos combinatoriais.

De maneira geral as metaheurísticas fazem uso de princípios básicos semelhantes quanto à abordagem dos problemas. São os mecanismos utilizados para escapar de ótimos locais que as distinguem umas das outras.

A metaheurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) é um algoritmo iterativo onde cada iteração é composta de duas fases: uma fase de construção e uma fase de busca local. Na fase de construção cria-se uma solução viável para o problema, esta solução é construída iterativamente elemento a elemento, depois, na fase de busca local, o objetivo é tentar melhorar esta solução inicial, para isto é definido um conceito de vizinhança para a solução e a partir daí faz-se uma busca por toda a redondeza desta solução a fim de encontrar o ótimo local. A melhor solução alcançada ao final da execução do GRASP será a solução final. As iterações GRASP são independentes, ou seja, na iteração atual não se leva em conta nenhuma informação das iterações anteriores.

Geralmente, são três os critérios de parada para esta metaheurística:

1. número máximo de iterações;
2. número máximo de iterações sem melhora;
3. estabelecimento de um tempo máximo de execução.

Dentre estes o mais utilizado, normalmente, é um número máximo de iterações.

O princípio geral do GRASP é criar uma solução viável e melhorá-la até onde seja possível, repetindo este processo quantas vezes for determinado. O pseudocódigo mostrado na figura (4.1) apresenta os componentes principais para um GRASP de minimização e foram baseados em (RESENDE & RIBEIRO 2002). Neste pseudocódigo

TABELA 4.1: Pseudocódigo da Metaheurística GRASP

<p>Procedure GRASP (<i>max_iteracao</i>, <i>semente</i>)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ler dados de entrada; 2. Para $K = 1$ ate <i>max_iteracao</i> faca <ol style="list-style-type: none"> (a) Solução_Construcao_Aleatoria_Gulosa(<i>semente</i>); (b) Solução_Busca_Local(<i>semente</i>); (c) Atualiza_solucacao(<i>solucao</i>, <i>melhor_solucacao</i>); 3. fim 4. Retorna melhor <i>solucao</i>; <p>fim GRASP</p>

max_iteração é a quantidade máxima de iterações a serem realizadas e *semente* é a semente geradora de aleatoriedade. Após a leitura dos dados de entrada da instância (linha 1), as iterações GRASP são realizadas nas instruções contidas entre as linhas 2 e 3. Cada iteração consiste de uma fase de construção e de uma fase de busca local e, se necessário, da atualização da melhor solução encontrada até o momento. A melhor solução encontrada é retornada na linha 4.

4.1.1 Fase de Construção

Na fase de construção, uma solução possível é iterativamente construída, um elemento por vez. A escolha de cada elemento a ser adicionado na fase de construção é determinada pelo ordenamento de todos os elementos numa lista de candidatos com respeito a uma função gulosa. Esta função mede o benefício de cada elemento selecionado e sua “cara” depende das características do problema abordado. A heurística é adaptativa, os benefícios associados com cada elemento são atualizados em cada iteração da fase de construção para refletir a mudança apresentada na seleção dos elementos previstos. A componente probabilística de um GRASP é caracterizada pela escolha aleatória dos melhores candidatos da lista, mas não necessariamente dos candidatos superiores. A lista dos melhores candidatos é chamada de Lista Restrita de Candidatos (LRC). Esta técnica de escolha permite que soluções diferentes sejam obtidas em cada iteração

GRASP, mas não necessariamente compromete a força da componente gulosa adaptativa do método. Os elementos participantes da LRC podem ser escolhidos através de duas formas: pelo número de elementos ou pela qualidade dos elementos. Veja o pseudocódigo na figura (4.2)¹.

A primeira forma, com relação à quantidade, determina-se um número fixo p de elementos que irão compor a LRC, os elementos são ordenados em ordem decrescente de benefício e os p primeiros elementos são incluídos na LRC. O valor de p é definido como $p = 1 + \alpha(a - 1)$, onde a é o número total de candidatos e α é um dado de entrada com valores definidos no intervalo $[0, 1]$. Note que, se $\alpha = 0$ um algoritmo totalmente guloso será executado, já que só é possível a escolha de um único elemento a ser inserido na solução. Por outro lado, $\alpha = 1 \Rightarrow p = a$, e portanto, a lista conterá todos os possíveis candidatos, o que resultará em um algoritmo aleatório.

A outra forma, com relação à qualidade, define-se um parâmetro de aleatoriedade α , que indicará o limite mínimo tolerável para aceitar um candidato na LRC. Para tal, deve-se encontrar os valores do menor e do maior custo incremental $c(e)$, sejam eles c^{min} e c^{max} . Os elementos e pertencentes a C que entrarão na LRC estarão no conjunto $\{e \in C | c(e) \leq c^{min} + \alpha(c^{max} - c^{min})\}$. Neste caso se $\alpha = 0$, estará sendo executado um algoritmo absolutamente guloso, já que somente elementos que acarretem em menor custo incremental podem ser inseridos na solução, enquanto se $\alpha = 1$, a lista conterá todos os possíveis candidatos resultando em um algoritmo totalmente aleatório.

O GRASP básico utiliza sempre um único valor fixo para o parâmetro α durante a execução de todas as iterações do procedimento. Não existe um melhor valor para α que se adeque para todos os casos e problemas, normalmente este depende de características particulares do problema, características e tamanhos das instâncias entre outros fatores.

Assim como em muitas técnicas determinísticas, as soluções geradas pela fase de construção GRASP provavelmente não são localmente ótimas com respeito à definição de vizinhança adotada. Daí a importância da fase de busca local, a qual objetiva melhorar a solução construída. (CHAVES & LORENA 2006)

¹Fonte: (RESENDE & RIBEIRO 2002)

TABELA 4.2: Pseudocódigo Refinado da Fase de Construção

```

procedure Construcao_Aleatoria_Gulosa( $\alpha$ ,semente)

1. Esvaziar solucao;

2. Inicializar o conjunto de Candidatos:  $C \leftarrow E$ ;

3. Avaliar o custo incremental  $c(e)$  para todo  $e \in C$ ; Enquanto solucao nao esta completa faca
    (a)  $c^{min} \leftarrow \min\{c(e) | e \in C\}$ ;
    (b)  $c^{max} \leftarrow \max\{c(e) | e \in C\}$ ;
    (c)  $LRC \leftarrow \{e \in C | c(e) \leq c^{min} + \alpha \{(c^{max} - c^{min})\}$ ;
    (d) Selecionar aleatoriamente um elemento  $s$  da LRC;
    (e) solucao  $\leftarrow$  solucao  $\cup \{s\}$ ;
    (f) Atualizar o conjunto de candidatos  $C$ ;
    (g) Reavaliar o custo incremental  $c(e)$  para todo  $e \in C$ ;

fim; Retornar a melhor solucao

fim Construcao_Aleatoria_Gulosa
    
```

TABELA 4.3: Pseudocódigo da Fase de Busca Local

<p>Procedure Busca_Local(solucão)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Enquanto solução s não é um ótimo local faca <ol style="list-style-type: none"> (a) Encontre $s' \in N$ (solução) com $f(s') < f(\text{solução})$ (b) Solução $\leftarrow s'$ 2. fim 3. Retorna solução; <p>fim Busca_Local</p>

4.1.2 Fase de Busca Local

A solução gerada na fase de construção do GRASP não representa necessariamente um ótimo local, portanto é necessário definir um mecanismo de busca local para melhorar o seu desempenho. A busca local tem por objetivo encontrar a melhor solução possível dentro de um espaço limitado de soluções possíveis, chamado de vizinhança, de forma a garantir que, ao menos localmente, a melhor solução foi encontrada. No processo de desenvolvimento de uma estratégia de busca local, uma etapa de grande importância é a de definição do conceito de vizinhança. O pseudocódigo desta fase está apresentado na figura (4.3)². A busca local termina quando nenhuma solução melhor for encontrada na vizinhança.

A eficiência da busca local depende da estrutura de vizinhança, avaliação rápida dos vizinhos e da estratégia de busca. A chave do sucesso do algoritmo também depende de uma boa solução de início.

As duas formas mais comuns de busca local são:

1. Melhor alteração - toda a vizinhança da solução é percorrida e somente a melhor alteração é feita;
2. Primeira melhora - a primeira alteração que proporcionar melhora é executada, atualizando-se a solução semente e a partir desta, uma nova vizinhança é formada.

²(RESENDE & RIBEIRO 2002)

4.2 Modelagem Matemática do Problema

Um duto é especificado pelos diâmetros internos e externos, tipo material de fabricação e comprimento. A vazão de gás através de um duto é função do diâmetro interno, do comprimento do duto, temperatura do gás, das propriedades físicas do gás e especialmente da diferença das pressões nas extremidades.

A pressão do sistema de transmissão de gás natural não pode ultrapassar a pressão máxima permitida da rede, que é um valor constante de projeto relacionado à resistência do duto. A pressão de fornecimento na estação de compressão deve ser maior ou igual à mínima pressão do sistema, que é outro parâmetro fixado do projeto.

Para ilustrar uma rede de distribuição foi considerado um grafo, onde os vértices representam os clientes com suas possíveis demandas e as arestas representam os tubos por onde o gás fluirá. A cada tubo será associado um diâmetro, que dependerá da vazão e da pressão mínima exigida por cada cliente. Quanto maior o diâmetro do tubo maior será a garantia de atendimento ao cliente.

O tipo de rede que foi considerado na modelagem e nos testes é uma rede conexa ramificada que não contenha ciclos, ou seja, uma árvore, do tipo como mostrado na figura 4.1.

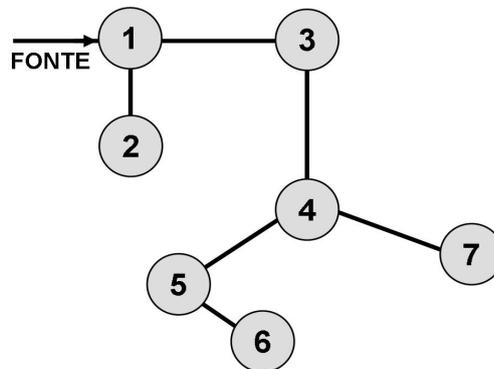


FIGURA 4.1: Configuração de uma rede em árvore com única fonte

O problema pode ser modelado considerando $x_{ij}^d \in \{0, 1\}$ como a variável de decisão que define a existência de uma ligação entre dois nós, representados por i e j . Para melhor compreensão do problema foram adotadas as seguintes hipóteses:

1. A rede tem sua arquitetura conhecida, rede ramificada sem ciclos, ou seja, uma árvore.

TABELA 4.4: Dados referentes aos diâmetros

D. Int (mm)	Rug. (mm)	u.m.
24,3	0,02	10,3
52,5	0,02	14,8
55,6	0,02	15,5
72,92	0,02	18,2
90,6	0,02	19,8
125,6	0,02	24,2
155,6	0,02	29,7

2. Também é conhecida a pressão mínima nos pontos de demanda.
3. A pressão máxima é definida como a máxima pressão que os gasodutos podem suportar.
4. A pressão na fonte da rede também é conhecida, esta deve ser maior ou igual a pressão máxima da rede.
5. As ligações estão sempre operacionais.
6. Na modelagem do fluxo foi considerado um transporte monofásico.
7. Os custos por unidade de comprimento referentes aos diferentes diâmetros encontram-se na tabela (4.4) e foram obtidos junto a uma empresa distribuidora de gás e fazem parte das instâncias utilizadas nos trabalhos de (CASTRO 2004),(COSTA 2004) e (DUARTE 2006).

Neste estudo não foram considerados efeitos relacionados à variação de temperatura e nem a velocidade do gás na tubulação.

O modelo matemático que permite a representação do problema pode ser enunciado pelas seguintes expressões:

onde:

- L_{ij} representa o comprimento entre o nó i e o nó j ;
- C_d representa o custo por unidade de comprimento do diâmetro alocado entre os nós;
- P_{max} representa a máxima pressão definida em projeto;
- P_{min} representa a mínima pressão exigida no ponto de demanda;
- x_{ij}^d representa a variável de decisão que define a existência de uma ligação entre dois nós, representados por i e j ;
- P_i representa a pressão calculada no nó i a partir da Equação fundamental (eq-fundamental).

