

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO-UENF
CENTRO DE CIENCIA E TECNOLOGIA-CCT
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA PRODUÇÃO-LEPROD**

DIEGO JÚLIO PACHECO

**MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE DISTRIBUIÇÃO DO
COMBUSTÍVEL EM GASODUTOS ATRAVÉS DAS
METAHEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ
Agosto de 2014**

DIEGO JÚLIO PACHECO

**MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE DISTRIBUIÇÃO DO
COMBUSTÍVEL EM GASODUTOS ATRAVÉS DAS
METAHEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Gudelia Guillermina Morales de Arica, D.Sc.

Co-orientador: José Ramón Arica Chávez, D.Sc

**CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ
Agosto de 2014**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

45/2014

Pacheco, Diego Júlio

Minimização dos custos de distribuição do combustível em gasodutos através das metaheurísticas Grasp e Busca Tabu / Diego Júlio Pacheco. – Campos dos Goytacazes, 2014.

xv, 100 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia de Produção. Campos dos Goytacazes, 2014.

Orientador: Gudelia Guillerミア Morales de Arica.

Área de concentração: Pesquisa operacional.

Bibliografia: f. 88-91.

1. REDES DE GASODUTOS 2. CUSTO DE TRANSPORTE 3. ESTAÇÕES COM UNIDADES DE COMPRESSÃO NÃO IDÊNTICAS 4. METAHEURÍSTICA BUSCA TABU I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia de Produção II. Título

CDD 665.744

DIEGO JÚLIO PACHECO

**MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE DISTRIBUIÇÃO DO
COMBUSTÍVEL EM GASODUTOS ATRAVÉS DAS
METAHEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientador(a): Gudelia Guillermina Morales de Arica, D.Sc.
Co-orientador: José Ramón Arica Chávez, D.Sc.**

Aprovado em: 28/08/2014

(Gudelia Guillermina Morales de Arica D.Sc - UENF/CCT/LEPROD)

(José Ramón Arica Chávez D.Sc - UENF/CCT/LEPROD)

(Edson Kenji Iamashita D.Sc – PETROBRÁS)

(Luis Henrique Zeferino D.Sc – FAETEC/CAMPOS)

**CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ
Agosto de 2014**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível. Aos meus pais Ernande e Eulália; pelo esforço, dedicação e compreensão, em todos os momentos desta e de outras caminhadas. Para minha avó Maria Benedita e aos irmãos Vinícius, Thaís e Lívia pelo apoio em todos os momentos desta importante etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pela contribuição, dentro de suas áreas, para o desenvolvimento desta Dissertação, e, principalmente pela dedicação e empenho que demonstraram ao longo do curso.

A minha orientadora, a professora Gudelia Guillermina Morales de Arica e ao meu co-orientador, o professor José Ramón Arica Chávez, pela dedicação, conhecimento, incentivo, confiança e credibilidade para a realização desta Dissertação.

Ao coordenador do curso de Pós-Graduação o professor Manuel Antonio Molina.

A minha família.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho conseguisse atingir aos objetivos propostos.

“O homem com um novo conhecimento é
um homem transformado”

Álvaro Vieira Pinto

RESUMO

Gasodutos são sistemas de redes de tubulações compostas por variados equipamentos. Nestes sistemas de redes o gás natural é transportado por diferença de pressão. Vários fatores levam à perda de pressão quando o fluxo de gás é transportado, como transferência de calor e atrito com a parede dos dutos. Para manter o fluxo do transporte do gás natural existem estações de compressão, compostas por conjuntos de compressores, que restauram a pressão, consumindo uma parte do gás transportado, tornando significativo o custo desta operação. Com o intuito de minimizar o custo do combustível a ser transportado, devem ser determinadas configurações dos compressores nas Estações de compressão.

O problema do transporte do gás natural é complexo, os modelos são não-lineares, não-convexos, de grande porte e não diferenciáveis. O problema que envolve a movimentação do gás natural utilizando uma rede complexa de dutos é NP-*Completo* (em outras palavras, o número de operações que exige para encontrar uma solução exata do problema é aumentado exponencialmente com o tamanho do problema).

Portanto, para a minimização do custo do transporte do combustível são desenvolvidos dois algoritmos metaheurísticos para a resolução da abordagem numérica do problema: GRASP e Busca Tabu. Estes tipos de algoritmos já foram propostos em trabalhos anteriores com distintas modelagens computacionais, a qual obteve resultados significativos. Neste trabalho, será considerado o modelo de Estação de compressão composta por compressores não necessariamente idênticos, denominado Estação *Generalizada*. Considera-se o sistema em estado estacionário. Foram realizados experimentos computacionais e comparações entre as duas metaheurísticas abordadas em casos existentes na literatura, obtendo-se resultados satisfatórios. Os experimentos numéricos realizados sugerem um melhor comportamento da Busca Tabu.

Palavras chaves: Rede de gasodutos, Custo de transporte, Estações com unidades de compressão não idênticas, Metaheurística Busca Tabu.

ABSTRACT

Pipelines are the pipe network systems composed by some equipments. In these network systems, natural gas is transported by the pressure difference. Several factors lead to the loss of pressure when the gas flow is transported, as heat transfer and friction with the wall of the pipe. To keep the flow of transport exist gas compressor stations, that are composed of sets of compressors, to restoring pressure consuming part of the transported gas, making significant cost of operation. In order to minimize the cost of fuel to be transported must be certain compressor settings in compressor stations.

The problem of transport of natural gas is complex, the models are non-linear, non-convex, large and non-differentiable. The problem that involves the movement of natural gas using a complex pipeline network is *NP-complete* (in other words, the number of operations that require to find an exact solution of the problem is increased exponentially with the size of the problem).

Therefore, to minimize the cost of transporting fuel two metaheuristics algorithm are developed to solve the problem of the numerical approach – GRASP and Tabu Search. These heuristics have been proposed in previous studies with different computational modeling, which obtained significant results. In this paper, we considered the model station consists of not necessarily identical compressors, called *generalized* station. The system is considered to be at steady state. Computational experiments and comparisons between heuristics addressed in existing cases in the literature were performed yielding satisfactory results. The numerical experiments suggest a better performance of Tabu Search.

Key words: Gas pipeline networks, Transportation cost of fuel, Stations with compression units not identical, Metaheuristic Tabu Search.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1.1 - Projeção da energia primária mundial por combustível (Fonte: IEA, 2011).....	2
Figura.1.2 – Reservas provadas de gás natural no mundo (Fonte: adaptado de BP, 2013).....	3
Figura 1.3 – Razão Reservas por produção nas regiões mundiais (R/P) (Fonte: adaptado de BP, 2013).....	3
Figura 1.4 – Classificação do gás natural quanto a sua origem (Fonte: VIEIRA <i>et al.</i> , 2005) ..	4
Figura 1.5 - Reservas provadas de gás natural – 1964-2010 (Fonte: ANP, 2011)	5
Figura 1.6 - Gráfico das Reservas provadas de gás natural – 1964-2010 (ANP, 2011).....	6
Figura 1.7 - Distribuição das reservas provadas de gás natural no Brasil por Região (Fonte: ANP, 2011).....	6
Figura 1.8 - Reservas totais e provadas de gás natural, por localização (terra e mar). (Fonte: ANP, 2011).....	7
Figura 1.9 - Histórico da Produção de gás natural no Brasil: Março/2012 - Março/2013 (Fonte: ANP, 2013)	8
Figura 1.10 - Produção de Petróleo e Gás Natural por Estado. (Fonte: ANP, 2013)	9
Figura 1.11 - Distribuição da produção de Gás Natural por Estado. (Fonte: ANP, 2013).....	9
Figura 1.12 - Distribuição da produção de Petróleo e Gás Natural por Bacia. (Fonte: ANP, 2013).....	10
Figura 2.1: Equilíbrio de fluxo para um nó (Fonte: JUBINI, 2008).....	18
Figura 2.2: Exemplo de uma rede simples (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000))	20
Figura 2.3 - Exemplo de gasoduto (adaptado de Wu <i>et al.</i> , (2000))	22
Figura 2.4.- Rede reduzida da Figura 2.3 (Fonte: Azeredo (2008))	23
Figura 2.5 - Estação de compressão com compressores (Fonte: Azeredo, (2008)).....	26
Figura 3.1 – Eficiência como uma função de Q/S (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	29
Figura 3.2 – Domínio de um compressor centrífugo envolvendo H, Q e S. (Fonte: Adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2000).	30

Figura 3.3 - Perfil do domínio para uma unidade do compressor (Fonte: Pacheco, 2012)	31
Figura 3.4 – Perfil de D^{unit} do compressor para p_s fixo (Fonte: Paula, 2012).....	32
Figura 3.5 - Domínio D de uma estação com quatro compressores idênticos e em paralelo. (Fonte: Wu <i>et al.</i> , 2000)	33
Figura 3.6 - Perfil do domínio D de uma estação com quatro compressores idênticos e em paralelo (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	34
Figura 3.7: Aproximação linear externa do contorno (arco ACBD) (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000))	35
Figura 3.8 - Superconjunto D do domínio viável D (estação com quatro compressores em paralelo) (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	37
Figura 3.9 - Perfil de D e D (estação com quatro compressores em paralelo) (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	37
Figura 3.10: Perfil dos domínios unitários de dois tipos diferentes de compressores ($p_s = 500$ (psia)) (Fonte: Azeredo, (2008)).....	40
Figura 3.11: Eficiência η para os compressores de tipo A e B. (Fonte: Azeredo, 2008)	40
Figura 3.12: Perfil dos domínios unitários de dois tipos diferentes de compressores ($p_s = 500$ (psia)) (Fonte: Azeredo, (2008)).....	43
Figura 3.13: Aproximação inteira para os perfis dos domínios unitários dos compressores do tipo A e tipo B	44
Figura 3.14: Aproximação linear externa para os perfis dos domínios unitários dos compressores do tipo A e tipo B. (Fonte: Azeredo, (2008)).	44
Figura 3.15: Função custo $g^{unit}(v, p_s, p_d) \in D^{unit}$ para p_s fixo (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	46
Figura 3.16 - Determinação das pressões de descarga viáveis para dados v e p_s	47
Figura 3.17 - Determinação das pressões de sucção viáveis para dados v e p_d	47
Figura 3.18: Custo de combustível para diferentes números de compressores funcionando em uma estação com quatro compressores idênticos em paralelo. (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000)).....	48
Figura 4.1- Exemplo de gasoduto (adaptado de Wu <i>et al.</i> ,2000).....	51
Figura 4.2 - Rede reduzida da Figura 4.1 (Fonte: Azeredo (2008))	60

Figura 4.3 – Ciclagem na Busca Tabu (Fonte: FRAGA <i>et al.</i> , 2006).	66
Figura 4.3 – Algoritmo clássico de Busca Tabu (Fonte: SUBRAMANIAN <i>et al.</i> , 2011).	68
Figura 5.1 - Rede do exemplo 1 (Fonte: Borraz-Sánchez (2009))	77
Figura 5.2 - Rede do exemplo 2 (Fonte: Borraz-Sánchez (2009))	77
Figura 5.3 - Rede do exemplo 3 (Fonte: Borraz-Sánchez (2009))	78
Figura 5.4 - Rede do exemplo 4 (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000))	79
Figura 5.5 - Rede do exemplo 5 (Fonte: Wu <i>et al.</i> , (2000))	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Exemplo de divisão da taxa de fluxo de massa v para compressores do tipo A e tipo B.	41
Tabela 4.1 - Variações de intervalos i e dos passos Δ e dos vizinhos inferior e superior de v^4	69
Tabela 5.1 - Variáveis dos Compressores Tipo A e B (Fonte: Rodrigues (2010))	76
Tabela 5.2 - Resumo das distribuições das pressões e custos.(Exemplos de 1 a 5 - Heurística GRASP).....	81
Tabela 5.3 - Resumo das distribuições das pressões e custos. (Exemplos de 1 a 5 - Heurística Busca Tabu).....	82
Tabela A.1 Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 1 (GRASP)	92
Tabela A.2 Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 1 (BUSCA TABU).....	92
Tabela A.3 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 2 (GRASP)....	92
Tabela A.4 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 2 (BUSCA TABU).....	92
Tabela A.5 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 3 (GRASP)...	93
Tabela A.6 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 3 (BUSCA TABU).....	93
Tabela A.7 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 4 (GRASP)....	93
Tabela A.8 - Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 4 (BUSCA TABU).....	93
Tabela A.9 - Fontes da Rede – Exemplo 5 (Fonte: Wu <i>et al.</i> , 2000)	94
Tabela A.10 - Dados dos dutos – Exemplo 5 (Fonte: Wu <i>et al.</i> , 2000)	94
Tabela A.11 - Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,3$ - algoritmo principal) ...	95
Tabela A.12 - Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,5$ - algoritmo principal) ...	96

Tabela A.13 - Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,7$ - algoritmo principal) ...	97
Tabela A.14 - Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu: $\alpha=0,3$ algoritmo principal)	98
Tabela A.15 - Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu: $\alpha=0,5$ algoritmo principal)	99
Tabela A.16 - Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu $\alpha=0,7$ - algoritmo principal)	
.....	100

SUMÁRIO

Capítulo 1-INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos do trabalho	15
CAPÍTULO 2 - MODELOS DE ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO	17
2.1 Modelo Clássico de Estação de Compressão	17
2.2 Modelo Generalizado de Estação de Compressão.....	24
CAPÍTULO 3 - DOMÍNIO VIÁVEL DE UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO E FUNÇÃO CUSTO DE COMPRESSÃO	28
3.1. Domínio viável do modelo clássico	28
3.1.1 Domínio viável para um único compressor	28
3.1.2 Domínio viável para uma Estação de Compressão Clássica (EsCC)	32
3.1.3 Aproximação para o domínio D da Estação Clássica.....	34
3.2 Domínio de uma Estação Generalizada (EsCG).....	38
3.2.1 Aproximação do domínio viável do modelo Generalizado	42
3.3 Função Custo do combustível do modelo Clássico	45
3.3.1 Função custo de combustível para um compressor	45
3.3.2 Função custo para uma Estação de compressão	46
3.4 Função custo do combustível para uma Estação generalizada	48
CAPÍTULO 4 - METAHEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU	51
4.1 Determinação da viabilidade e custo de compressão de (v, ps, pd) numa EsCG.....	54
4.2 Metaheurística GRASP - <i>GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE</i>	58
4.2.1 Lista restrita de candidatos (LCR) e busca local	59
4.2.2 Metaheurística GRASP para resolução do problema	59

4.3 Metaheurística de Busca Tabu.....	65
4.3.1 Metaheurística de Busca Tabu para a resolução do problema.....	68
CAPÍTULO 5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS E RESULTADOS DAS IMPLEMENTAÇÕES DAS HEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU.....	75
5.1 Resultados.....	83
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXO A - RESULTADO DOS EXEMPLOS NUMÉRICOS	92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O gás natural (GN) está conquistando uma participação cada vez maior na matriz energética mundial. Em nível global, o gás natural representa aproximadamente 24% do consumo de energia primária (BP, 2013). Segundo IEA (2011), a utilização do gás natural em relação a 2010 vai aumentar em mais de 50% sendo responsável por mais de 25% da demanda mundial de energia em 2035, designando a este, a perspectiva da era de ouro do GN.

As reservas de gás no mundo estão estimadas em 190 trilhões de metros cúbicos (m^3), entretanto as reservas de gás recuperáveis (volume que, com o desenvolvimento da tecnologia poderá ser extraído) estão estimadas em 400 trilhões de metros cúbicos (m^3). Baseado nas taxas atuais de consumo de gás, estas reservas juntas durariam cerca de 250 anos (IEA, 2011).

A demanda global de gás natural de acordo com IEA (2011), vai de 3,1 trilhões de metros cúbicos (m^3) em 2008 para 5,1 trilhões de metros cúbico (m^3) em 2035, evidenciando um crescimento de 62% - com taxa média de crescimento da demanda de gás sendo cerca de 2% ao ano. O GN vê o crescimento mais forte da demanda de todas as fontes de energia, em termos absolutos. Segundo IEA (2011), a participação do GN na matriz energética global também aumenta de 21% em 2008 para 27% em 2035.

Pode-se observar, na Figura 1.1, que antes de 2030 a demanda de gás ultrapassará a de carvão. Isto devido a um efeito combinado de um forte aumento na demanda de GN ao longo do período observado e um declínio na demanda global de carvão de 2020 em diante, resultando na demanda global do GN ultrapassando o carvão antes de 2030, se tornando o combustível com a segunda maior na participação no mix global de energia.

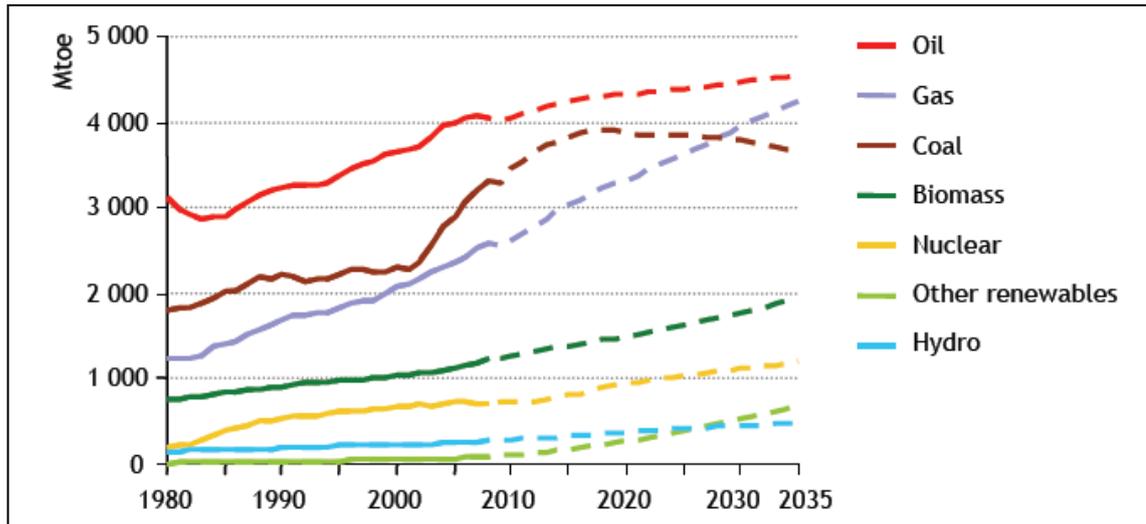


Figura 1.1 - Projeção da energia primária mundial por combustível (Fonte: IEA, 2011)

As reservas de GN são abundantes e estão espalhadas no mundo todo, isto juntamente com os recentes avanços da tecnologia dão suporte ao aumento da comercialização global do GN. O desenvolvimento oportuno e bem sucedido depende entretanto, de um conjunto complexo de fatores, incluindo as escolhas políticas, condições de mercado e capacidade tecnológica.

Entende-se como Reservas os recursos descobertos de gás natural comercialmente recuperáveis a partir de uma data de referência (ANP, 2011). A estimativa desses valores incorpora certo grau de incerteza quanto às informações de geociências, engenharia e de natureza econômica e, em função disso, as Reservas podem ser classificadas como:

- **Reservas Provadas** - aquelas que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente com elevado grau de certeza;
- **Reservas Prováveis** - aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas provadas;
- **Reservas Possíveis** - aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas prováveis;
- **Reservas Totais** - o somatório das reservas provadas, prováveis e possíveis.

Dados da BP (2013), mostram que, no mundo as reservas provadas de GN no final de 2012 foram de 187,3 trilhões de metros cúbicos (m³), o suficiente para atender 55,7 anos de demanda global. A Figura 1.2 mostra as Reservas provadas em algumas regiões mundiais. A Figura 1.3 mostra a razão da taxa de Reservas por produção (R/P) nestas regiões (Reservas por produção (R/P): as reservas remanescentes no final de cada ano são divididos pela produção naquele ano, o resultado é o período de tempo que essas reservas remanescentes durariam se a produção continuar a esta taxa).

RESERVAS PROVADAS NO MUNDO							
				Até o fim de 2012			
	Até o fim de 1992 (Trilhões de metros cúbicos)	Até o fim de 2002 (Trilhões de metros cúbicos)	Até o fim de 2011 (Trilhões de metros cúbicos)	Trilhões de pés cúbicos	Trilhões de metros cúbicos	Porcentagem do Total	Taxa R/P
Argentina	0.5	0.7	0.3	11.3	0.3	0.2%	8.5
Bolívia	0.1	0.8	0.3	11.2	0.3	0.2%	17.0
Brasil	0.1	0.2	0.5	16.0	0.5	0.2%	26.0
Colômbia	0.2	0.1	0.2	5.5	0.2	0.1%	12.9
Peru	0.3	0.2	0.4	12.7	0.4	0.2%	27.9
Trinidade e Tobago	0.2	0.6	0.4	13.3	0.4	0.2%	8.9
Venezuela	3.7	4.2	5.5	196.4	5.6	3%	*
Outros - America do Sul e Central	0.2	0.1	0.1	2.0	0.1	<	15.5
Total - America do Sul e Central	5.4	7.0	7.5	268.3	7.6	4.1%	42.8
Total America do Norte	9.3	7.4	11.2	382.7	10.8	5.8%	12.1
Total Europa e Eurasia	39.6	42.1	58.4	2062.5	58.4	31.2%	56.4
Total Oriente Médio	44.0	71.8	80.4	2842.9	90.5	43.0%	*
Total Africa	9.9	13.8	14.7	512.0	14.5	7.7%	67.1
Total Ásia-Pacífico	9.4	13.0	15.5	545.6	15.5	8.2%	31.5
Total - Mundo	117.6	154.9	187.8	6614.1	187.3	100%	55.7

Figura.1.2 – Reservas provadas de gás natural no mundo (* Mais de 100 anos. < Menos do que 0,05%)
(Fonte: adaptado de BP, 2013).

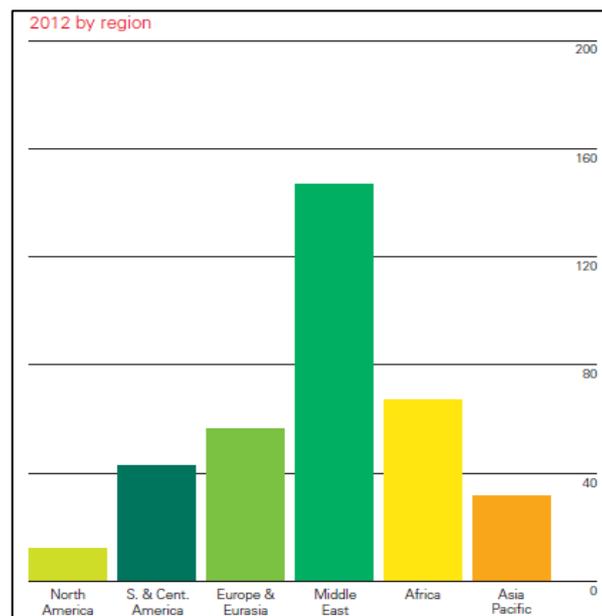


Figura 1.3 – Razão Reservas por produção (R/P) em seis regiões mundiais (North America - America do Norte; S&Cent. America - América do Sul e Central; Middle East - Oriente Médio; Africa -África; Asia Pacific - Pacífico-Ásia) (Fonte: adaptado de BP, 2013)

No Brasil, entre os períodos de 1964 a 2010, as reservas provadas de GN cresceram a uma taxa média de 7,3% ao ano (Figura 1.5). Numa perspectiva da evolução mais recente das reservas, tem-se que as principais descobertas 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), bem como na Bacia do Solimões (AM) (bacia sedimentar onde se encontram o Polo de Urucu e a jazida de Juruá), de acordo com ANP (2011).