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n L_{ij} \cdot C^d \cdot x_{ij}^d \quad (4.1)$$

sujeito a

$$x_{ki}^{du} \cdot x_{ij}^d = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} k = 1, 2, \dots, n-2 \\ i = 1, 2, \dots, n-1, \\ j = 1, 2, \dots, n \\ \forall \quad du < d \end{array} \right. \quad (4.2)$$

$$P_i - P_{max} \leq 0 \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

$$P_j - P_{min} \geq 0 \quad \forall \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

$$(P_i - P_j) x_{ij}^d \geq 0 \quad \begin{cases} \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \forall j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4.5)$$

$$P_j^2 = P_i^2 - LGT_a Z_{af} \left(\frac{QP_b}{CT_b D^{2,5} e} \right)^2 \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n-1 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.7)$$

- A função objetivo (4.1) representa a minimização do custo total da rede, expresso como a soma dos custos de cada duto que a compõe. Daí, o custo de cada trecho é uma função do diâmetro do duto e do comprimento da ligação.
- A restrição (4.2) garante que cada duto tenha um duto antecessor de diâmetro maior ou igual ao seu:
 - 1) Se $x_{ij}^d = 0$ não importa qual o valor de x_{ki}^{du} .
 - 2) Se $x_{ij}^d = 1$ então
 - a) $x_{ki}^{du} = 0$ se $du < d$.
 - b) x_{ki}^{du} pode ser 1 se $du \geq d$.
- A restrição (4.5) garante a direção do fluxo. Isto é, partindo-se do pressuposto que o fluxo vai do vértice i para o vértice j . Esta restrição também foi explicitada em (HOEVEN & FOURNIER 1995)).

Pela estrutura em árvore das redes consideradas neste trabalho, (DUARTE 2006) observa que o duto de *upstream* pode ser determinado como aquele que se conecta diretamente ao duto i e representa o único caminho entre o nó-fonte da rede e o duto em questão.

Uma outra restrição é considerar que os dutos podem ser fabricados com tipos de materiais diferentes. Entretanto, não foi adotada esta premissa na modelagem proposta.

Também não se deve esquecer de que o fluxo de gás que entra em um determinado nó é igual ao fluxo de gás que deve sair dele (balanceamento de massa), isso foi garantido na construção das instâncias-teste utilizadas.

A escolha dos diâmetros para os dutos da rede de distribuição é determinada pela diferença entre os quadrados de pressão em cada trecho da tubulação. A partir da equação fundamental (3.6), sendo conhecidas a pressão de entrada do gás em um determinado ponto da rede e as características do gás e do duto em questão, é possível conhecer o quadrado da pressão de saída na outra extremidade do duto, conforme apresentado na equação (4.8).

$$P_2^2 = P_1^2 - LGT_a Z_a f \left(\frac{QP_b}{CT_b D^{2,5} e} \right)^2 \quad (4.8)$$

Observe nas tabelas (4.5) e (4.6) como se comporta a pressão na extremidade de saída em um ramo da rede considerando um diâmetro fixo. Para a pressão, considerando os dutos maiores no ramo tem-se uma queda menor de pressão ao longo da tubulação.

TABELA 4.5: Queda de pressão por perda de carga, duto 24,3 mm

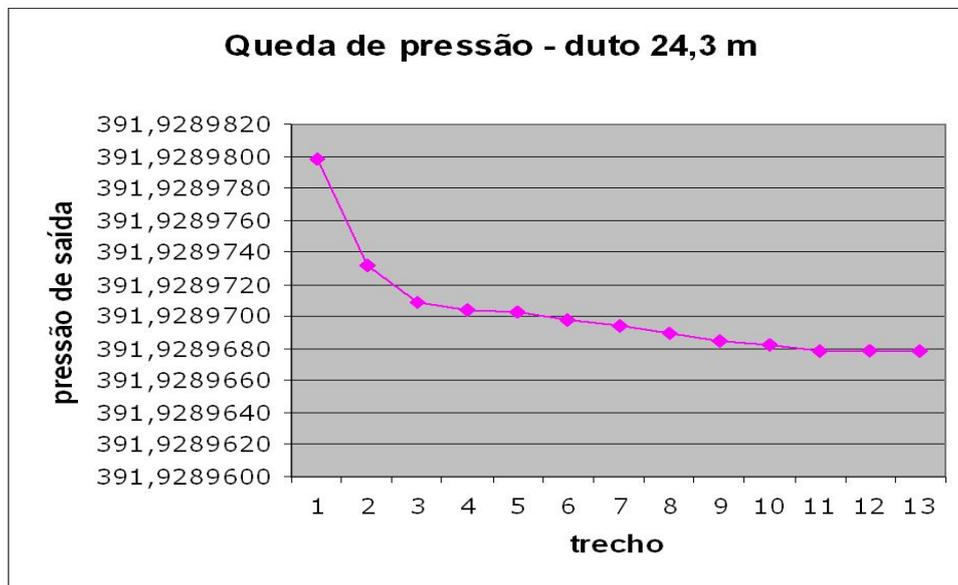
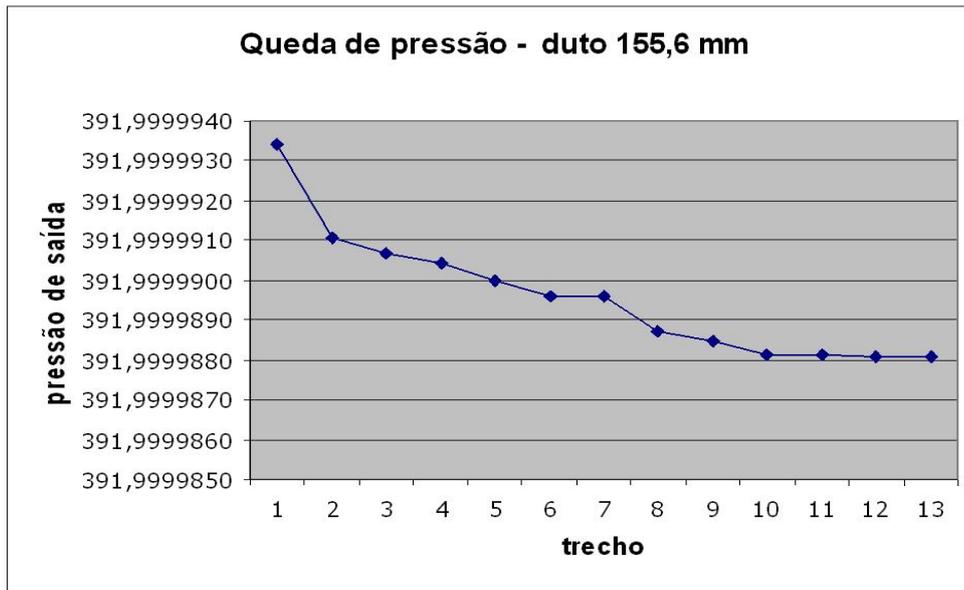


TABELA 4.6: Queda de pressão por perda de carga, duto 155,6 mm



4.3 Grasp para o PDDG

Em um problema com as características deste, (SCHILDT 1997) observa que cada nó adicional no espaço de pesquisa aumenta o número de soluções possíveis em um número muito maior que um. Logo, em algum ponto haverá possibilidades demais para se trabalhar. Como o número de possibilidades cresce tão rápido, apenas os mais simples dos problemas se prestam a pesquisas exaustivas. Uma pesquisa exaustiva é aquela que examina todos os nós - algo como uma técnica de *força bruta*. Força bruta sempre funciona, mas normalmente não é prática, pois consome muito tempo, muitos recursos computacionais, ou ambos. Por essa razão, outras técnicas de pesquisa foram desenvolvidas pelos pesquisadores.

Na implementação do algoritmo o objetivo foi somente trabalhar com soluções viáveis, ou seja, em nenhuma hipótese foram geradas soluções que violassem as restrições do problema. Este fato simplificou a Função Objetivo utilizada, pois não foi necessária a aplicação de funções de penalidade para tratar com violação das restrições, o objetivo foi simplesmente a minimização do custo total de instalação da rede.

Para implementar este problema é necessário primeiro determinar o traçado da rede, que poderá ser definido a partir do algoritmo da árvore geradora mínima (AGM), este

possui algoritmos específicos e eficientes, tais como: algoritmo de Kruskal, algoritmo de Prim e algoritmo de Dijkstra, que constam na referência (BOAVENTURA NETTO 2003).

4.3.1 Solução Inicial

Para manter a viabilidade das soluções por todas as iterações do algoritmo foi considerado um método de geração da solução inicial onde seja garantido que as restrições de pressão, *upstream* serão respeitadas. Portanto, antes de inserir qualquer elemento definitivamente na solução é preciso verificar a sua viabilidade. A solução deve ser construída elemento a elemento (diâmetro a diâmetro) partindo-se da raiz para as folhas da árvore que representa a rede, como ilustrado na figura (4.2). O fluxograma da figura (4.3) apresenta o procedimento de construção da solução inicial.

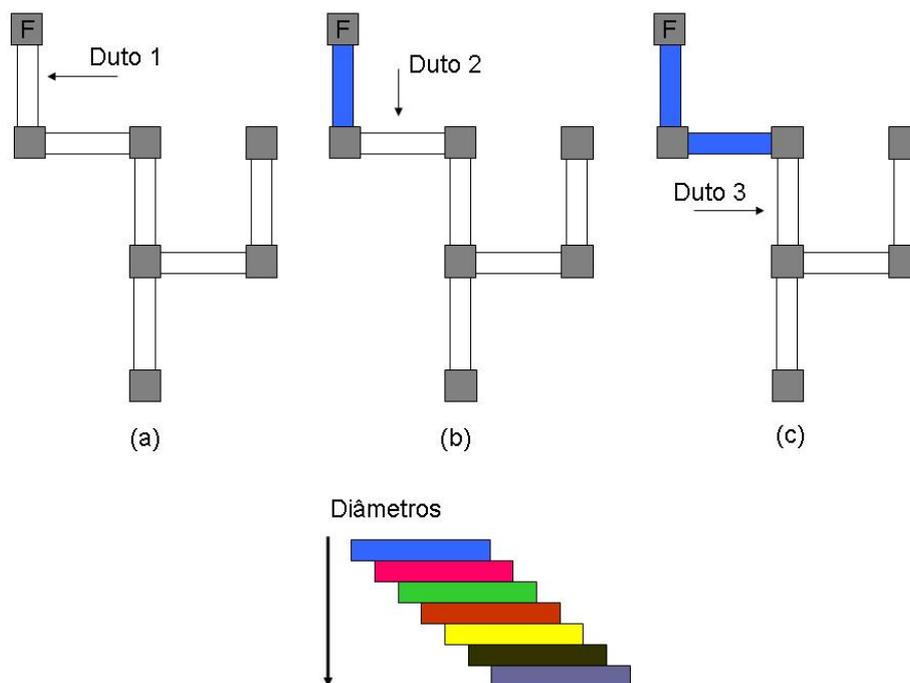


FIGURA 4.2: Construção da solução inicial

Pode ser observado a partir da equação fundamental (3.6), que aumentando-se o diâmetro do duto, aumenta-se conseqüentemente a pressão na extremidade de saída na tubulação.

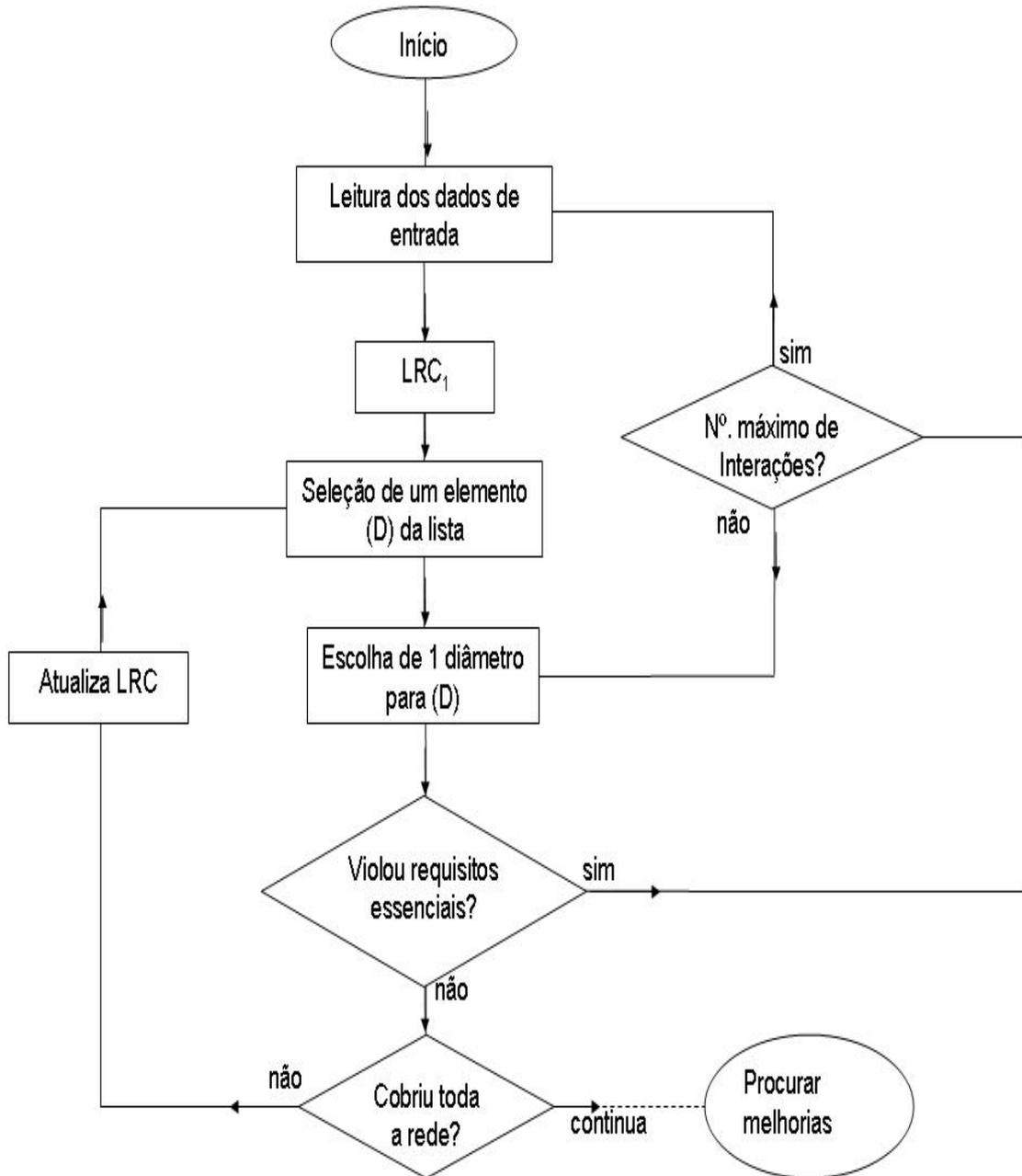


FIGURA 4.3: Construção da solução inicial

Para escolher cada diâmetro, foi criada uma lista ponderada por um certo β , observe a lista (4.9). Esta lista considera os candidatos de maior diâmetro/custo (dutos) na construção da solução. Dependendo do parâmetro β escolhido a lista pode aumentar ou diminuir.