No que diz respeito à sua origem, o GN pode ser classificado como gás associado e como gás não associado (Figura 1.4). O gás associado ocorre quando há a predominância do petróleo na exploração da jazida, sendo o gás separado durante o processo de produção, passando este a ser considerado um coproduto, enquanto que o gás não associado é obtido em extensas quantidades diretamente do reservatório, sendo pequena a parcela de produção de petróleo (VIEIRA *et al.*, 2005).

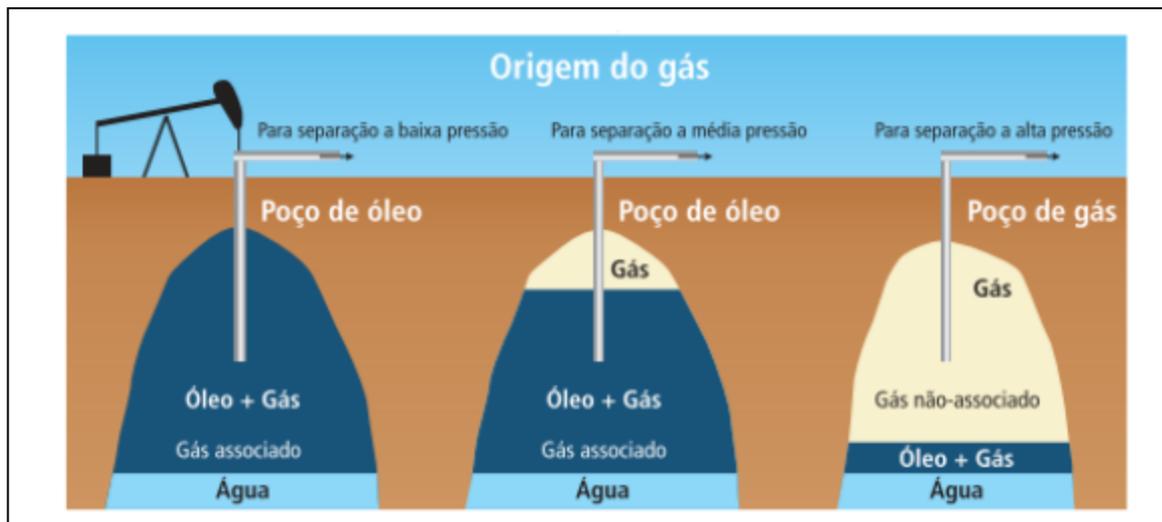


Figura 1.4 – Classificação do gás natural quanto a sua origem (Fonte: VIEIRA *et al.*, 2005)

A evolução das reservas de GN no país apresenta um comportamento muito próximo ao das reservas de petróleo, devido principalmente à ocorrência de GN sob a forma associada. No entanto, as descobertas de novas reservas de GN eminentemente sob a forma não-associada, tendem a modificar esta evolução. Assim, enquanto no ano de 2009 cerca de 80,3% do total da produção foi proveniente de gás associado e 19,7% de gás sob a forma não associada, no ano de 2010 estes percentuais foram de 75,4% e 24,6%, respectivamente (ANP, 2011).

Em 2010, as reservas provadas de GN ficaram em torno de 417,0 bilhões de metros cúbicos (m³), um expressivo crescimento da ordem de 16,4% em relação à 2009, que representa um acréscimo de 58,8 bilhões de metros cúbicos (m³) ao montante das reservas nacionais (Figuras 1.5 e 1.6) (ANP, 2011).

Anos	Reservas provadas de gás natural	
	Volume (bilhões m ³)	Variação anual (%)
1964	16,5	..
1965	19,0	15,1
1966	25,0	31,2
1967	24,5	-2,0
1968	26,8	9,5
1969	25,6	-4,6
1970	26,6	4,1
1971	26,2	-1,5
1972	26,1	-0,4
1973	25,9	-1,0
1974	26,3	1,5
1975	25,9	-1,2
1976	34,0	31,0
1977	39,5	16,1
1978	44,4	12,5
1979	45,1	1,6
1980	52,5	16,6
1981	60,3	14,7
1982	72,3	20,0
1983	81,6	12,8
1984	83,9	2,8
1985	92,7	10,5
1986	95,8	3,3
1987	105,3	9,9
1988	108,9	3,4
1989	116,0	6,5
1990	114,6	-1,2
1991	123,8	8,0
1992	136,7	10,4
1993	137,4	0,5
1994	146,5	6,6
1995	154,3	5,3
1996	157,7	2,2
1997	227,7	44,4
1998	225,9	-0,8
1999	231,2	2,4
2000	221,0	-4,4
2001	222,7	0,8
2002	236,6	6,2
2003	245,3	3,7
2004	326,1	32,9
2005	306,4	-6,0
2006	347,9	13,5
2007	365,0	4,9
2008	364,1	-0,2
2009	358,1	-1,6
2010	417,0	16,4

Figura 1.5 - Reservas provadas de gás natural – 1964-2010 (Fonte: ANP, 2011)

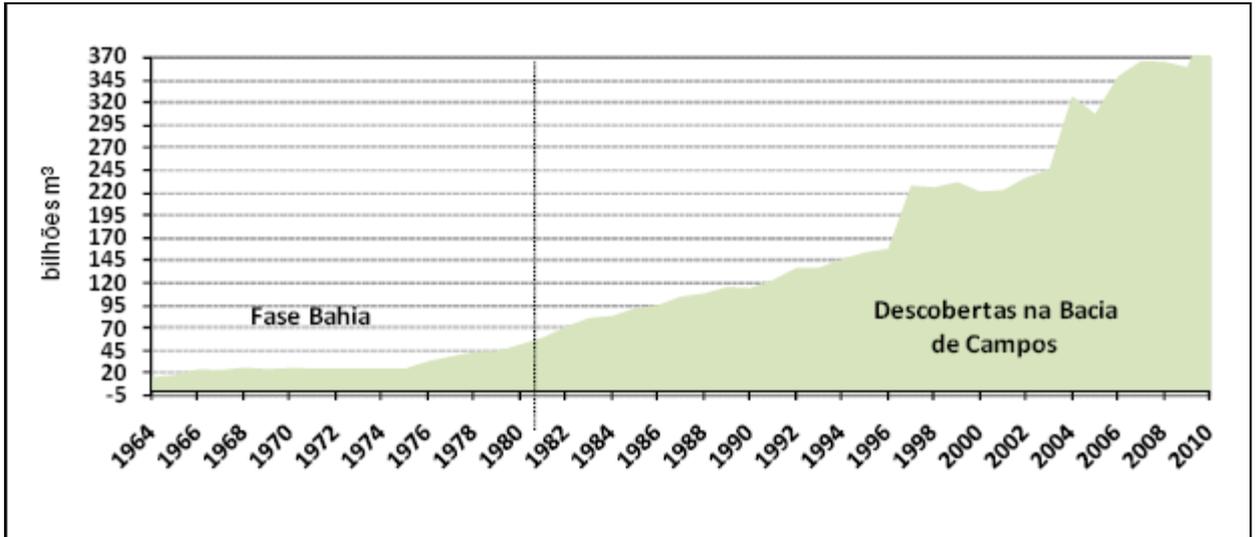


Figura 1.6 - Gráfico das Reservas provadas de gás natural – 1964-2010 (ANP, 2011)

As reservas nacionais, encontradas em sua maior parte na forma associada, com destaque absoluto para o Estado do Rio de Janeiro que detém 52,4% destas, seguido dos Estados do Amazonas, São Paulo e Espírito Santo, com respectivamente 13,4%, 11,8% e 10,6% (Figura 1.7).

De todo o gás natural que compõe as reservas do país, 16,5% estão localizados em terra – principalmente no campo de Urucu (AM) e em campos produtores no Estado da Bahia – enquanto que os 83,5% restantes estão localizados no mar (Figura 1.8). Acrescenta-se que o maior volume das reservas se encontra localizado na Bacia de Campos, com 140,8 bilhões de metros cúbicos (m³), que representa 33,8% de todas as reservas deste energético no Brasil (ANP, 2011).

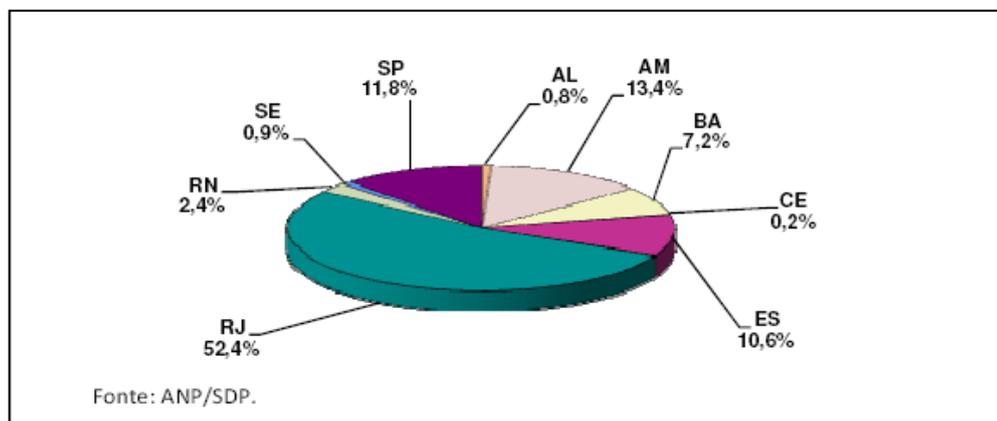


Figura 1.7 - Distribuição das reservas provadas de gás natural no Brasil por Estado (Fonte: ANP, 2011)

Unidades da Federação	Localização	Reservas de gás natural (milhões m ³)							
		2007		2008		2009		2010	
		Reservas totais	Reservas provadas	Reservas totais	Reservas provadas	Reservas totais	Reservas provadas	Reservas totais	Reservas provadas
Total		584.472	364.991	589.007	364.095	577.044	358.121	802.264	416.952
Subtotal	Terra	117.158	68.131	125.056	73.242	118.698	65.279	116.917	68.659
	Mar	467.315	296.860	463.950	290.853	458.346	292.842	685.347	348.293
Amazonas	Terra	90.518	52.774	90.453	52.143	93.909	52.397	94.456	55.878
Ceará	Terra	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mar	1.097	825	1.321	1.028	1.152	784	1.447	652
Rio Grande do Norte	Terra	2.439	1.942	11.699	8.663	2.254	1.555	2.036	1.385
	Mar	13.166	11.755	2.172	1.585	10.288	8.115	10.555	8.421
Alagoas	Terra	4.830	3.042	4.706	2.917	4.340	2.571	4.063	2.297
	Mar	1.061	850	944	730	1.084	825	1.085	1.085
Sergipe	Terra	923	761	1.306	989	1.330	913	1.452	1.027
	Mar	4.794	2.842	4.908	2.678	4.962	2.523	4.303	2.588
Bahia	Terra	16.238	8.470	14.850	7.447	15.149	7.202	13.379	7.356
	Mar	35.044	26.423	33.603	24.671	29.291	24.813	26.366	22.806
Espirito Santo	Terra	1.449	1.140	1.266	940	946	637	716	583
	Mar	68.179	37.594	71.851	38.004	87.874	46.714	85.431	43.776
Rio de Janeiro	Mar	272.839	167.917	290.028	173.142	267.164	161.967	496.918	218.460
São Paulo	Mar	67.088	47.881	55.984	48.340	53.265	46.189	55.304	49.373
Paraná	Terra	761	1	777	142	770	4	814	135
	Mar	1.610	568	538	468	904	684	1.261	904
Santa Catarina	Mar	2.437	206	2.600	205	2.364	230	2.677	230

Figura 1.8 - Reservas totais e provadas de gás natural, por localização (terra e mar). (Fonte: ANP, 2011)

Conforme ANP (2013), a produção de GN no Brasil no mês de março de 2013 foi de aproximadamente 77,3 milhões de metros cúbicos por dia (MMm³/d), o que representa um aumento de cerca de 16,6% na produção de GN se comparada ao mesmo mês em 2012 e um aumento de aproximadamente 0,9% da produção de GN se comparada ao mês anterior. Ainda no mesmo mês de março a produção de GN caracterizou um recorde na produção, superando a produção realizada em fevereiro de 2013, quando foi em média 76,5 milhões de metros cúbicos por dia (MMm³/d) (Figura 1.9 - GASA: gás associado; GASN: gás não associado).