$$LISTA = \{e \in C / C(e) \geq C_{max} + \beta(-C_{max} + C_{min})\} \quad (4.9)$$

TABELA 4.7: Lista $\beta = 0,5$

Diâmetro	Custo
155,6	29,70
125,6	24,20
90,6	19,80

Se $Beta = 1$, significa que todos os diâmetros estão disponíveis para serem escolhidos. Se $Beta = 0$, significa que somente o diâmetro de maior custo está disponível. Se $Beta = 0,5$, significa que somente os diâmetros de custo maior ou igual a 18,35 podem compor a solução inicial, observe tabela (4.7).

A idéia é priorizar os maiores diâmetros para garantir que o programa não terá problema com a satisfação da restrição de pressão. Ou seja, se a rede criada não puder ser configurada apenas com o menor diâmetro, então se torna inviável disponibilizá-lo para o primeiro duto da rede.

Após percorrer toda estrutura da rede com o procedimento supracitado o algoritmo fornecerá uma solução inicial para uma instância do problema. Esta solução gera um custo que deve estar associado a cada diâmetro da rede, ou seja, o custo total é o custo por diâmetro multiplicado pelas distâncias entre as ligações.

Para garantir os resultados referentes as pressões de fornecimento e diâmetros foi utilizado a equação (4.10) que foi originada da equação fundamental (3.6).

$$P_j^2 = P_i^2 - 191544,7 \cdot L_{ij} \cdot \frac{Q_{ij}^2}{D_{ij}^5} \quad (4.10)$$

4.3.2 Busca Local

Depois da solução construída é necessário fazer um procedimento de melhoria, prossegue-se com a busca local. Na tabela (4.8) é apresentado uma noção dos candidatos que irão compor a lista, pode-se perceber que os melhores candidatos são aqueles que apresentam maior comprimento entre dois nós da rede.

TABELA 4.8: Escolha dos candidatos a Lista

nó origem	nó destino	Comprimento
1	2	6
1	7	6
3	4	9
4	6	10
4	15	11
7	3	6
8	10	8
8	13	9
9	8	10
9	5	5
10	18	6
10	11	7
10	17	11
13	14	3
15	16	7
16	9	8
17	12	6
18	19	8

Entrarão na LRC os dutos com maior comprimento como assinalados na tabela (4.8). A probabilidade de escolha será $1/|LRC|$. Uma vez escolhido um duto para ter seu diâmetro reduzido, todos os demais que o sucedem também poderão ter o seu diâmetro reduzido. Isso é feito até que a rede seja válida, ou seja, até que esteja respeitando as condições operacionais impostas na modelagem. O fluxograma da figura (4.4) apresenta o procedimento de busca por melhoria da solução inicial encontrada.

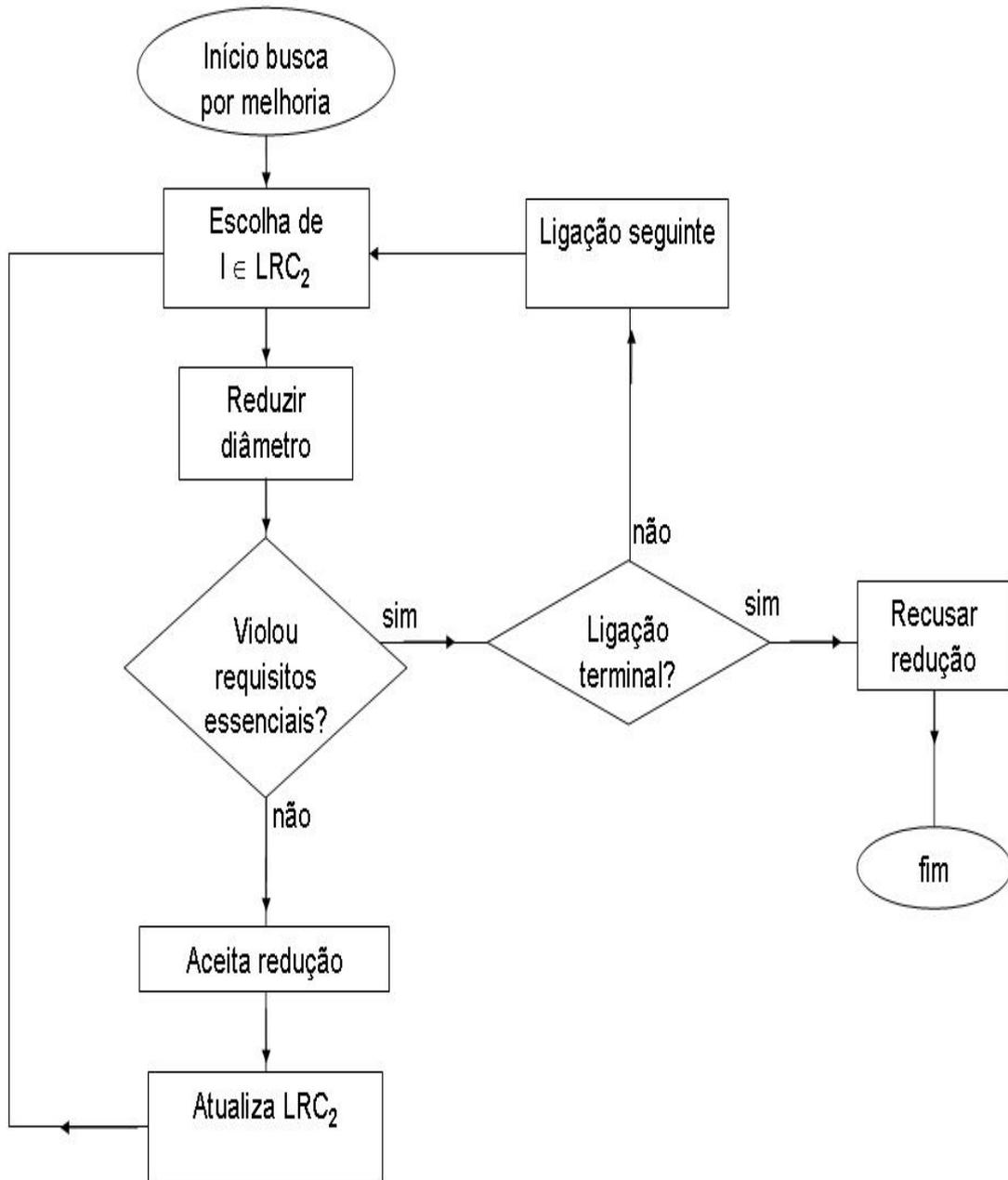


FIGURA 4.4: Busca por melhoria da solução inicial

4.3.3 Entrada dos dados

Para entrada de dados no algoritmo são utilizados arquivos texto, os quais, o programa recorre na fase de construção da solução (escolha dos diâmetros). O arquivo (*Rede_de_Distribuicao.txt*) está no formato apresentado na tabela (4.9):

Todas estas instâncias aqui utilizadas fazem parte dos trabalhos de (CASTRO

TABELA 4.9: Fragmento da Matriz R - Entrada dos dados

P. Origem	P. Destino	Distância	Pressão mín.	Vazão
1	22	7	1	28,95
1	32	6	3	346,88
3	20	8	1	7,99
...
...
...
50	21	8	3	15,61
50	34	6	1	17,95
51	46	2	3	83,17

2004), (COSTA 2004) e (DUARTE 2006) e foram baseadas nas instâncias da TSPLIB (*Travel Salesman Problem Library*) - um banco de instâncias do Caixeiro Viajante, estas foram geradas da seguinte forma: Primeiro, a árvore geradora mínima do grafo completo obtido do problema do Caixeiro Viajante foi calculada e o primeiro nó foi fixado como fonte de gás. Então, valores para o fluxo em cada duto e pressões requeridas por cada nó de demanda foram gerados aleatoriamente numa faixa previamente definida. Lembrando-se do balanceamento de fluxo (fluxo que entra em um nó é igual ao fluxo que deve sair dele). Finalmente, um conjunto de 7 diâmetros diferentes foi escolhido a partir de opções comercialmente disponíveis fornecidas por uma empresa distribuidora. Cada instância do problema do dimensionamento de dutos é referida com o mesmo nome da instância do Caixeiro Viajante que a originou. Maiores detalhes sobre estas instâncias podem ser obtidas nos trabalhos que as criaram originalmente, o de (COSTA 2004) e de (CASTRO 2004).

Se alguma solução violar as restrições de pressão ou do duto de *upstream* estas não serão consideradas. Um exemplo da violação de restrição é apresentado na figura (4.5).

O objetivo é somente trabalhar com soluções viáveis, ou seja, que satisfaçam as restrições de pressão nos pontos de demanda e as restrições do duto de *upstream*. Considerando a restrição de duto de *upstream* uma solução viável é apresentada na figura (4.6).

Como dito anteriormente, a pressão é reduzida ao longo de uma ramificação. De posse de uma solução viável, a intenção é reduzir os diâmetros enquanto se mantém a rede válida. Para exemplificar, na figura (4.7) é apresentada uma ramificação com os

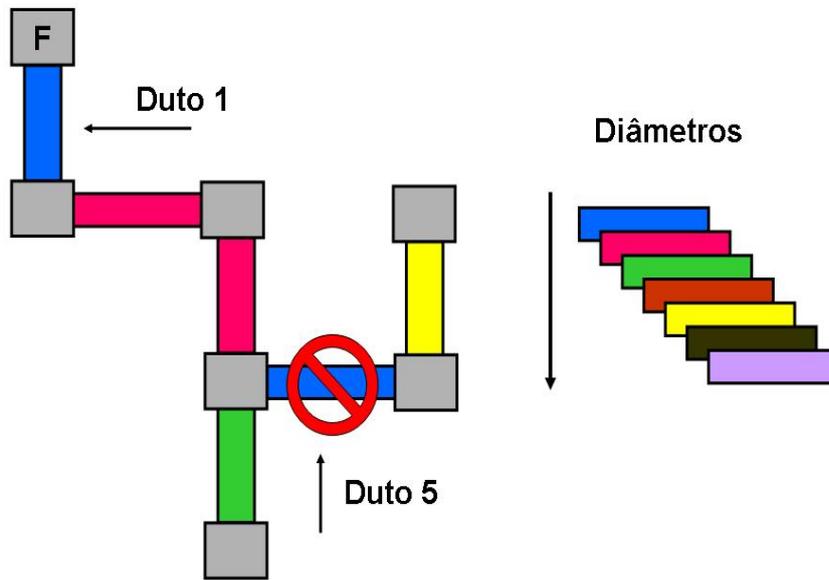


FIGURA 4.5: Violação de restrição

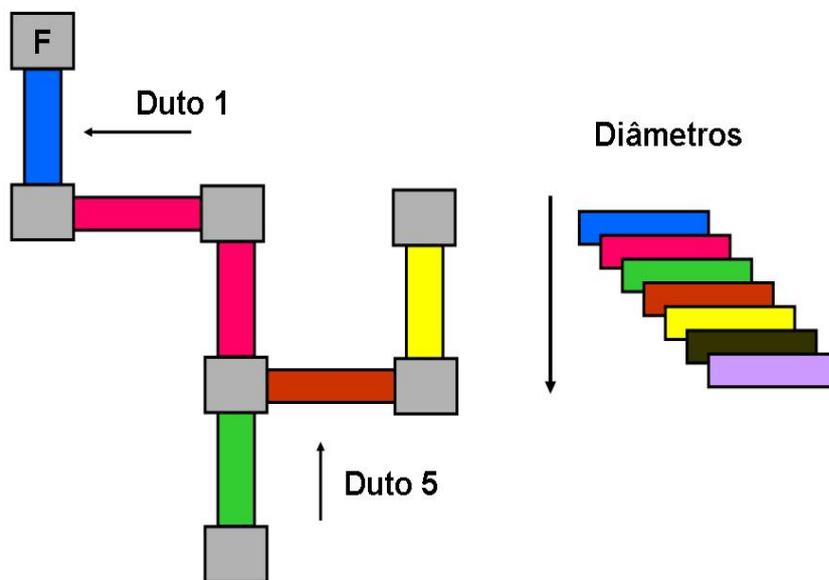


FIGURA 4.6: Solução obedecendo duto de upstream

seus diâmetros já escolhidos. O objetivo agora é trabalhar nesta ramificação de forma que esta continue sendo viável e tenha um menor custo na aquisição dos dutos.