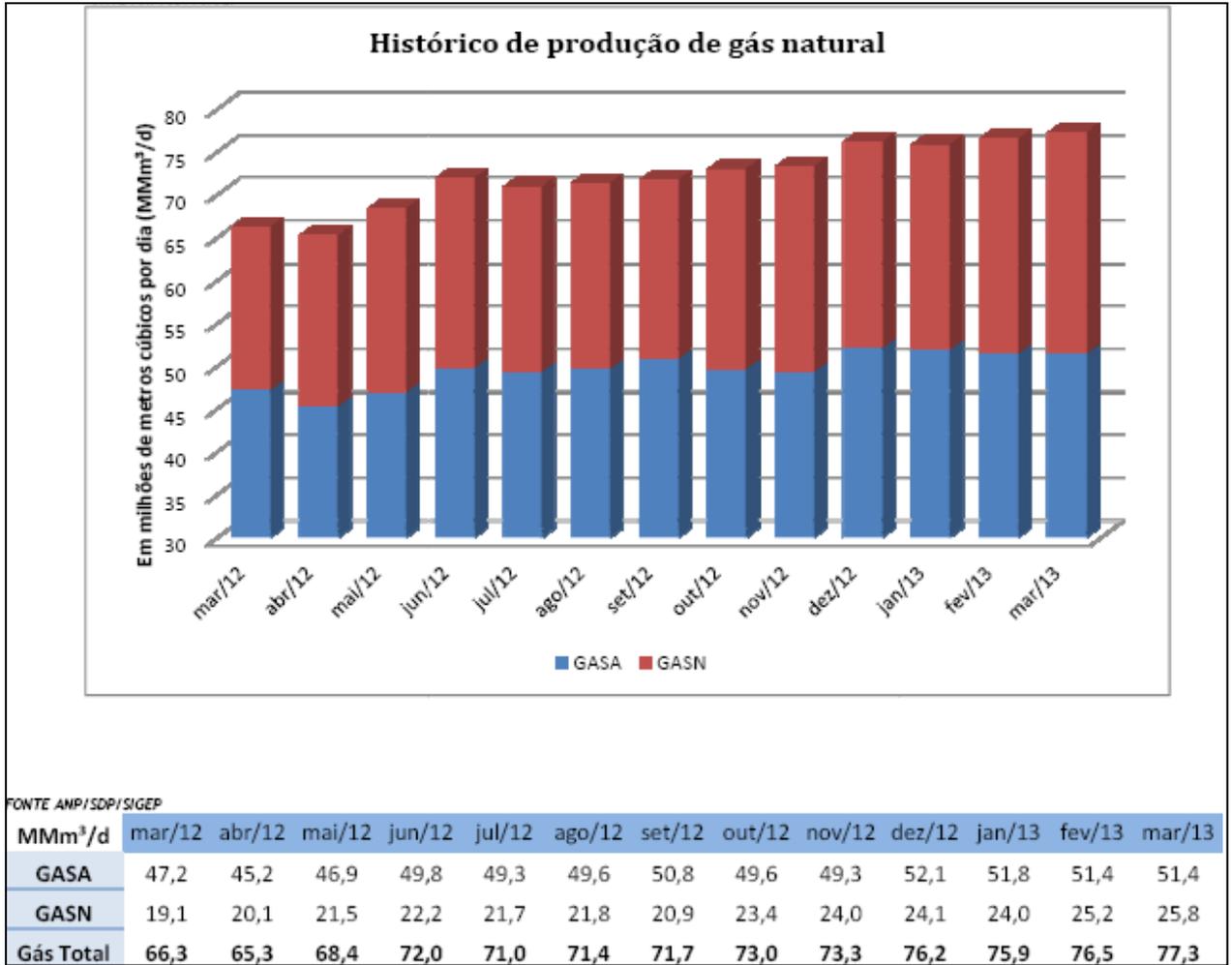


Figura 1.9 - Histórico da Produção de gás natural no Brasil: Março/2012 - Março/2013 (Fonte: ANP, 2013)

O Estado do Rio de Janeiro destaca-se como maior produtor de GN representando 35% da produção nacional, sendo a Bacia de Campos a maior produtora entre as demais bacias, seguido do Estado do Espírito Santo com 16,2% da produção do gás nacional (Figuras 1.10, 1.11 e 1.12).

Estado	Petróleo (bbl/d)	Gás Natural (Mm ³ /d)	Produção Total (boe/d)
Rio de Janeiro	1.333.459	27.004	1.503.317
Espírito Santo	297.957	12.535	376.800
Bahia	45.143	9.553	105.230
Amazonas	32.665	11.341	104.000
São Paulo	31.451	8.407	84.334
Rio Grande do Norte	60.832	1.557	70.624
Sergipe	38.135	2.791	55.688
Maranhão	0	2.331	14.660
Alagoas	3.870	1.649	14.242
Ceará	9.133	87	9.681
Total geral	1.852.647	77.254	2.338.576

Figura 1.10 - Produção de Petróleo e Gás Natural por Estado. (Fonte: ANP, 2013)

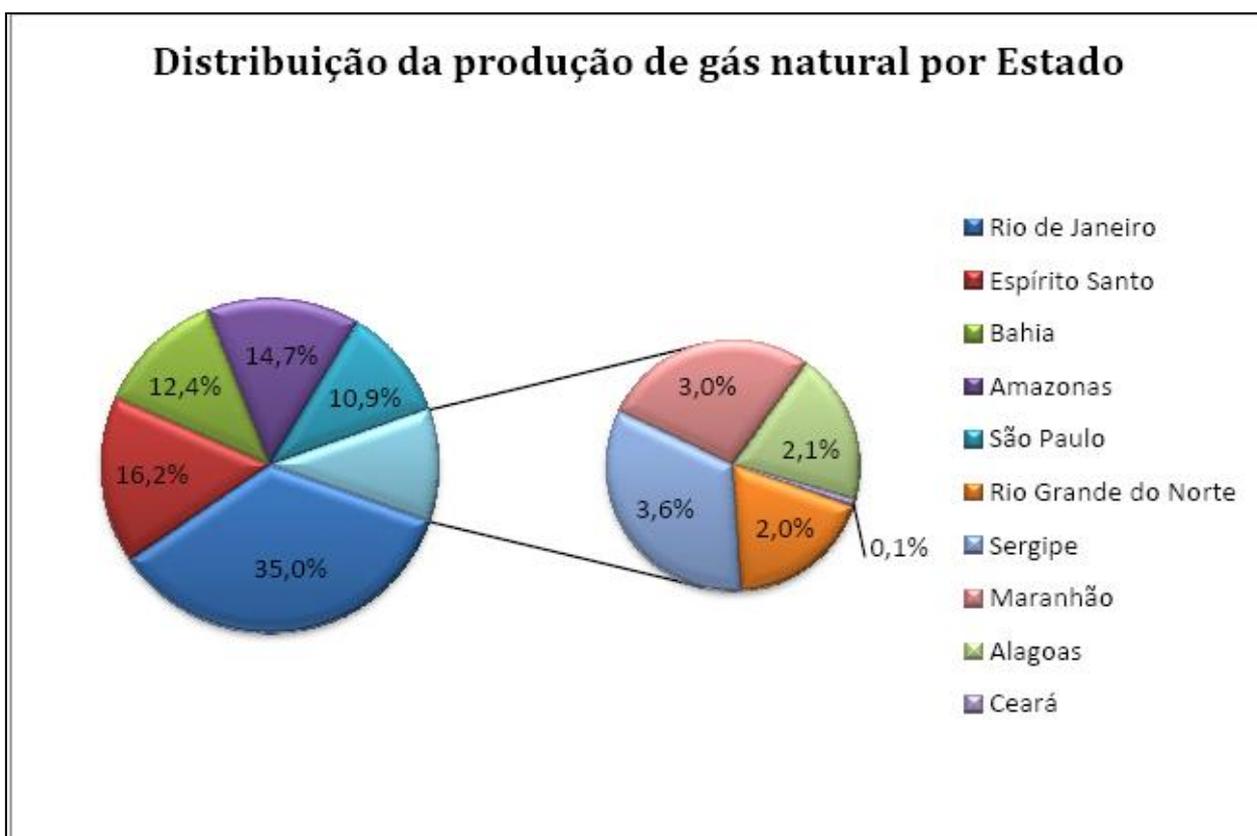


Figura 1.11 - Distribuição percentual da produção de Gás Natural (Mm³/d) por Estado. (Fonte: ANP, 2013)

Bacia	Petróleo (bbl/d)	Gás Natural (Mm ³ /d)	Produção Total (boe/d)
Campos	1.487.429	26.710	1.655.436
Santos	137.320	13.879	224.620
Solimões	32.665	11.341	104.000
Espírito Santo	38.119	7.357	84.396
Potiguar	61.952	1.558	71.750
Recôncavo	44.420	2.888	62.583
Sergipe	38.135	2.791	55.688
Camamu	711	6.601	42.229
Parnaíba	0	2.331	14.660
Alagoas	3.870	1.649	14.242
Ceará	8.013	86	8.555
Tucano Sul	12	65	419
Total geral	1.852.647	77.254	2.338.576

Figura 1.12 - Distribuição da produção de Petróleo e Gás Natural por Bacia. (Fonte: ANP, 2013)

O GN é um combustível fóssil, não renovável, encontrado em reservatórios subterrâneos tanto em terra quanto em mar. É definido como sendo a parcela do petróleo que se encontra na fase gasosa ou em solução nas condições de reservatório e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas (PARO, 2005). O GN se extrai do subsolo, onde está acumulado em formações rochosas porosas (reservatórios), isoladas do exterior por rochas impermeáveis. O GN é o resultado da degradação da matéria orgânica de forma anaeróbica oriunda de quantidades muito expressivas de micro-organismos que, em eras pré-históricas, se acumulavam nas águas litorâneas dos mares da época (CNI, 2010).

O GN é uma mistura de hidrocarbonetos leves, com participação predominante de metano (geralmente em proporção superior a 70% em volume), e com proporções variáveis de etano, propano, butano e outros hidrocarbonetos mais pesados, além de componentes inertes como nitrogênio e gás carbônico (CNI, 2010).

Os problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis são cada vez mais evidentes, principalmente os relacionados à combustão: o aquecimento global do clima, principal consequência das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, sendo o principal deles o dióxido de carbono (CO₂) - mais importante produto da combustão de compostos hidrocarbonetos, a exemplo do carvão e do petróleo; a ocorrência de chuva ácida, devido a emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (VIEIRA *et al.*, 2005).

Vista à necessidade de reduzir os problemas associados à queima dos combustíveis fósseis, principalmente o petróleo e o carvão que são as principais fontes de emissão de CO₂, fontes energéticas diversificadas surgem como alternativas para suprir as demandas necessárias à continuidade do desenvolvimento econômico e social.

O GN tem despontado como uma excelente alternativa energética, face à necessidade de reduzir os problemas associados à queima destes combustíveis fósseis, enquanto contribui para suprir a energia necessária ao desenvolvimento econômico. Como aponta Vieira *et al.* (2005), dentre os combustíveis fósseis, o GN é considerado o mais limpo e menos intensivo em carbono, daí a sua importância como combustível de transição, até que se desenvolvam alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental.

Segundo Vaz *et al.* (2008) (*apud* Rodrigues, 2010), a cadeia produtiva de GN é um conjunto de atividades de produção, transporte, comercialização, processamento, distribuição e utilização do gás natural que funcionam de forma integrada com um sequenciamento lógico de atividades, como em uma rede dividida em fases distintas. As fases são apresentadas a seguir:

- **Fase de exploração** – o processo exploratório está baseado em pesquisa sísmica e interpretação de resultados, em que os conceitos da geologia e da geofísica são amplamente utilizados. A exploração é a etapa inicial do processo e consiste no reconhecimento e estudo das estruturas propícias ao acúmulo de petróleo ou gás natural. Essa fase conduz a descobertas de reservatórios.
- **Fase de perfuração** – uma vez identificados os fatores que determinam a possibilidade de existência de hidrocarbonetos, é feita a perfuração de poços exploradores (primeiros poços em uma área produtora para confirmar a presença de acúmulo de hidrocarbonetos). Após a confirmação da existência e havendo viabilidade econômica, mais poços são perfurados para delimitar e desenvolver a formação produtora, permitindo a extração e o escoamento dos produtos.
- **Fase de desenvolvimento e produção** – depois de confirmada a existência de acumulação de hidrocarbonetos, inicia-se a fase de desenvolvimento e produção do campo produtor. Até esse ponto as indústrias de petróleo e gás natural caminham juntas. Nas áreas de produção, o gás é consumido internamente na geração de eletricidade e vapor, parte da produção é utilizada com gás *lift* (gás de elevação) para reduzir a densidade do petróleo e parte é reinjetada com objetivo de aumentar a

recuperação do reservatório. O restante do gás é exportado para centros de tratamento ou pode ser queimado em tochas, caso não haja infraestrutura suficiente que permita seu escoamento até um centro consumidor.

- **Fase de condicionamento** – o gás, para ser escoado para as Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGNs) ou diretamente consumido, precisa antes passar pelas etapas de condicionamento, visando garantir a sua adequação à especificação requerida para consumo no próprio campo produtor e/ou para a sua transferência aos centros processadores.
- **Fase de processamento** – o gás natural condicionado é transferido por gasodutos até as UPGNs, onde é beneficiado e separado em produtos especificados para atendimento a clientes finais. Durante o processamento ocorre a separação dos componentes mais pesados do gás natural, gerando produtos de mais valor agregado e garantindo a especificação técnica adequada para comercialização do gás disponibilizado para venda.
- **Fase de transporte** – das UPGNs, o gás especificado para venda ao consumidor final é transportado até os Pontos de Entrega (PEs), para a efetiva transferência de custódia às companhias distribuidoras estaduais ou, de modo eventual, diretamente a um grande consumidor.
- **Fase de armazenamento** – embora ainda não seja uma etapa muito utilizada no Brasil, o gás natural pode ser normalmente armazenado, em poços de petróleo já exauridos ou em cavernas adaptadas para esse fim, de forma a garantir o suprimento dos fornecedores, em caso de aumento sazonal de consumo ou falha de entrega dos produtores por paradas não programadas dos sistemas de produção.
- **Fase de distribuição** – é nessa fase que o gás é entregue ao consumidor final. Essa etapa é realizada pelas companhias distribuidoras estaduais, as quais detêm a concessora do Estado para a realização dessa tarefa.

Este trabalho está focado no transporte de GN por uma rede de gasodutos tendo por objetivo transportar GN das fontes produtoras até centros consumidores, sendo este de grande importância financeira, devido aos altos custos embutidos.

Para ser transportado em redes de gasodutos e distribuído em pontos de entrega, o GN passa por diversos dispositivos, como: gasodutos, reguladores, válvulas e compressores. Nos gasodutos o GN é transportado por diferença de pressão. Quando o gás flui através de uma

rede de gasodutos, ocorre uma perda de energia e pressão devido à fricção que existe entre o gás e as paredes internas do gasoduto e a transferência de calor que existe entre o gás e o meio ambiente (WU *et al.*, 2000; CHRISTO *et al.*, 2009). As companhias de petróleo objetivam minimizar os custos da movimentação de GN, de maneira que as demandas continuem sendo satisfeitas, além de atender os níveis de pressão e de fluxos exigidos nos nós de fonte e/ou de entrega. (RÍOS-MERCADO *et al.*, 2004).

Com o intuito de manter o fluxo contínuo do gás natural durante o transporte, existem estações de compressão (EsC), constituída por um conjunto de compressores que restauram a pressão do gás, comprimido o GN a altas pressões (IAMASHITA *et al.*, 2008). As EsC consomem cerca de 3-5% do GN transportado, o que torna-se significativo, devido ao enorme volume de gás transportado (WU *et al.*, 2000).

O custo de operação do sistema é altamente dependente do custo operacional das EsC da rede, que por sua vez, têm seus custos governados pelo número de compressores em operação durante o transporte (fundamentalmente pela quantidade de combustível gasto na compressão) (CHRISTO *et al.*, 2009). Estima-se que o custo operacional das EsC esteja entre 25% e 50% do custo operacional (LUONGO *et al.*, 1989).

Assim, a determinação da configuração dos compressores nas EsC torna-se significativo para a minimização do custo operacional do transporte do GN no gasoduto. Sabendo-se desta importância, vários pesquisadores realizam experimentos utilizando diferentes modelos de configurações de estações de compressão e distintas modelagens computacionais determinando configurações dos compressores nas estações que minimizassem o custo do transporte do combustível considerando o sistema em estado estacionário (WU *et al.*, 2000; RÍOS-MERCADO *et al.*, 2000-2002; IAMASHITA, 2002; IAMASHITA *et al.*, 2008; CHRISTO, 2008; JUBINI, 2008; RODRIGUES, 2010; PAULA *et al.* 2011; PACHECO, 2012).

Inicialmente Wu *et al.* (2000), consideram EsC formadas por compressores idênticos denominado *clássicas* (EsCC), onde o gás a ser comprimido é dividido em partes iguais entre os compressores ativados. Assim a solução para minimizar o custo de transporte do combustível limita-se, a saber, quantos seriam os compressores operantes na estação, levando a um modelo de otimização contínua. Verifica-se, que, a função custo para tal modelo é implicitamente definido, e as restrições envolvem funções não-explícitas, não-convexas e

não-diferenciáveis. Além disto, sabe-se que o problema é *NP-Completo* (o que significa, a grosso modo, que o número de operações para resolvê-lo aumenta exponencialmente com o tamanho do problema; c.f., Raman, R.; Grossmann, 1991). Para resolver tais questões Wu *et al.* (2000) fez aproximação convexa no conjunto de restrições e aproximação suavizada na função custo, aplicando resultados de programação matemática. De tais hipóteses, formulou-se um problema de otimização contínua que consiste em determinar quantos compressores devem operar em cada estação de compressão.

Iamashita (2006) e Iamashita *et al.* (2008), de certa forma, generalizam o trabalho de Wu *et al.* (2000), pois ao tratar um problema de transporte de *GN off-shore*, devem relaxar a hipótese de compressores idênticos nas EsC, mas assumindo compressão só nos nós não intermediários (nós de injeção iniciais), o que caracteriza a funcionalidade de compressores operando ou não na estação de compressão. Isto resulta em um modelo misto-inteiro quadrático não diferenciável. Estes autores utilizaram técnicas metaheurísticas: evolutiva - Algoritmos Genéticos; e construtiva - GRASP, obtendo resultados promissores.

Azeredo (2008) e Rodrigues (2010) generalizam estes trabalhos, considerando estações de compressão nos nós intermediários e unidades com compressores não necessariamente idênticos nas Estações de compressão denominando esta de *generalizadas* (EsCG). Nestes trabalhos existe a possibilidade de dividir o fluxo do combustível em partes distintas para os compressores. Azeredo (2008) considera aproximações para a função de custo e para o domínio de viabilidade das estações de compressão baseadas em Wu *et al.* (2000), adaptando-os, de acordo com a necessidade, para se aplicar ao caso do modelo de Jubini (2008).

Christo (2008) apresenta um algoritmo para lidar com o modelo de Azeredo (2008) usando técnicas GRASP, inspirado nos resultados apresentados por Iamashita (2006). Rodrigues (2010) introduz uma modificação no algoritmo apresentado em Christo (2008), explorando o fato de que a função custo do combustível diminui com relação à pressão de sucção, obtendo resultados satisfatórios utilizando o método GRASP.

Borraz-Sánchez e Ríos-Mercado (2009) apresentaram a metaheurística de Busca Tabu para o modelo de Wu *et al.* (2000) e Ríos-Mercado *et al.* (2002), onde foi proposto uma nova metodologia para otimizar as operações das estações de compressão em um sistema de

gasodutos, obtendo resultados significativos para minimização do custo do transporte do combustível. Trabalharam entretanto com EsCC.

Paula *et al.* (2011) verificaram que quando se trata de configurar uma estação com compressores idênticos, onde existe a possibilidade de dividir a vazão a ser comprimida de diferentes formas entre os compressores da estação, a divisão ótima correspondia à divisão em partes iguais entre os compressores (desde que a parcela fosse viável para um compressor) baseando-se nesses resultados, a partir das experiências numéricas.

Para subredes de um gasoduto que não possuem EsC, Paula *et al.* (2011) apresentam um algoritmo para distribuir as pressões nos vértices (nós) e a vazão mássica nos dutos de forma a atender as demandas operacionais de gás estabelecidas, por outro lado, apresentam técnicas GRASP para calcular o custo que minimiza a compressão do gás nas estações de compressão generalizada.

Pacheco (2012) prova através das condições de Karush Kuhn Tucker (KKT) que a vazão mássica é ótima quando esta se divide igualmente entre os compressores ativados na estação de compressão *clássica* (composta somente por compressores idênticos) e, portanto, minimiza-se o custo para o transporte do gás.

Paula (2012) desenvolve algoritmos que permitem calcular o custo mínimo de compressão para estações compostas por compressores não necessariamente idênticos, identificando o intervalo viável de pressão para compressão, bem como o cálculo do custo mínimo em tal estação.

1.2 Objetivos do trabalho

Baseando-se na importância destes trabalhos, e com o intuito de comparar propostas, este trabalho tem por objetivo minimizar o custo do transporte do combustível no sistema de gasodutos, implementando duas metaheurísticas distintas para a resolução do modelo matemático do problema: GRASP e Busca Tabu. Os resultados destas implementações serão comparadas entre si. Para isto, será trabalhado com modelo de EsCG, diferenciando-se do modelo de EsCC, trabalhados por Wu *et al.* (2000) e Ríos-Mercado *et al.* (2002).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado o modelo de EsCC (apresentados em Wu *et al.*(2000)), bem como o modelo matemático de redes de gasoduto que trabalham com estas estações de compressão. Posteriormente será apresentado o modelo de EsCG (apresentados em Azeredo (2008), Jubini (2008) ,Christo (2008) , Rodrigues (2010)) e o modelo matemático de redes de gasoduto que trabalham com estas estações. No Capítulo 3 são apresentados os domínios e as funções custo para os modelos de EsCC e EsCG. No Capítulo 4 discute-se sobre a metodologia para a elaboração das heurísticas GRASP e Busca Tabu para a minimização do transporte do combustível, bem como seus respectivos pseudocódigos. No Capítulo 5 são apresentados os experimentos numéricos das aplicações das metaheurísticas em casos da literatura (apresentados em Wu *et al.* (2000) e Borraz-Sánchez (2009)) bem como os resultados destas aplicações. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO

Este trabalho está baseado nos modelos de estação trabalhados por Azeredo (2008), Christo (2008), Jubini (2008) e Rodrigues (2010) que consideram estações de compressão constituídas por compressores não necessariamente idênticos, cujo modelo é denominado *generalizado*. Inicialmente será apresentado o modelo de estação trabalhado por Wu *et al.* (2000) denominado de modelo *clássico* (composto somente por compressores idênticos) bem como a descrição do modelo matemático respectivo. Posteriormente se apresenta o modelo de estação de compressão *generalizada* (composta por compressores não necessariamente idênticos) e a apresentação do modelo matemático pertinente. Tais modelos visam minimizar o custo total do transporte do combustível devido às estações de compressão.