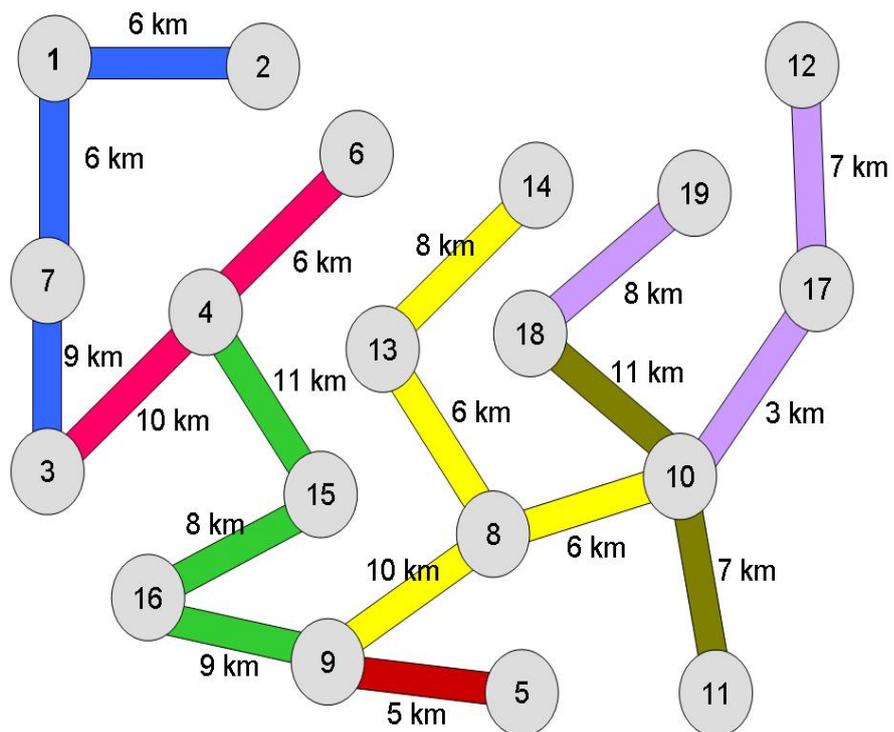


FIGURA 4.7: Ramificação com os diâmetros definidos

O custo inicial da ramificação da figura (4.7) é apresentado na tabela (4.10).

TABELA 4.10: Solução inicial para uma ramificação

Diâm.(mm)	Cust.(u.m.)	nó orig.	nó dest.	Compr.(km)	Custo duto (u.m.)
155,6	29,7	1	2	6	178,2
155,6	29,7	1	7	6	178,2
155,6	29,7	3	4	9	267,3
125,6	24,2	4	6	10	242
125,6	24,2	4	15	11	266,2
90,6	19,8	7	3	6	118,8
90,6	19,8	8	10	8	158,4
90,6	19,8	8	13	9	178,2
77,92	18,2	9	8	10	182
55,6	15,5	9	5	5	77,5
55,6	15,5	10	18	6	93
55,6	15,5	10	11	7	108,5
55,6	15,5	10	17	11	170,5
52,5	14,8	13	14	3	44,4
52,5	14,8	15	16	7	103,6
24,3	10,3	16	9	8	82,4
24,3	10,3	17	12	6	61,8
24,3	10,3	18	19	8	82,4
Custo total					2.593,40

Da solução mostrada na figura (4.7), foi extraída a solução apresentada na figura (4.8) com a redução de algum diâmetro (mudança de cor). Cada cor está associada a um custo, assim para calcular o custo da rede é considerado o custo por diâmetro e o comprimento da ligação, o custo total será o somatório do custo de cada duto. Supondo que a pressão no ponto de demanda foi atendida a ramificação agora tem um menor custo que a ramificação anterior.

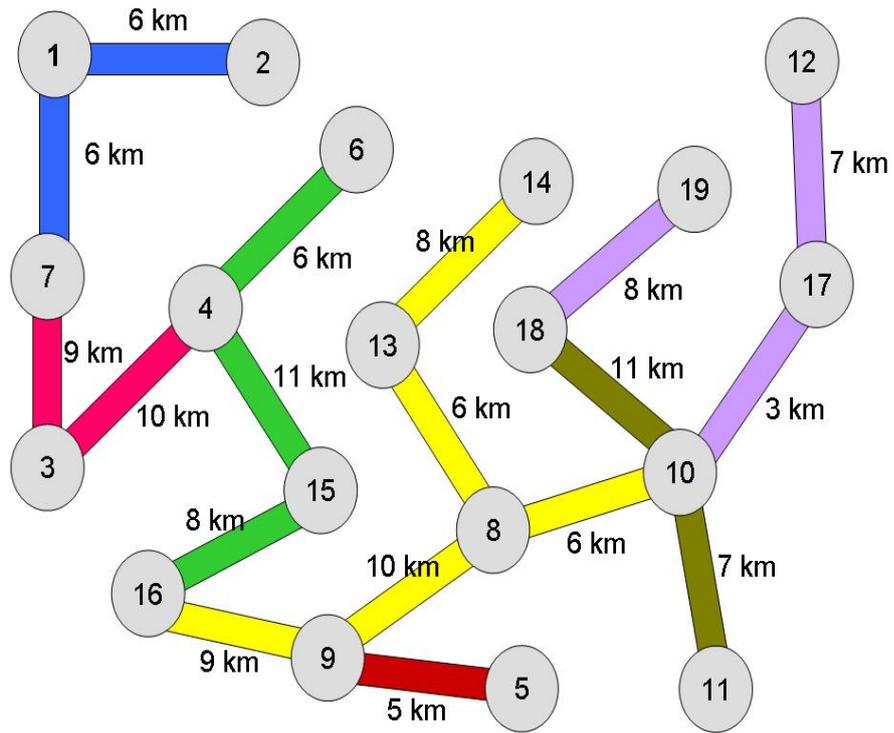


FIGURA 4.8: Solução melhor da Ramificação

A tabela (4.11) apresenta o custo da ramificação da figura (4.8).

Do mesmo modo, a figura (4.9) apresenta uma solução com menor custo para a ramificação. Observe na tabela (4.12) o custo de aquisição desta nova configuração.

TABELA 4.11: Solução com redução de diâmetro

Diâmetro	Custo	nó orig.	nó dest.	Comprimento	Custo por duto (u.m.)
155,6	29,7	1	2	6	178,2
155,6	29,7	1	7	6	178,2
125,6	24,2	3	4	9	217,8
90,6	19,8	4	6	10	198
90,6	19,8	4	15	11	217,8
90,6	19,8	7	3	6	118,8
77,92	18,2	8	10	8	145,6
77,92	18,2	8	13	9	163,8
55,6	15,5	9	8	10	155
55,6	15,5	9	5	5	77,5
55,6	15,5	10	18	6	93
52,5	14,8	10	11	7	103,6
52,5	14,8	10	17	11	162,8
52,5	14,8	13	14	3	44,4
52,5	14,8	15	16	7	103,6
52,5	14,8	16	9	8	118,4
24,3	10,3	17	12	6	61,8
24,3	10,3	18	19	8	82,4
Custo total					2.420,70

TABELA 4.12: Solução com melhoria

Diâmetro	Custo	nó origem	nó destino	Comprimento	Custo por duto (u.m.)
155,6	29,7	1	2	6	178,2
155,6	29,7	1	7	6	178,2
125,6	24,2	3	4	9	217,8
90,6	19,8	4	6	10	198
90,6	19,8	4	15	11	217,8
90,6	19,8	7	3	6	118,8
77,92	18,2	8	10	8	145,6
77,92	18,2	8	13	9	163,8
55,6	15,5	9	8	10	155
55,6	15,5	9	5	5	77,5
55,6	15,5	10	18	6	93
55,6	15,5	10	11	7	108,5
52,5	14,8	10	17	11	162,8
52,5	14,8	13	14	3	44,4
52,5	14,8	15	16	7	103,6
24,3	10,3	16	9	8	82,4
24,3	10,3	17	12	6	61,8
24,3	10,3	18	19	8	82,4
Custo total					2.389,60

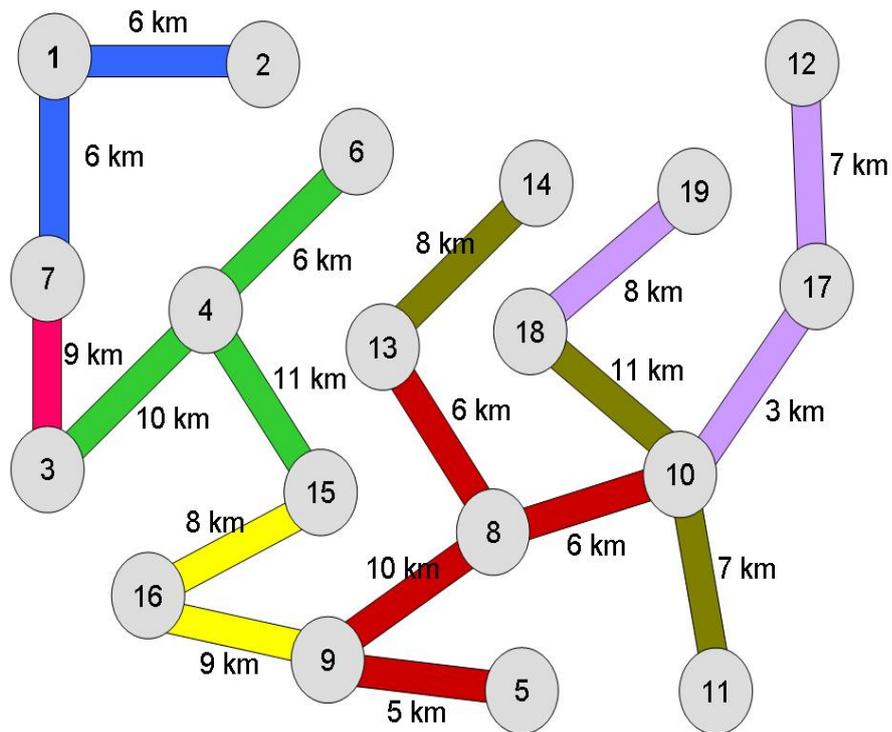


FIGURA 4.9: Solução melhor

Por fim, uma árvore com n nós possui $n-1$ arestas (BOAVENTURA NETTO 2003). Daí, analisando o espaço de soluções do problema do dimensionamento da rede de gás, verifica-se que o conjunto de soluções possíveis corresponde a $(ND)^{n-1}$ ³. O sentido do fluxo de gás foi definido como único, implicando em dizer que a matriz que define a variável binária x_{ij} não é simétrica, e portanto o número de soluções viáveis do problema é inferior a $(ND)^{n-1}$.

³ND corresponde ao número de diâmetros disponíveis

4.4 Conclusão

O GRASP é um procedimento iterativo com completa independência entre as interações, onde cada iteração é composta de duas fases: Construção e busca local.

É muito provável que a solução obtida no término da primeira fase (construção) não tenha atingido um ótimo local, fazendo-se necessário um refinamento na solução inicial o que é feito na segunda fase do procedimento (busca local).

Para se adequar ao problema, a fase de construção foi a menos *gulosa* possível, pois para que as restrições sejam satisfeitas devem ser disponibilizados dutos com maiores diâmetros. Nesse intuito foi utilizado uma Lista que dê preferência aos maiores diâmetros. Uma vez feito isso, o trabalho da busca local é reduzir os diâmetros de forma que a rede continue sendo válida. Assim, foi definido a LRC com base no comprimento das ligações dando preferência àquelas de maior comprimento.

Capítulo 5

Experimentos Computacionais

5.1 Introdução

Por considerações práticas o problema estudado presume um traçado pré-definido da rede.