2.1 Modelo Clássico de Estação de Compressão

Uma rede de gasoduto pode ser associada a um grafo $G = (V; E)$, onde V é o conjunto finito de *vértices* ou *nós* e $E \subset V \times V$ o conjunto de *arcos* de pares não ordenados de nós denominado *arestas*. Este é representado na rede como os dutos e estações de compressão, e os *nós* ou *vértices* são responsáveis pela ligação entre estes. Um *grafo direcionado* ou *digrafo* é definido similarmente, exceto que cada aresta é chamada de *arco* e é um par ordenado que indica a direção de um nó para outro (WU *et al.*, 2000).

No modelo clássico, a estação de compressão é constituída por compressores idênticos. Em tal modelo, Rios-Mercado *et al.* (2002) descrevem as restrições do modelo matemático como:

- (i) equilíbrio de fluxos em cada nó;
- (ii) relação de fluxos e pressões de gás em cada duto;
- (iii) limites de pressão em cada nó; e,
- (iv) limites de operação para cada estação de compressão.

As equações de restrição (i), equilíbrio de fluxos, são lineares, já as equações de restrição (ii), relação de fluxos pressões, são não-lineares. Rios-Mercado *et al.* (2002), denomina as restrições (i) e (ii) de equações de estado de vazões e pressões da rede.

Na rede de gasoduto para cada nó é estabelecido uma escalar s_i , chamado vazão mássica líquida do nó. Se $s_i > 0$, o nó é uma fonte; se $s_i < 0$, o nó é de demanda; e se $s_i = 0$, o nó é denominado transbordo. Neste caso, a soma dos s_i é zero; ou seja, para o caso de n nós se satisfaz a condição de soma zero:

$$\sum_{j=1}^n s_j = 0 \quad (2.1)$$

Conforme se define para a equação de balanço de vazões mássica, em cada nó j determina-se que a vazão que entra num nó é igual a que sai. Se u_{ij} é a vazão mássica de gás no arco (i,j) , do duto que vai do nó i ao nó j , a equação de balanço das vazões mássicas será dado conforme abaixo, representado na Figura 2.1:

$$\sum_{k:(i,k)=\text{arco}} u_{ik} - \sum_{j:(j,i)=\text{arco}} u_{ji} = s_i \quad (2.2)$$

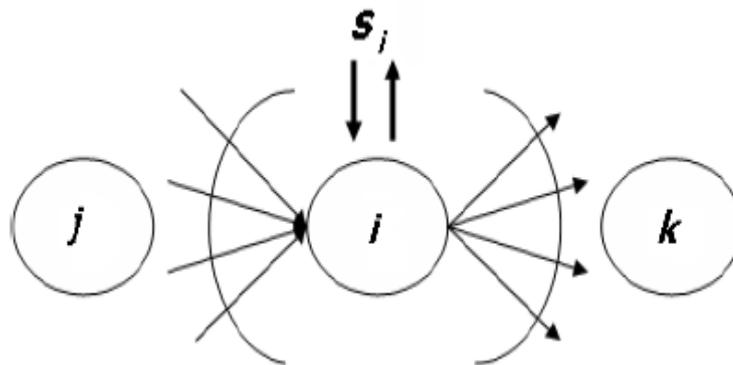


Figura 2.1: Equilíbrio de fluxo para um nó i (Fonte: JUBINI, 2008)

O balanço das vazões mássicas e pressões de gás através dos dutos, conforme a restrição (ii), baseando-se no fato, que, o fluxo gás no duto pode mudar de sentido dependendo das pressões nos extremos deste, sendo esta não linear e não diferenciável, esta representa-se por:

$$p_1^2 - p_2^2 = cu|u|^\alpha \quad (2.3)$$

Sendo:

- p_1 e p_2 : as pressões dos nós nas extremidades do duto;
- u : a vazão mássica através do duto;
- α : uma constante (que se assume igual a 1);
- c : a resistência da tubulação sendo uma quantidade positiva dependendo dos atributos físicos da tubulação (WU *et al.*, 2000), dada por:

$$c = K \frac{FL}{d^5} \quad (2.4)$$

Sendo $K = (1,3305 \times 10^5) Z S_g T$, onde:

- Z - fator de compressibilidade;
- S_g - gravidade específica do gás;
- T - temperatura (°R), assumida constante;
- F - fator de fricção;
- L - comprimento do gasoduto (milhas), e
- d - diâmetro do duto (pés)

Considera-se uma rede com n nós, l tubulações, e m estações de compressão. Para cada duto considera-se um sentido que, pode ou não, coincidir com o sentido do fluxo de gás através da tubulação. Sendo o sentido do fluxo do gás coincidente com a direção do duto, este será positivo; caso contrário negativo. Define-se A_l uma **matriz de incidência nó-duto** ($n \times l$) cujos elementos são dados por:

$$a_{ij}^l = \begin{cases} 1, & \text{se o duto } j \text{ sai do nó } i \\ -1, & \text{se o duto } j \text{ entra no nó } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Análogo a esta, tem-se a matriz A_m de **incidência nó-estação** ($n \times m$), cujos elementos são dados por:

$$a_{ik}^m = \begin{cases} 1, & \text{se o nó } i \text{ é um nó de sucção da estação } k \\ -1, & \text{se o nó } i \text{ é um nó de descarga da estação } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Uma nova matriz A é formada anexando-se a matriz A_l ao lado direito da matriz A_m , i.e., $A = [A_l \ A_m]$, resultando na matriz $n \times (m + l)$. Na Figura 2.2, tem-se uma rede que possui $n = 10$ nós, $l = 6$ dutos e $m = 3$ estações, ilustrando tais conceitos, como mostrado abaixo:

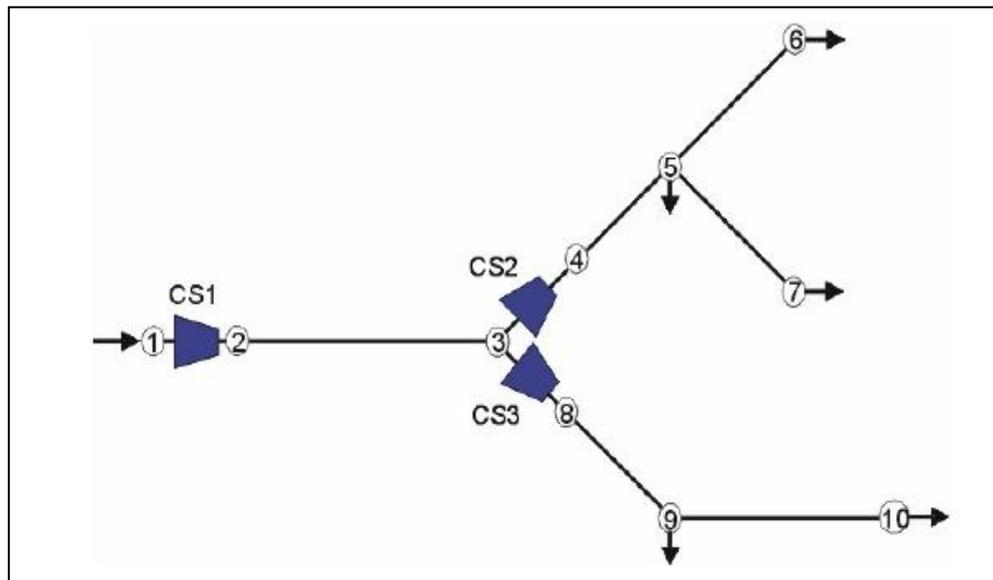


Figura 2.2: Exemplo de uma rede simples (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

As matrizes A_l e A_m para esta rede são dadas por:

$$A_l = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad A_m = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

As equações de equilíbrio de fluxo total nos nós são escritas matricialmente como segue:

$$A_l u + A_m v = [A_l A_m] \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = A w = s \quad (2.5)$$

Sendo $w^T = (u^T, v^T)$, as vazões mássicas através dos dutos e das estações de compressão, são descritos como $u^T = (u_1, \dots, u_l)$ e $v^T = (v_1, \dots, v_m)$ respectivamente. O vetor $s^T = (s_1, \dots, s_n)$ é o vetor de vazões mássicas líquidas. Caso o fluxo u_j ou v_k coincida com a direção do fluxo do duto ou da estação estes são positivos, caso contrário negativos.

A equação (2.3) pode ser generalizada, representando todos os dutos de determinada rede, sendo escrita de forma matricial como segue:

$$A_l^T p^2 = \Phi(u) \quad (2.6)$$

Sendo $(p^2)^T = (p_1^2, \dots, p_n^2)$, para a pressão p_i no i -ésimo nó e $\Phi(u)^T = (\Phi_1(u_1) \dots \Phi_n(u_n))$, com $\Phi_j(u_j) = c_j u_j |u_j|$. A partir disto, as equações de vazão e pressão da rede podem ser representadas pelo sistema:

$$\begin{cases} A w = A_l u + A_m v = s \\ (A_l^T)_j (p^2)_j = \Phi((u)_j), \quad j = 1, \dots, \xi \quad (\xi : \text{número de subredes}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Nota-se que, se fixar v viável para as EsC, uma solução (u, p) para o sistema (2.7) determina a distribuição de massas e pressões nos dutos da rede, desde que o vetor p esteja nos limites especificados $p_i \in [p_i^L, p_i^U], \forall i$. Precisa-se fixar a pressão num nó para determinar essa solução. Esse nó se denomina nó de referência e seu valor se denota por p_{REF} (RIOS-MERCADO *et al.*, 2002).

Observação 1. Para determinar um vetor v viável para as EsC, como mencionado no parágrafo anterior, trabalha-se com a *rede reduzida*, a qual se obtém removendo as EsC da rede; substituindo, em continuação, cada uma das subredes assim obtidas (ver as subredes encerradas por figuras pontilhadas na Fig. 2.3) por um nó e as EsC previamente removidas por arcos unindo esses novos nós, gerando-se, assim, a rede reduzida, unicamente definida (RIOS-MERCADO *et al.*, 2002). Um vetor $v \in \mathfrak{R}^m$ deve satisfazer:

$$A_l^{RED} v = S^{RED} \quad (2.8)$$

Onde A_l^{RED} é a matriz de incidência da rede reduzida. Na Fig. 2.4 tem-se a rede reduzida da Fig. 2.3 (Mais detalhes quanto à determinação de distribuição de vazões e pressões serão vistos no Capítulo 4).

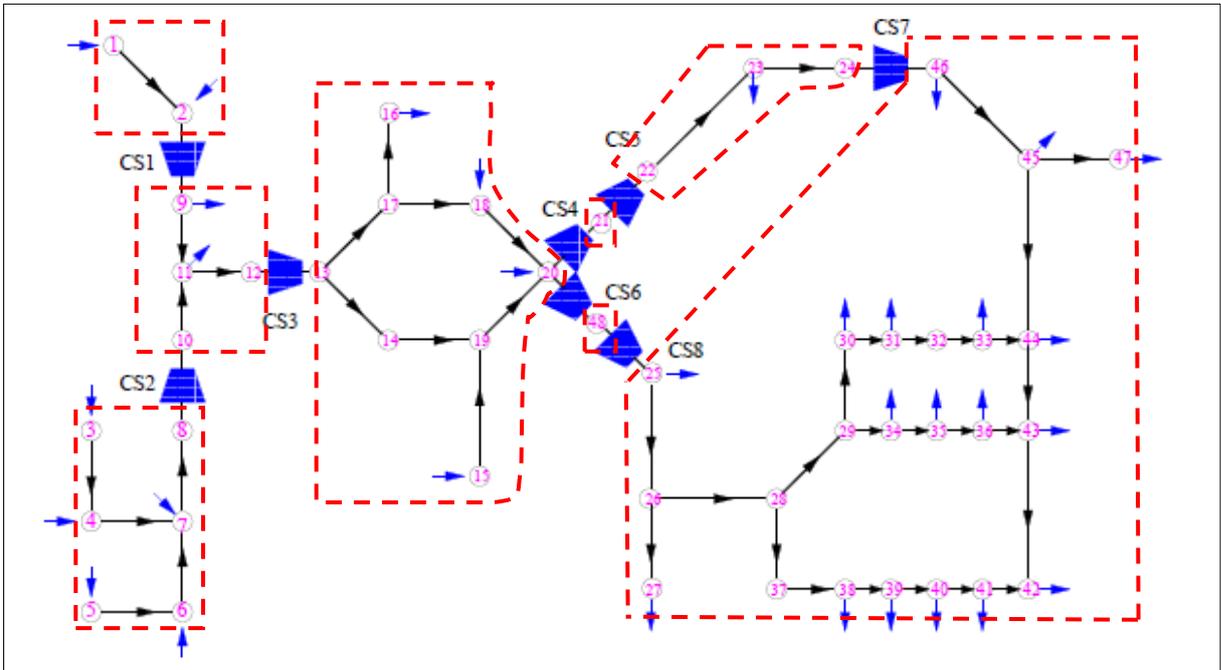


Figura 2.3 - Exemplo de gasoduto (adaptado de Wu *et al.*, (2000))

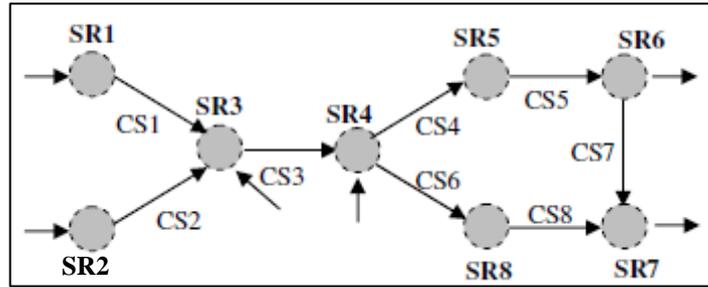


Figura 2.4.- Rede reduzida da Figura 2.3 (Fonte: Azeredo, 2008)

Conhecendo-se os limites de pressão p^L e p^U para cada nó da rede, e sendo satisfeita a condição do vetor de vazão líquida s com soma igual a zero, o problema tem por objetivo determinar o vetor de pressão p , o vetor de vazão w de modo que o consumo total do gás natural na rede seja minimizado. Logo, o modelo pode ser estruturado como segue:

$$\text{Minimizar } F(w, p) = \sum_{k=1}^m g_k(v_k, p_{ks}, p_{kd}) \quad (2.9)$$

$$\text{Sujeito a } Aw = s \quad (2.10)$$

$$(A_i^T)_j (p^2)_j = \phi((u)_j), \quad j = 1, \dots, \xi \quad (2.11)$$

$$p \in [p^L, p^U] \quad (2.12)$$

$$(v_k, p_{ks}, p_{kd}) \in D_k, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.13)$$

Sendo $w^T = ((u)_1^T, \dots, (u)_\xi^T, v_1, \dots, v_m)$, u_j são vazões mássicas na subrede j , ξ número de subredes da rede; v_k , p_{ks} e p_{kd} : a vazão mássica, a pressão de sucção e a pressão da descarga na estação k , respectivamente. A função g_k corresponde à função custo, e D_k é o domínio viável da estação k .

De acordo com Wu *et al.*, (2000), (também ressaltados em Christo (2008) e Azeredo (2008)), os seguintes pontos devem ser levados em consideração:

- I. domínio viável D_k é não convexo e não é dado de forma explícita
- II. As funções de consumo do combustível g_k são não lineares, não convexas e descontínuas
- III. A equação (2.11) é não diferenciável e define um conjunto de restrições não convexas
- IV. Trata-se de um problema de grande porte.

Sendo tal problema de difícil resolução, Wu *et al.* (2000) desenvolvem aproximações polinomiais para a função custo e aproximação convexa para o domínio (poliedral) e supõem compressores idênticos nas estações. Jubini (2008) generaliza este modelo supondo compressores não necessariamente idênticos na estação de compressão utilizando técnicas GRASP para o problema. Este trabalho será baseado nesse modelo generalizado (apresentado também em Azeredo (2008), Christo (2008) e Rodrigues (2010)) sendo aplicadas metaheurísticas GRASP e Busca Tabu para a resolução do problema.

2.2 Modelo Generalizado de Estação de Compressão

Neste tópico, apresenta-se o modelo no estado estacionário proposto por Jubini (2008), o qual generaliza o modelo proposto por Wu *et al.* (2000) e Rios-Mercado *et al.* (2004). O modelo torna-se mais complexo à medida que, modificações são inseridas em sua estrutura (chamadas de generalizações).

Uma rede de gasoduto pode ser associada a um grafo dirigido, conforme Rios-Mercado *et al.* (2004). Tal grafo dirigido, pode ser descrito por $G = (N, L, M)$, com N sendo um conjunto de n nós, L um conjunto de l dutos e M um conjunto de m estações de compressão. O conjunto de arcos associado a G é o conjunto $A = L \cup M$, com $L \cap M = \emptyset$.

Na rede de gasoduto, tem-se as seguintes variáveis de decisão para o problema, W_{ab} , a vazão mássica em cada arco $(a, b) \in A$, p_a a pressão do gás em cada nó $a \in N$. Além disto, considera-se que para cada nó $a \in N$, existe um parâmetro conhecido s_a , chamado de vazão mássica líquida do nó, que indica se o nó é fonte, sendo $s_a \geq 0$; se é nó de entrega, caso $s_a \leq 0$; ou nó de transbordo se $s_a = 0$.

Além disto, para cada $a \in N$ existe um limite de pressão inferior p_a^L , e superior p_a^U . A resistência do duto é denotada por c_{ab} e está determinada pelas propriedades físicas deste, sendo devidamente conhecido.

Sendo a estação $(a, b) \in M$, e o número de compressores da estação de compressão dado por K_{ab} , tem-se que, as variáveis associadas a cada compressor $k = 1, 2, \dots, K_{ab}$ da estação são:

- w_{abk} : vazão mássica no compressor k da estação $(a, b) \in M$;
- p_{ks} : a pressão de sucção no compressor k ;
- p_{kd} : pressão de descarga no compressor k ;
- x_{abk} : variável binária (0,1) de decisão de operacionalidade do compressor k , sendo;

$$x_{abk} = \begin{cases} 0 & \text{indica que o compressor } k \text{ está desligado} \\ 1 & \text{indica que o compressor } k \text{ está ligado} \end{cases}$$
- $g_{abk} = (w_{abk}, p_{ks}, p_{kd})$, função custo de operação do compressor k da estação $(a, b) \in M$

As variáveis relacionadas a cada estação de compressão $(a, b) \in M$ são:

- W_{ab} : vazão mássica na estação de compressão (a, b) ;
- p_{ab}^S : pressão de sucção na estação de compressão (a, b) ;
- p_{ab}^D : pressão de descarga na estação de compressão (a, b) ;

Observa-se que, as pressões de sucção e de descarga do compressor são iguais as da estação. A vazão mássica da estação (a, b) é igual à soma das vazões mássicas dos compressores em operação na estação, ou seja:

$$W_{ab} = \sum_{k=1}^{K_{ab}} w_{abk} x_{abk} \quad (2.14)$$

O objetivo do problema é minimizar o consumo global do GN das estações de compressão na rede de gasoduto, de modo a satisfazer, as exigências especificadas ao longo do sistema de transmissão, sendo que, em cada estação de compressão só pode ser comprimida a vazão mássica que for possível, obedecendo aos limites de pressão e

objetivando o menor custo. É considerado para o problema, que a rede está em estado estacionário.

Para uma estação de compressão $(a, b) \in M$, com K_{ab} compressores, tem seu custo operacional medido pela soma dos custos de cada unidade de compressor, ou seja:

$$g_{ab}(W_{ab}, p_{ab}^S, p_{ab}^D) = \sum_{k=1}^{K_{ab}} g_{abk}(w_{abk}, p_{ab}^S, p_{ab}^D) \quad (2.15)$$

O custo operacional da rede de gasoduto é medido pela soma dos custos de cada estação de compressão $(a, b) \in M$, assim:

$$\sum_{(a,b) \in M} g_{ab}(W_{ab}, p_{ab}^S, p_{ab}^D) \quad (2.16)$$

A figura mostra uma estação de compressão $(a, b) \in M$ composta por K_{ab} unidades compressoras:

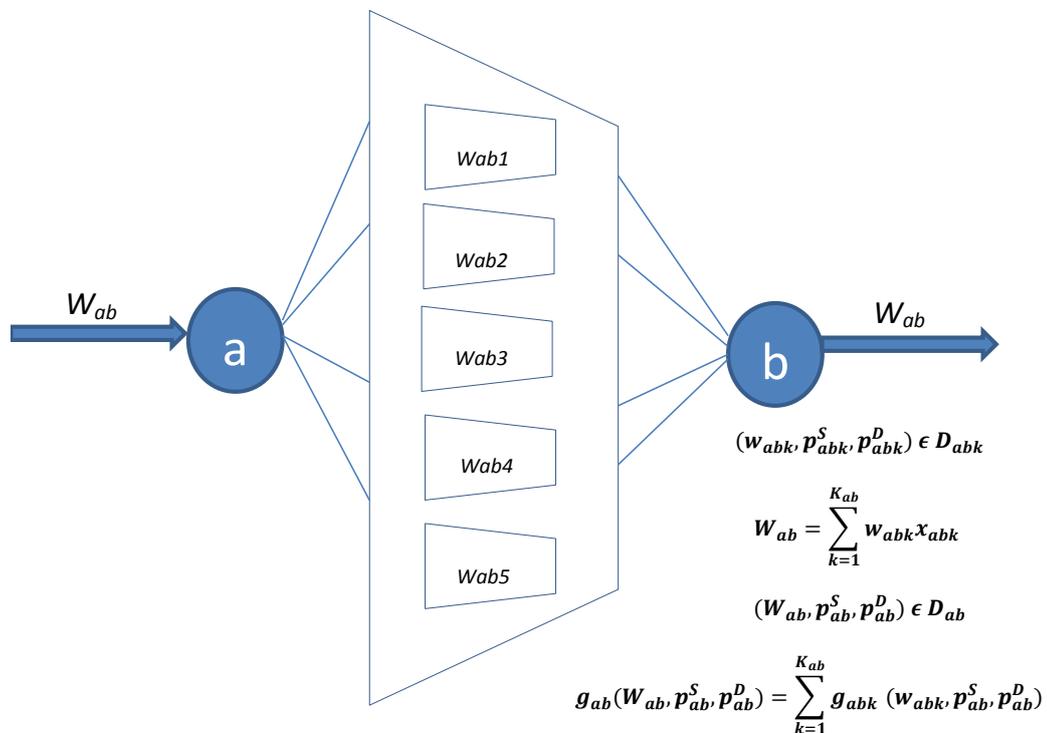


Figura 2.5 - Estação de compressão com compressores (Fonte: adaptado de Azeredo, 2008)

O modelo matemático para minimizar o transporte do combustível na rede é dado por (JUBINI, 2008):

$$\text{Minimizar } \sum_{(a,b) \in M} g_{ab}(W_{ab}, p_{ab}^S, p_{ab}^D) \quad (2.17)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{b(a,b) \in A} W_{ab} - \sum_{b(b,a) \in A} W_{ab} = S_{ab}, a \in N \quad (2.18)$$

$$W_{ab} = \sum_{k=1}^{K_{ab}} w_{abk} x_{abk}, (a, b) \in M \quad (2.19)$$

$$p_a^2 - p_b^2 = c_{ab} W_{ab} |W_{ab}|, (a, b) \in L \quad (2.20)$$

$$p_a \in [p_a^L, p_b^L] a \in N \quad (2.21)$$

$$(W_{ab}, p_{ab}^S, p_{ab}^D) \in D_{ab} \subset \mathfrak{R}^3, (a, b) \in M \quad (2.22)$$

Onde D_{ab} é o domínio viável operacional da estação de compressão $(a, b) \in M$, definida em função dos domínios D_{abk} que corresponde ao domínio do compressor k da respectiva estação, para $k = 1, \dots, K_{ab}$ (JUBINI, 2008). Esta formulação matemática foi elaborada para ser aplicada em uma rede de transmissão com presença de ciclos na rede ou topologia cíclica, podendo também, ser aplicada a uma rede acíclica.