Neste capítulo são apresentados os experimentos e resultados encontrados na implementação do problema.

5.2 Dados de Entrada

O fluxo de gás que entra em um determinado nó é igual ao fluxo de gás que sai dele (balanceamento de fluxo de massa). Isto é garantido pelas instâncias que foram consideradas nos testes. Detalhes sobre estas instâncias encontram-se em (CASTRO 2004) e (COSTA 2004). Elas também serviram de testes no trabalho de (DUARTE 2006).

Foram fornecidos os seguintes dados de entrada:

Cada uma das instâncias conta com uma vazão fixa de fornecimento.

São conhecidas as pressões mínimas de atendimento a cada cliente da rede.

Unidades de medida (Para estas, foi usado como base o trabalho de (SCHROEDER JR. 2001)):

$G = 0.65$ - Peso específico do gás (adimensional)

$T_a = 298$ K - Temperatura média (Kelvin)

$T_b = 293$ K - Temperatura base (Kelvin)

$Z_a = 0.9973$ - Fator de compressibilidade (adimensional)

Fator de atrito = 0.01 (adimensional)

Pressão base = 101.3 KPas (Kilopascal)

Fator de eficiência do tubo = 0.1 (adimensional)

Pressão máxima = 392 KPas (Kilopascal)

Foi considerado que os dutos são fabricados com apenas um tipo de material.

Para escolha do parâmetro Beta foi utilizado a instância berlin52 como teste. Conforme apresentado na tabela (5.1) as melhores soluções foram obtidas a partir de $\beta = 0.5$ na geração da solução inicial.

TABELA 5.1: Teste para escolha do parâmetro beta

Teste do beta - instância berlin52					
	Beta=0,5	Beta=0,6	Beta=0,7	Beta=0,8	Beta=0,9
1	109889,20	114747,40	116301,90	111403,50	116883,20
2	116650,10	116290,70	102181,70	115005,60	111666,10
3	112823,80	111053,60	152935,20	117558,20	114209,90
4	117270,50	114069,50	152321,40	115330,50	110561,80
5	105309,30	108842,00	151782,40	119796,60	117986,50
6	101877,40	111807,00	110081,90	120866,60	124227,30
7	105321,50	117301,00	117972,50	112385,50	117538,30
8	118536,10	113417,10	115820,00	116204,40	112783,30
9	109174,00	121983,20	120489,30	119699,20	116280,60
10	115204,80	114588,40	118069,80	117566,70	98888,10
média das F.O.	111205,67	114409,99	125795,61	116581,68	114102,51

5.3 Resultados

O algoritmo desenvolvido para resolver o problema foi implementado em linguagem Delphi, usando o compilador Borland Delphi 7.0, devido a sua facilidade na construção de interfaces gráficas e por sua natureza orientada a objetos, o que torna a interação com os usuários mais agradável. O sistema foi testado em um microcomputador PC AMD Sempron Processador 25000+1.4GHz, 512 MB RAM sob o sistema operacional Microsoft Windows XP 2002.

As figuras (5.1),(5.2),(5.3),(5.4),(5.5) (5.6),(5.7),(5.8),(5.9),(5.10) apresentam os melhores resultados para as instâncias testadas. Os resultados foram obtidos no intervalo 25 a 1000 interações.

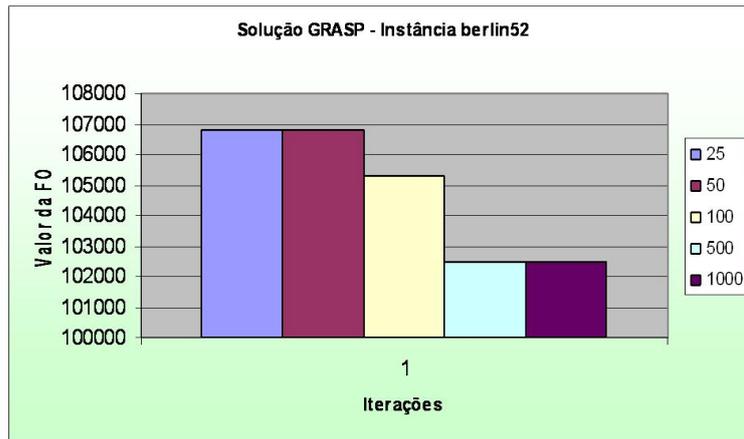


FIGURA 5.1: Melhores resultados para instância berlin52

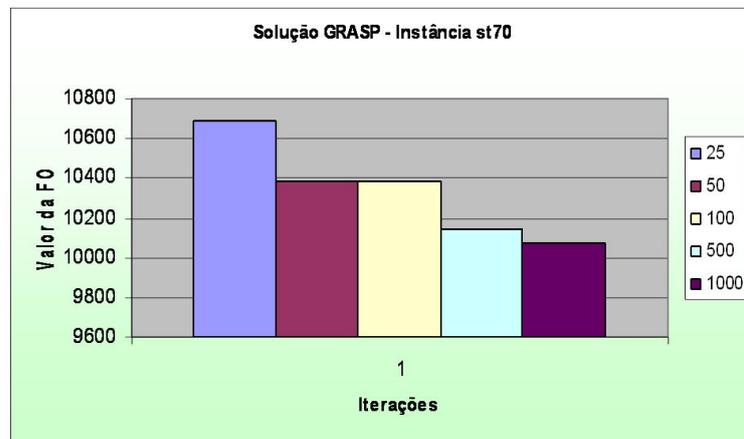


FIGURA 5.2: Melhores resultados para instância st70

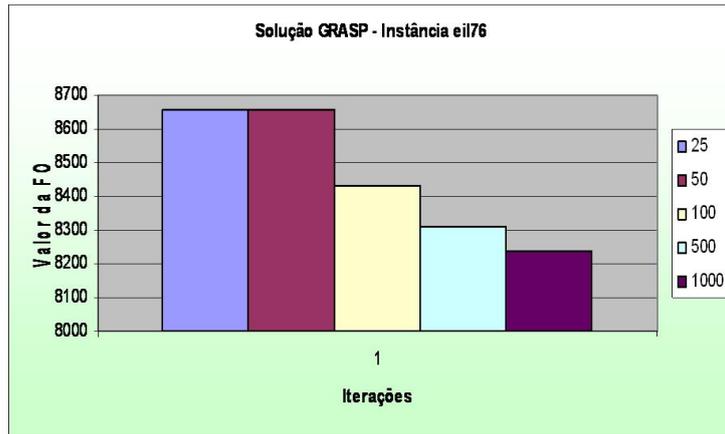


FIGURA 5.3: Melhores resultados para instância eil76

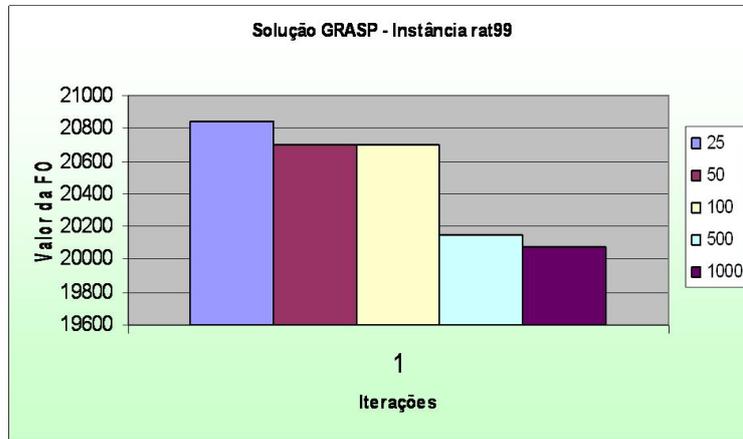


FIGURA 5.4: Melhores resultados para instância rat99

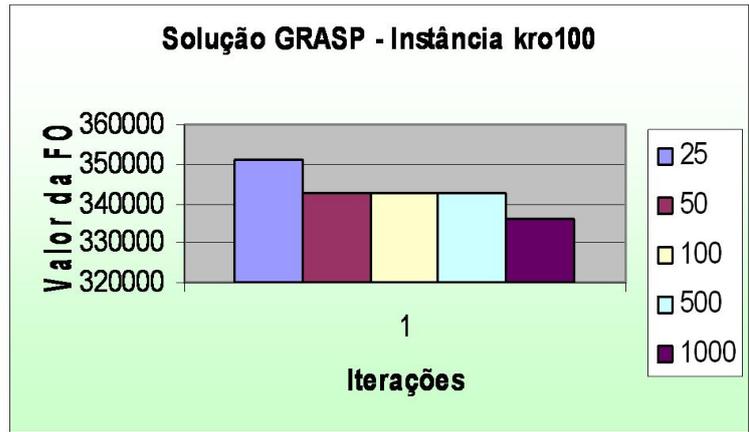


FIGURA 5.5: Melhores resultados para instância kro100

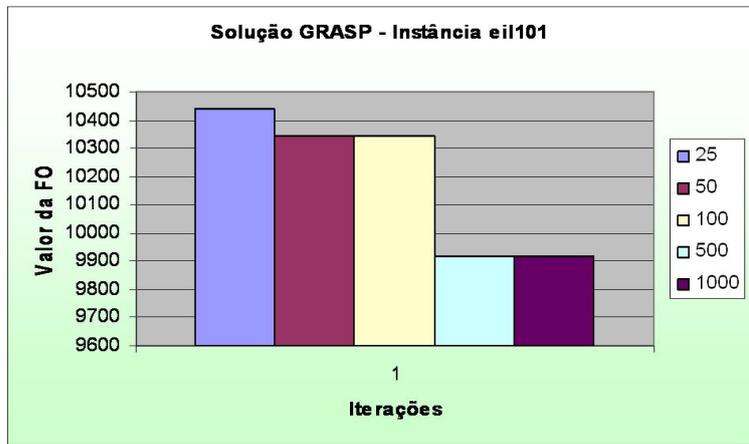


FIGURA 5.6: Melhores resultados para instância eil101

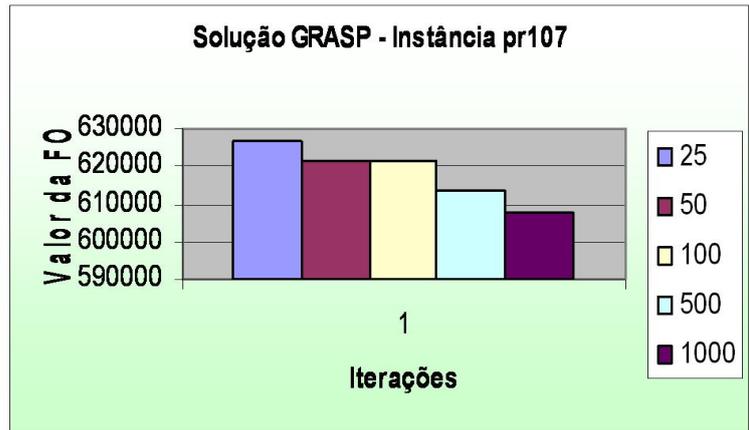


FIGURA 5.7: Melhores resultados para instância pr107

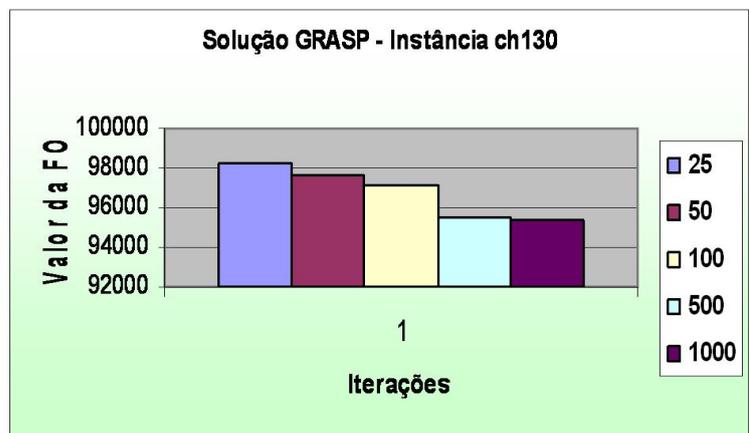


FIGURA 5.8: Melhores resultados para instância pr130

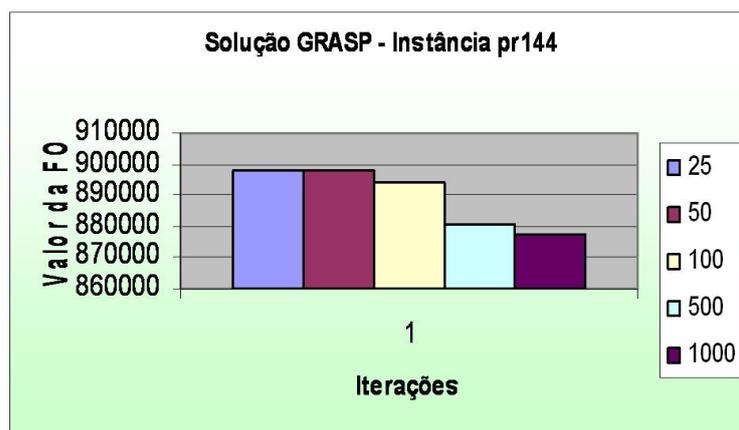


FIGURA 5.9: Melhores resultados para instância pr144

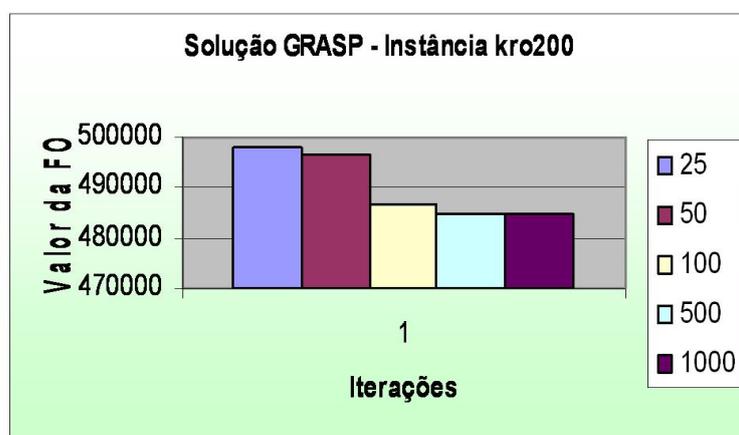


FIGURA 5.10: Melhores resultados para instância kro200

As figuras (5.11), (5.12), (5.13), (5.14), (5.15), (5.16), (5.17), (5.18), (5.19) e (5.20) apresentam uma comparação entre os resultados obtidos pelo método GRASP e pela heurística construtiva de Rothfarb ((ROTHFARB et al. 1969)).

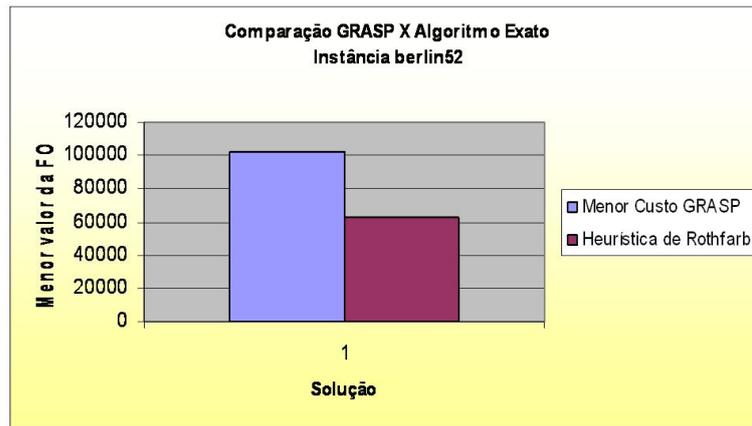


FIGURA 5.11: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

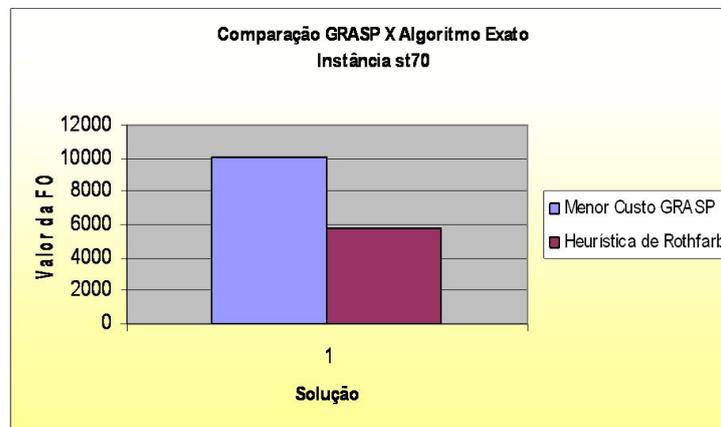


FIGURA 5.12: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

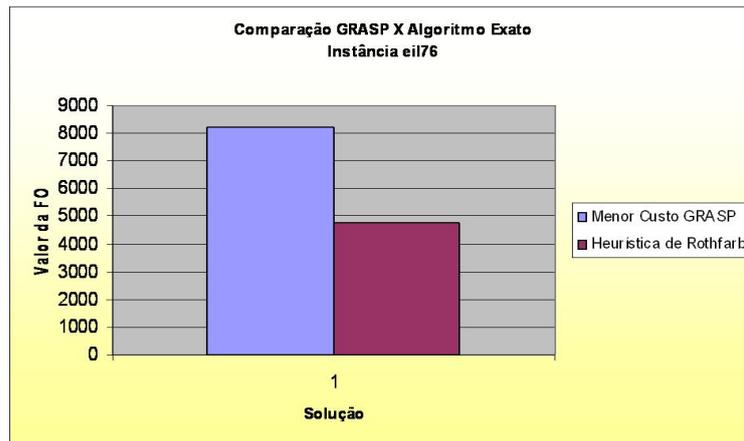


FIGURA 5.13: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

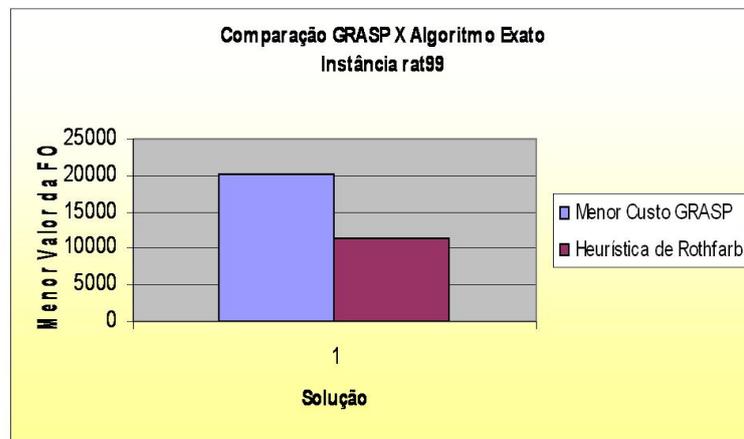


FIGURA 5.14: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

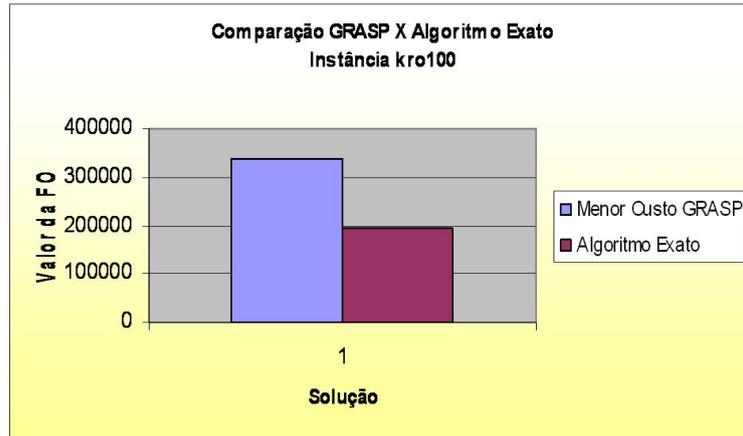


FIGURA 5.15: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

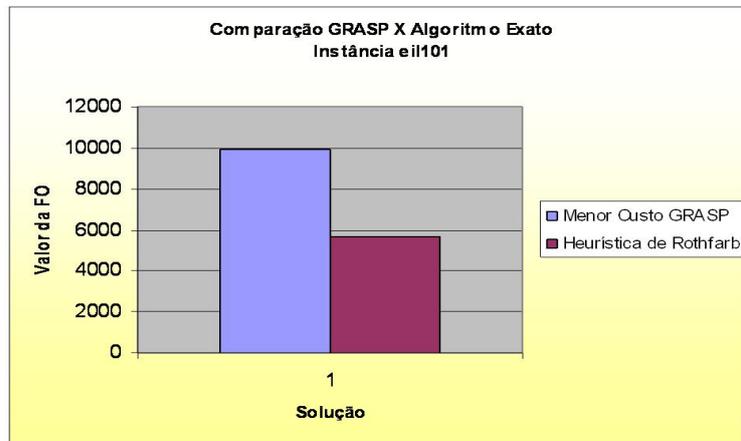


FIGURA 5.16: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

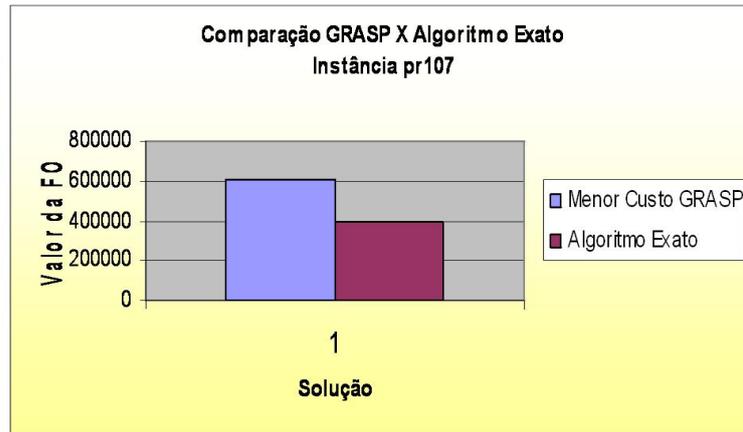


FIGURA 5.17: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

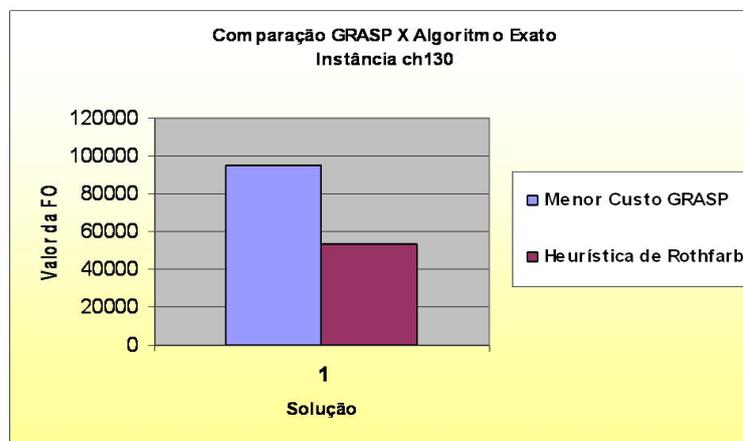


FIGURA 5.18: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

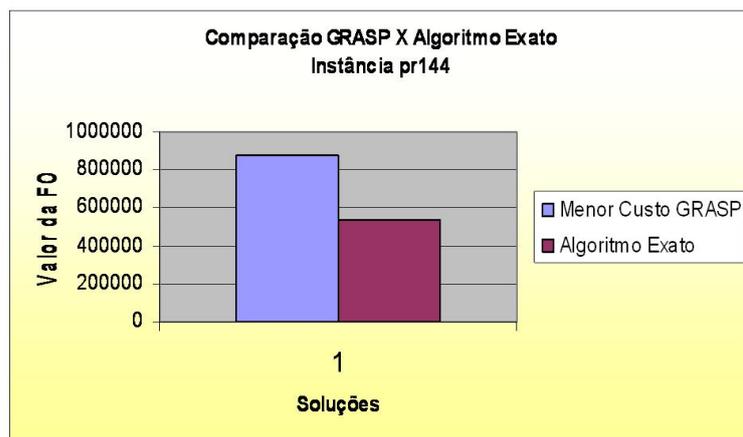


FIGURA 5.19: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

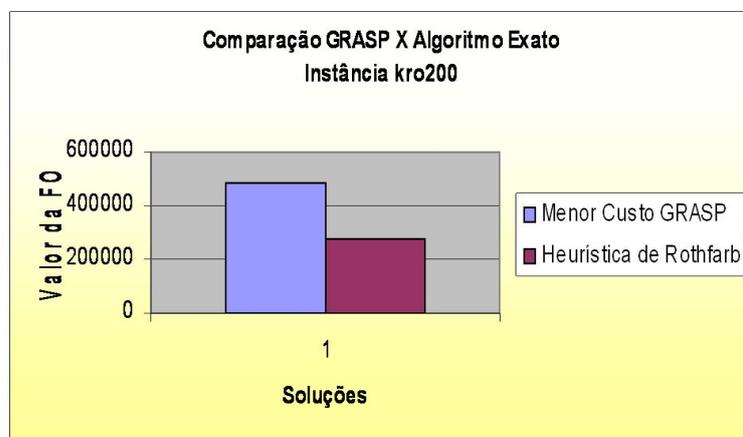


FIGURA 5.20: Melhor resultado GRASP básico X Heurística de Rothfarb

Na tabela é apresentada uma comparação em termos de GAP. O valor do GAP foi calculado usando a seguinte relação: $GAP = (FO - X^*)/X^*$, onde X^* é a melhor solução encontrada pela heurística de Rothfarb.

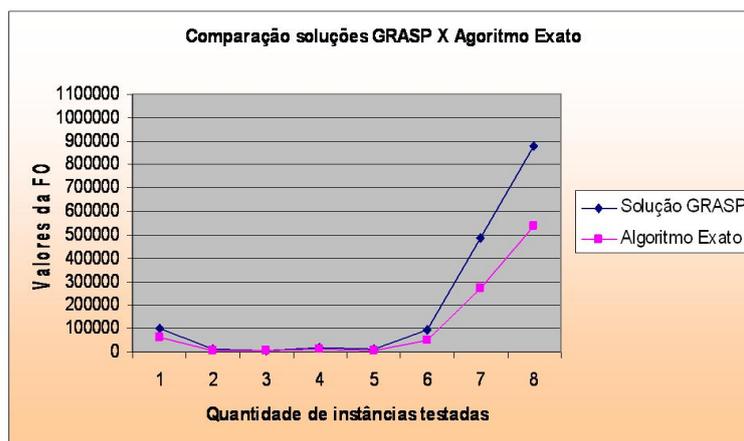


FIGURA 5.21: Comparação soluções GRASP básico X Heurística de Rothfarb

TABELA 5.2: Comparação GRASP X Heurística de Rothfarb

Instância	F.O. GRASP	Heurística	GAP (%)
berlin52	102480,7	62603,4	0,636982975
st7	10073,9	5798,9	0,737208781
eil76	8237,2	4768,9	0,727274634
rat99	20080,7	11402,1	0,761140492
eil101	9918,6	5675,3	0,747678537
ch130	95342,8	53209,8	0,791827821
kroA200	484608,5	274397,8	0,766080122
pr144	877736,3	539456,3	0,627075817
kroaA100	336310,3	193351,6	0,739371694
pr107	607616,6	392422,1	0,548375079

5.4 Conclusão

Este é um problema muito complexo e possui algumas simplificações para este trabalho, como exemplo não foi considerado no modelo estações de compressão e redução de pressão.

Não foi possível aproveitar totalmente o aspecto guloso do método GRASP na escolha dos diâmetros da rede pois em algumas situações os diâmetros menores não podem entrar na solução.

Capítulo 6

Conclusão

Os aspectos relevantes observados durante a pesquisa e recomendações para novos trabalhos são apresentados neste capítulo.

A infra-estrutura de distribuição de gás é muito pouco desenvolvida e são poucos os investimentos feitos no Brasil no sentido para crescimento da sua rede.

Para reduzir os custos com a rede e atender a demanda de forma segura, o estudo de técnicas de Pesquisa Operacional podem representar uma saída para o crescimento da malha dutoviária brasileira.

Sobre isso, (PRAÇA 2003) destaca que a otimização das redes de distribuição necessita de um estudo prévio no sentido de determinar quais as opções de suprimento são realmente viáveis. Este estudo é complexo, pois envolve conjuntamente parâmetros técnicos da rede de distribuição de gás natural, além de aspectos urbanísticos, ambientais, físicos e operacionais das vias existentes.

Em casos de expansão da rede, existem alguns aspectos importantes que devem ser observados:

- Se a expansão começar de um ponto onde os dutos têm os menores diâmetros da rede, a pressão terá que ser muito alta (dependendo do tamanho da expansão) para garantir suprimento aos demais pontos.
- Outra opção será desenterrar os diâmetros antigos e redimensioná-los.

Quanto mais capilarizada for a rede e quanto maior for a densidade populacional da região atendida, menor será o custo marginal de atender a solicitação de um novo usuário.

Como qualquer método heurístico, o algoritmo proposto neste trabalho não garante que a solução ótima global do problema é encontrada.

Não foi encontrado na literatura técnicas de hibridismo utilizando o método GRASP para este problema o que sugere um bom tema para trabalhos futuros.

Quanto aos resultados encontrados, não é habitual que uma heurística supere uma metaheurística nos resultados obtidos.

A idéia como foi construída a solução inicial é relevante pois evitou-se utilizar o maior diâmetro em toda rede.

Constatou-se que o método GRASP básico não foi muito eficiente devido ao procedimento de melhoria adotado na busca local.

Para um próximo trabalho, a idéia é unir o procedimento utilizado na solução inicial utilizando outra forma de melhoria.

Neste trabalho foi considerado um conjunto de sete diâmetros, na heurística de Rothfarb foram considerados seis. Isto fez aumentar a discrepância entre os valores das FOs encontradas.

Seria muito interessante fazer um estudo de caso utilizando uma rede de gás real. Outro ponto interessante é estudar a pressão de fornecimento e a queda de pressão necessária para suprir uma determinada quantidade de clientes na rede.

Enfim, despesas associadas à infra-estrutura de transporte e distribuição constituem um dos principais custos na exploração e produção do gás natural. Projetos bem dimensionados, em termos da seleção dos diâmetros das seções tubulares dos ramos que constituem a malha dutoviária, permitem significativa redução de custos e facilitam a integração de futuras malhas secundárias.

Referências Bibliográficas

- ABEGAS (2006), ‘Demanda e Infra Estrutura do Gás Natural, Perspectiva e Desenvolvimento do Mercado’. Rio Oil Gas Expo and Conference, 11 a 14 de setembro de 2006.
- ABNT (1990), ‘Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível’.
- ALONSO, P. S. R. (1999), ‘O Gás Natural na Matriz Energética Brasileira: avaliação global de seus impactos, estratégias para disseminar sua utilização e criação de um suporte de tecnologias para o Brasil’. Rio de Janeiro - RJ, UFRJ/COPPE. Disponível em <http://www.ctgas.com.br>, acesso em 03 de dezembro de 2005.
- ANICETO, L. A., CORTEZ, B. P. & DIÓGENES, P. N. N. (2004), ‘Gasoduto Virtual: Avançando Novos Mercados - Estudo de Caso’. PANAM - Congresso Pan-americano de Engenharia de Trânsito e Transporte. Disponível em http://www.ctgas.com.br/informacoes/publicacoes/gasoduto_virtual_avan%_novos_mercados_langelo_PANAM2004.pdf.
- ANP (2006), ‘Boletim Mensal do Gás’. Disponível em: www.anp.gov.br/doc/gas/2006/boletimgas200611.pdf, acesso em 15 de outubro de 2006.
- BARROSO, L. C., BARROSO, M. M. A., CAMPOS FILHO, F. F., CARVALHO, M. L. B. & MAIA, M. L. (1987), *Cálculo Numérico (com aplicações)*, 2ª edição edn, Ed. Harbra, São Paulo, SP.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. (2003), *Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos*, 3ª Edição edn, Blücher, São Paulo - SP.
- BORELLI, A. B., NAKA, H. K. & OLIVEIRA, V. C. (2001), ‘Gás Natural - Transporte e Distribuição’. PIPGE-IEE/USP, SÃO PAULO. Disponível em http://br.geocities.com/jbonds_0072001/index.htm, acesso em 12 de abril de 2006.
- C., C. M. & L., R. (2004), ‘Tabu search algorithms for water network optimization’, *European Journal of Operational Research* **157**.
- CASTRO, A. O. S., FRANÇA, M. A., IAMASHITA, E. K., DIAS, A. L. C., PORTO, K. M. P. & SILVA, N. M. S. (2000), ‘Integração de Modelos Matemáticos com Base de Dados Corporativas: O Planejamento da Movimentação e Utilização de Gás Natural’, *XXXII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional* (52), 1517–1527.

- CASTRO, M. P. (2004), ‘Algoritmos Evolucionários para o Problema de Dimensionamento dos Dutos de uma Rede Urbana de Distribuição de Gás Natural’. Dissertação de Mestrado, DIMAP/UFRN, Natal - RN. Disponível em: http://www.ccet.ufrn.br/prh22/trabalhos/dissertacao/2004/Melissa_Castro@_PRH22_UFRN_M.pdf.
- CHAVES, A. A. & LORENA, L. A. N. (2006), ‘Algoritmos Híbridos para uma Generalização do Problema do Caixeiro Viajante’. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos-São Paulo. Disponível em <http://www.lac.inpe.br/loreana/antonio/alg-hibridos-pcvcp.pdf>, acesso em 03 de agosto de 2006.
- COSTA, W. E. (2004), ‘Um Estudo Algorítmico para o Problema do Dimensionamento de Dutos em uma Rede Urbana de Gás Natural’. Dissertação de Mestrado, DIMAP/UFRN, Natal - RN.
- COSTA, W. E., GOUVÊA, E. F. & GOLDBARG, M. C. (2003), ‘Otimização Combinatória para Expansão de Redes de Distribuição de Gás’. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.
- D., B. I., D., S. P. & RADCLIFFE, N. J. (1994), ‘Constrained gas network pipe sizing with genetic algorithms’. University of Edinburgh.
- DORIGO, M. & GAMBARDELLA, L. C. (1997), ‘Ant colonies for the travelling salesman problem’, *Biosystems* **43**(2), 73–81.
- DUARTE, H. M. (2006), ‘Um estudo algorítmico de problemas logísticos na indústria de petróleo e gás natural’. Dissertação de Mestrado, DIMAP/UFRN, Natal - RN. Disponível em <http://www.ppgsc.ufrn.br/html/Producao/Dissertacoes/HerbertDeMeloDuarte.pdf>.
- FEO, T. A. & RESENDE, M. G. C. (1995), ‘Greedy Randomized Adaptive Search Procedures’, *Journal of Global Optimization* **6**(55), 109–133.
- FERRARO, M. C. (2006), ‘Condicionantes da Estrutura de Financiamento: Análise do Setor de Distribuição de Gás Natural’. Dissertação de Mestrado, IE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.
- GLOVER, F. & LAGUNA, M. (1997), ‘Tabu Search’, *Kluwer Academic Publishers*.
- GOLDBARG, M. C. & LUNA, H. P. L. (2005), *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*, 2ª edição edn, Campus/Elsevier, Rio de Janeiro - RJ.
- GOMES NETO, F. A. D. M. & DIAS, C. H. (2007), ‘Otimização de Redes de Distribuição de Água com Bombeamento’. IMECC/UNICAMP. Disponível em http://200.231.172.253/cnmac/storal2/carlos_dias_T9.pdf, acesso em 03 de janeiro de 2007.
- HOEVEN, T. V. D. & FOURNIER, T. (1995), ‘Steady-State Modeling Based on (piecewise) Linear Programming’. Disponível em: <http://www.psig.org/papers/1990/9507.pdf>, acesso em 12 de dezembro de 2005.

- HOLLAND, J. H. (1975), 'Adaptation in natural and artificial systems'. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- IAMASHITA, E. K., GALAXE, F., ARICA, J., JUSTINIANO, L. R. S. & IACHAN, R. (2005), 'Um Algoritmo Genético Híbrido para o Planejamento de Movimentação de Gás da Bacia de Campos', pp. 2164–2175. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- MARTINEZ, A. J. & ABREU, P. L. (2003), 'Gás Natural: o combustível do novo milênio'. Porto Alegre-RS: Plural Comunicação. Disponível em <http://www.ctgas.com.br>, acesso em 23 novembro de 2005.
- NORONHA, T. F. D. (2000), 'Uma Abordagem sobre Estratégias Metaheurísticas'. Disponível em: [http://www.sbc.org.br/reic/edicoes/2001e1/cientificos/ Uma Abordagem sobreEstrategi sMetaheuristicas.pdf](http://www.sbc.org.br/reic/edicoes/2001e1/cientificos/UmaAbordagem sobreEstrategi sMetaheuristicas.pdf).
- OSIADACZ, A. J. & GÓRECKI, M. (1995), 'Optimization of Pipes Sizes for Distribution Gas Network Design'. Disponível em www.psig.org/papers/1990/9511.pdf, acesso em 13 de novembro de 2005.
- PRAÇA, E. R. (2003), 'Distribuição de Gás Natural no Brasil: Um Enfoque Crítico e de Minimização de Custos'. Dissertação de Mestrado - PETRAN/UFC,.
- RESENDE, M. G. C. & RIBEIRO, C. C. (2002), 'Greedy Randomized Adaptive Search Procedure'. In: AT&T Labs Research Technical Report. To appear in: GLOVER, F., KOCHENBERGER, G., 2002, State of Art Handbook in Metaheuristics, Kluwer eds.
- RIBEIRO, C. C. (1996), *Meta-heuristics and Applications*, Estorial, Portugal. In Advanced School on Artificial Intelligence.
- RIOS MERCADO, R. Z., WU, S., SCOTT, L. R. & BOYD, E. A. (2002), 'A Reduction Technique for Natural Gas Transmission Network Optimization Problems', *Annals of Operations Research, Springer* **17**, 217–234.
- RODRIGUES, M. L. P. (2004), 'Otimização da Topologia de uma Malha de Gasodutos através de Algoritmos Genéticos'. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ.
- ROTHFARB, B., FRANK, H., ROSENBAUM, D. M., STEIGLITZ, K. & KLEITMAN, D. J. (1969), 'Optimal Design of Offshore Natural-Gas Pipeline Systems', *Operations Research* **18**(06), 992–1020.
- SCHILDT, H. (1997), *C - Completo e Total*, São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- SCHROEDER JR., D. W. (2001), 'A Tutorial on Pipe Flow Equations'. Disponível em <http://www.psig.org/papers/1997/0112.pdf>, acesso em 12 de dezembro de 2005.
- SURRY, P. D., RADCLIFFE, N. J. & BOYD, I. D. (1995), 'A Multi-Objective Approach to Constrained Optimisation of Gas Supply Networks: The COMOGA Metodo', *Evolutionary Computing: AISB Workshop, Ed: T. C. Fogarty, Springer-Verlag (LNCS 993)*, 166–180.

Apêndice A

Instâncias utilizadas

Neste apêndice se encontram algumas das instâncias utilizadas no PDDG. Estas instâncias seguem o seguinte formato:

n x

pai(1) filho(1) comprimento(1) pressao(1) fluxo(1)

...

pai(n-1) filho(n-1) comprimento(n-1) pressao(n-1) fluxo(n-1)

pressao(0)

fluxo(0)

k

diametro(1) custo(1)

...

diametro(k) custo(k)

Onde:

n é o número de nós da árvore; x é o número de folhas da árvore; pai(i) é o nó de origem no duto i; filho(i) é o nó de destino no duto i; comprimento(i) é o comprimento do duto i; pressao(i) é a pressão mínima de projeto do duto i; fluxo(i) é o fluxo projetado no duto i; pressao(0) é a pressão de entrada no nó raiz (nó 1); fluxo(0) é o fluxo de entrada no nó raiz (nó 1); k é o número de tipos de dutos disponíveis; diametro(i) é o diâmetro do tipo de duto i; custo(i) é o custo do tipo de duto i por unidade de comprimento;

Instância berlin52

52 24

1 22 46 2.00 44.82

1 49 64 3.00 274.24

3 17 217 2.00 0.42

4 25 109 3.00 80.83

5 6 35 3.00 108.24

5 15 25 1.00 16.11

6 4 70 3.00 80.83

7 2 45 2.00 14.17

8 10 180 1.00 20.65

10 9 83 1.00 20.65

12 28 182 3.00 43.50

12 51 188 3.00 19.24

13 14 206 3.00 3.45

13 52 279 3.00 18.04

15 43 242 1.00 16.11

16 50 130 3.00 49.06

18 3 135 2.00 20.20

19 41 92 3.00 39.89

20 23 94 3.00 16.08

21 42 290 2.00 24.62

22 31 104 2.00 44.82

23 30 179 3.00 16.08

24 5 32 3.00 124.36

24 48 16 2.00 17.21

25 12 245 3.00 80.83

26 47 186 2.00 22.00

27 13 185 3.00 21.50

27 26 126 2.00 22.00

28 27 110 3.00 43.50

31 18 80 2.00 20.20

31 21 150 2.00 24.62

32 45 151 3.00 39.89
34 44 80 3.00 49.06
35 34 21 3.00 49.06
36 35 15 3.00 49.06
36 39 43 3.00 185.29
38 24 45 3.00 168.81
39 40 43 3.00 185.29
40 37 41 1.00 8.07
40 38 35 3.00 177.22
41 8 64 1.00 24.87
42 7 76 2.00 24.62
43 33 365 1.00 4.10
44 16 132 3.00 49.06
45 19 75 3.00 39.89
48 46 125 2.00 17.21
49 32 50 3.00 39.89
49 36 81 3.00 234.35
50 20 35 3.00 19.36
50 29 191 2.00 1.00
51 11 285 3.00 19.24
4.00
325.97
7
24.300000 10.30
52.500000 14.80
55.800000 15.50
77.920000 18.20
90.600000 19.80
125.600000 24.20
155.600000 29.70

Instância st70

70 33

1 23 9 3.00 428.13

1 36 4 3.00 27.69

2 7 5 3.00 73.64

3 8 12 3.00 59.26

4 2 9 3.00 73.64

5 53 9 1.00 20.54

6 42 9 3.00 73.64

7 19 11 2.00 7.46

7 32 10 3.00 59.26

8 26 8 1.00 7.83

8 28 4 3.00 51.42

9 40 11 3.00 71.02

10 5 6 3.00 31.65

10 52 6 3.00 222.64

12 34 8 3.00 178.66

14 20 7 3.00 51.42

15 24 4 2.00 25.41

17 9 16 3.00 71.02

17 43 4 3.00 82.83

18 4 4 3.00 73.64

20 30 7 3.00 31.60

21 17 14 3.00 171.15

22 63 4 3.00 56.53

23 38 11 3.00 141.89

23 47 9 3.00 286.24

26 49 9 1.00 7.83

27 46 6 3.00 17.40

28 14 14 3.00 51.42

29 13 2 2.00 20.45

30 44 15 1.00 26.80

31 70 6 2.00 30.77

32 3 6 3.00 59.26
33 54 10 2.00 43.98
34 21 1 3.00 171.15
38 22 8 3.00 74.35
38 69 9 3.00 67.54
39 45 7 3.00 42.37
40 27 13 3.00 17.40
40 61 5 3.00 42.37
41 6 6 3.00 82.83
42 18 6 3.00 73.64
43 41 11 3.00 82.83
44 68 4 1.00 26.80
45 25 8 3.00 13.50
47 16 6 1.00 3.28
47 58 10 3.00 282.96
48 11 9 2.00 12.31
48 67 5 1.00 24.46
49 55 8 1.00 7.83
50 10 9 3.00 254.29
52 60 9 3.00 222.64
54 48 13 2.00 36.77
54 62 11 2.00 7.21
56 51 9 1.00 12.63
56 65 8 1.00 11.83
57 15 7 2.00 25.41
58 37 1 1.00 15.26
58 50 9 3.00 254.29
60 12 9 3.00 178.66
60 33 10 2.00 43.98
61 39 9 3.00 42.37
63 57 14 2.00 25.41

63 59 6 3.00 23.39
63 66 6 2.00 7.73
65 64 20 1.00 4.59
67 56 8 1.00 24.46
69 31 2 2.00 56.14
69 35 12 3.00 2.60
70 29 6 2.00 20.45
4.00
455.82
7
24.300000 10.30
52.500000 14.80
55.800000 15.50
77.920000 18.20
90.600000 19.80
125.600000 24.20
155.600000 29.70

Instância eil76

76 37

1 43 7 3.00 19.96

1 73 5 3.00 492.70

2 68 7 3.00 426.76

5 15 8 3.00 18.91

6 51 6 3.00 38.48

8 35 5 3.00 134.78

9 32 7 3.00 54.91

10 31 13 3.00 1.27

10 58 6 3.00 54.91

11 66 7 3.00 60.88

13 54 8 2.00 10.81

14 59 11 1.00 9.67

15 57 4 3.00 18.91

16 49 9 3.00 36.11

17 40 7 2.00 0.74

20 37 6 2.00 25.63

23 56 6 1.00 3.64

25 55 9 1.00 13.59

27 13 7 2.00 21.57

27 45 6 3.00 146.01

28 61 10 2.00 4.70

28 74 6 3.00 426.76

29 48 6 3.00 114.90

32 44 5 3.00 5.22

32 50 8 3.00 49.69

33 63 6 3.00 39.75

34 46 2 3.00 145.51

34 52 4 3.00 190.55

35 7 5 3.00 29.70

35 19 7 1.00 18.72

35 53 7 3.00 86.35

36 69 7 3.00 4.79
36 71 7 2.00 25.63
38 10 7 3.00 60.88
39 9 4 3.00 54.91
40 12 5 2.00 0.74
41 42 4 3.00 4.93
42 64 9 3.00 4.93
43 41 4 3.00 4.93
44 3 3 3.00 5.22
45 29 4 3.00 126.64
46 8 5 3.00 134.78
47 5 7 3.00 43.56
47 21 6 1.00 26.33
47 36 6 3.00 30.42
48 30 7 3.00 14.59
48 47 6 3.00 100.32
49 24 7 3.00 23.37
50 18 6 1.00 9.58
50 25 8 2.00 20.00
51 17 6 3.00 28.32
52 27 4 3.00 167.58
53 11 8 3.00 60.88
53 14 7 1.00 25.47
58 72 5 3.00 54.91
60 70 4 2.00 25.63
62 22 8 2.00 10.07
62 28 6 3.00 431.46
63 16 6 3.00 36.11
63 23 9 1.00 3.64
65 38 5 3.00 60.88
66 65 7 3.00 60.88

67 34 5 3.00 336.06

68 6 5 3.00 38.48

68 75 4 3.00 361.92

70 20 6 2.00 25.63

71 60 5 2.00 25.63

72 39 5 3.00 54.91

73 33 5 3.00 39.75

73 62 5 3.00 452.95

74 2 7 3.00 426.76

75 4 5 1.00 13.67

75 76 3 3.00 348.24

76 26 6 3.00 12.18

76 67 5 3.00 336.06

4.00

512.66

7

24.300000 10.30

52.500000 14.80

55.800000 15.50

77.920000 18.20

90.600000 19.80

125.600000 24.20

155.600000 29.70

Instância rat99

99 45

1 2 14 3.00 690.64

2 3 9 3.00 663.15

2 10 11 3.00 22.89

3 4 11 3.00 23.50

3 12 7 3.00 639.65

4 14 15 3.00 23.50

5 6 9 3.00 21.31

6 7 11 3.00 21.31

7 8 10 1.00 14.37

8 9 10 1.00 14.37

12 11 6 2.00 10.20

12 13 13 3.00 629.45

13 22 14 3.00 629.45

14 5 12 3.00 23.50

16 15 10 3.00 12.41

16 17 13 2.00 16.40

17 18 10 2.00 16.40

20 19 13 2.00 29.64

21 20 18 2.00 29.64

22 21 6 2.00 29.64

22 23 14 3.00 599.81

23 24 10 3.00 599.81

24 25 9 3.00 599.81

25 16 14 3.00 28.81

25 26 10 3.00 571.00

26 35 12 3.00 571.00

29 37 9 2.00 33.12

30 29 11 2.00 33.12

31 30 12 2.00 33.12

32 31 11 2.00 33.12

32 41 9 2.00 64.39

33 32 12 2.00 112.53
34 33 12 2.00 126.29
34 43 6 2.00 48.81
35 27 13 2.00 15.28
35 36 11 3.00 555.72
36 44 13 3.00 555.72
37 28 9 2.00 19.96
39 38 9 2.00 0.95
39 48 4 2.00 38.49
40 39 6 2.00 39.44
41 40 14 2.00 64.39
43 42 8 1.00 23.38
44 34 13 2.00 175.10
44 45 16 3.00 372.63
45 54 13 3.00 359.75
46 55 15 1.00 22.21
47 46 8 2.00 38.49
48 47 15 2.00 38.49
49 58 12 3.00 316.75
50 49 14 3.00 316.75
51 50 12 3.00 316.75
51 60 14 3.00 23.12
52 51 9 3.00 340.63
53 52 8 3.00 340.63
54 53 14 3.00 359.75
56 65 13 3.00 279.27
57 56 8 3.00 279.27
58 57 13 3.00 293.49
58 59 8 3.00 23.26
60 61 16 3.00 23.12
61 62 9 3.00 23.12
62 63 16 3.00 2.38

65 64 14 3.00 2.93
65 66 11 3.00 276.33
66 67 13 3.00 276.33
67 68 5 3.00 265.60
68 78 14 3.00 265.60
69 70 9 3.00 63.39
70 71 7 2.00 38.09
71 72 13 2.00 20.39
71 80 10 2.00 17.70
74 73 17 2.00 29.25
75 74 14 2.00 29.25
76 75 13 2.00 29.25
76 85 10 3.00 172.96
77 76 12 3.00 202.21
78 69 12 3.00 63.39
78 77 10 3.00 202.21
80 81 13 2.00 17.70
83 82 12 3.00 23.19
83 91 16 2.00 33.58
84 83 16 3.00 70.43
85 84 10 3.00 70.43
85 86 11 3.00 102.53
86 87 11 3.00 91.57
86 95 8 3.00 10.97
87 88 8 2.00 17.71
87 97 15 3.00 68.95
88 79 14 2.00 17.71
90 89 8 3.00 15.63
91 92 7 1.00 29.55
92 93 12 1.00 29.55
93 94 13 1.00 29.55

97 96 11 1.00 13.44

97 98 13 3.00 40.36

98 99 9 3.00 15.63

99 90 10 3.00 15.63

4.00

690.64

7

24.300000 10.30

52.500000 14.80

55.800000 15.50

77.920000 18.20

90.600000 19.80

125.600000 24.20

155.600000 29.70