Na restrição (2.19), tem-se que, a vazão mássica na estação de compressão $(a, b) \in M$ é igual à vazão do gás comprimido pelos k compressores operantes da estação, onde $k = 1, \dots, K_{ab}$. A restrição (2.20) representa o balanço de pressões em cada duto $(a, b) \in L$. Na relação (2.21) são dados os limites de pressão em cada nó $(a, b) \in N$, e a restrição (2.22) representa o conjunto do domínio viável de operacionalidade de cada estação de compressão $(a, b) \in M$.

No próximo Capítulo serão apresentados os domínios e as funções custo para as estações de compressão *clássica* e *generalizada*.

CAPÍTULO 3

DOMÍNIO VIÁVEL DE UMA ESTAÇÃO DE COMPRESSÃO E FUNÇÃO CUSTO DE COMPRESSÃO

Neste capítulo, apresenta-se o domínio viável e a função custo das Estações de compressão *clássico* (EsCC) e *generalizado* (EsCG). No primeiro caso (*clássico*), Wu *et al.* (2000) consideram que as estações possuem compressores idênticos dispostos em paralelo. No segundo caso, Azeredo (2008) generaliza a condição de estações de compressão apresentado por Wu *et al.* (2000), considerando estações com compressores não necessariamente idênticos, denominando-os de *generalizado*.

3.1 Domínio viável do modelo clássico

3.1.1 Domínio viável para um único compressor

A estação de compressão clássica é constituída por compressores idênticos. Estes compressores, são equipamentos que servem para comprimir gás à pressão desejada e tem o intuito de aumentar e manter o fluxo contínuo do combustível nas redes de gasoduto.

As variáveis associadas a uma unidade do compressor centrífugo são H : carga adiabática do compressor ($lbf \times ft / lbm$), Q : vazão volumétrica de entrada no compressor (ft^3/min), S : velocidade de rotação do compressor (rpm - revoluções por minuto) e η : eficiência adiabática, (onde ft = pés, min = minutos, lbf = libra força , lbm = libra massa) e estão relacionados pelo sistema (WU *et al.*, 2000):

$$\frac{H}{S^2} = A_H + B_H \left(\frac{Q}{S}\right) + C_H \left(\frac{Q}{S}\right)^2 + D_H \left(\frac{Q}{S}\right)^3 \quad (3.1)$$

$$\eta = A_E + B_E \left(\frac{Q}{S}\right) + C_E \left(\frac{Q}{S}\right)^2 + D_E \left(\frac{Q}{S}\right)^3 \quad (3.2)$$

Sendo $A_H, B_H, C_H, D_H, A_E, B_E, C_E, D_E$ as constantes que dependem do compressor, (estimadas por mínimos quadrados). A velocidade de rotação S do compressor varia dentro de um intervalo:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \quad (3.3)$$

A razão Q/S varia entre um limite inferior *surge*, e um limite superior, *stonewall*:

$$surge \leq Q/S \leq stonewall \quad (3.4)$$

Da Equação (3.1) sendo fixados valores para S entre S_{\min} e S_{\max} e fazendo a variação conforme (3.4), encontram-se os respectivos valores para H , onde, por ajuste de mínimos quadrados, determinam-se as constantes A_H, B_H, C_H e D_H .

A partir da Equação (3.2), pode-se determinar a eficiência adiabática η , na Figura 3.1 como função de Q/S , sendo obtido dos dados coletados de um compressor, a partir deles, e por um ajuste de mínimos quadrados, determinam-se as constantes A_E, B_E, C_E e D_E .

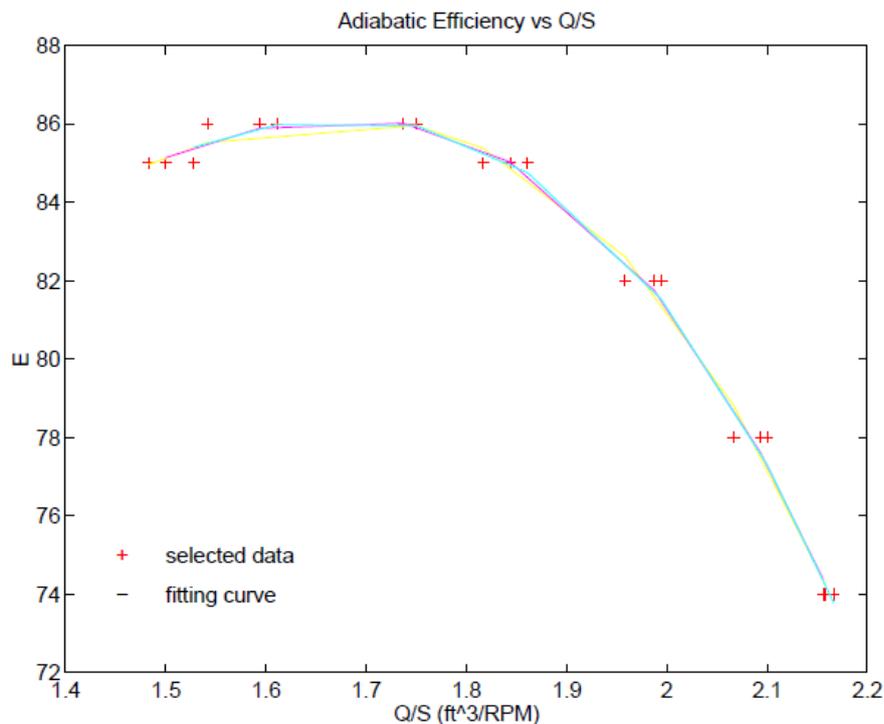


Figura 3.1 – Eficiência adiabática como uma função de Q/S (Fonte: Wu *et al.*, (2000)).

O modelo de operação de gasodutos trabalha com as variáveis (v, p_s, p_d) , onde v é a vazão mássica a ser comprimida, p_s a pressão de sucção e p_d a pressão de descarga, todavia (3.1)-(3.4) representem o domínio de operação de um compressor. As relações entre (H, Q) e (v, p_s, p_d) são (WU *et al.*, 2000):

$$H = \frac{ZRT_s}{m} \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^m - 1 \right] \quad (3.5)$$

$$Q = ZRT_s \frac{v}{p_s} \quad (3.6)$$

onde $m = (k - 1)/k$, k é o calor específico, Z é o fator de compressibilidade do gás natural, R a constante do GN e T_s a temperatura de sucção do gás (assumida constante).

Sendo $Q^L = S_{min} \times surge$ e $Q^U = S_{max} \times stonewall$ e de (3.1)-(3.4), podem ser determinadas funções $H^L(Q)$ e $H^U(Q)$, que limitam as variações inferior e superior de H , respectivamente, quando Q varia no domínio:

$$S_{min} \times surge = Q^L \leq Q \leq Q^U = S_{max} \times stonewall \quad (3.7)$$

Essas funções podem ser observadas conforme a Figura 3.2 abaixo, para o domínio de uma unidade do compressor.

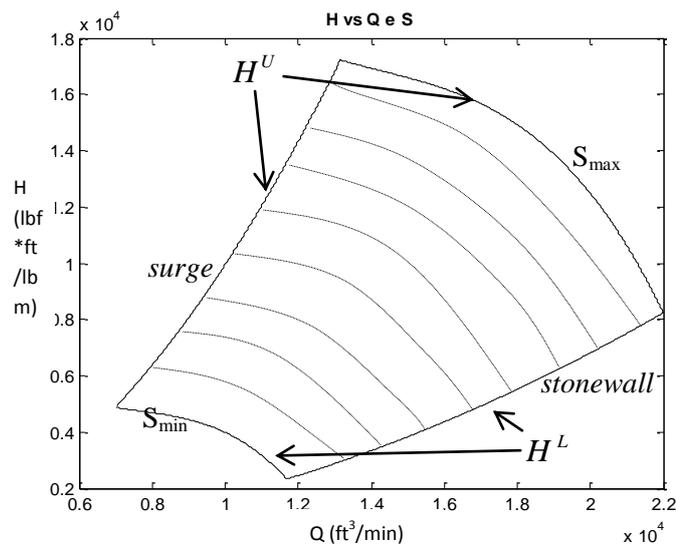


Figura 3.2 – Domínio de um compressor centrífugo envolvendo H, Q e S. (Fonte: Adaptado de Wu *et al.*, 2000).

Pode-se determinar que o domínio viável de um compressor descrito pelas variáveis (v, p_s, p_d) , denotado por D^{unit} , está dado por (WU *et al.*, 2000):

$$D^{unit} = \left\{ (v, p_s, p_d) : p_s^L \leq p_s \leq p_s^U, V^L \leq \frac{v}{p_s} \leq V^U, G^L\left(\frac{v}{p_s}\right) \leq p_s/p_d \leq G^U\left(\frac{v}{p_s}\right) \right\} \quad (3.8)$$

onde p_s^L e p_s^U são limites dados para a pressão de descarga e sucção e:

$$V^L = \frac{Q^L}{ZRT_s} \quad (3.9)$$

$$V^U = \frac{Q^U}{ZRT_s} \quad (3.10)$$

$$G^L(q) = \left[1 + \frac{m}{ZRT_s} H^L(ZRT_s q) \right]^{1/m} \quad (3.11)$$

$$G^U(q) = \left[1 + \frac{m}{ZRT_s} H^U(ZRT_s q) \right]^{1/m} \quad (3.12)$$

O domínio D^{unit} de uma unidade de compressor está esboçado na Figura 3.3. Na Figura 3.4 mostra-se um perfil bidimensional do domínio, para p_s fixo, onde observa-se que o mesmo é não convexo.

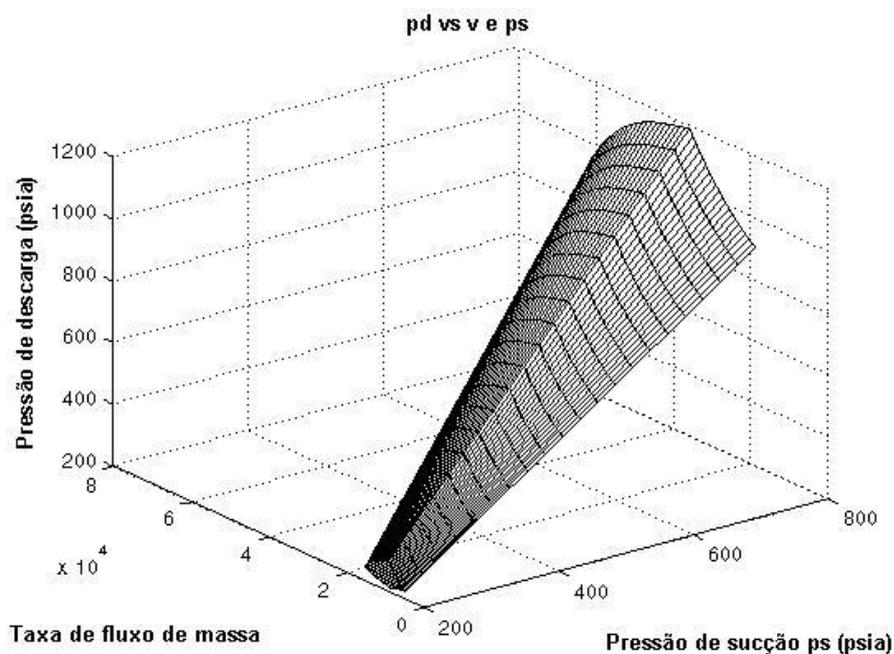


Figura 3.3 - Perfil do domínio para uma unidade de compressão (Fonte: Pacheco, 2012)

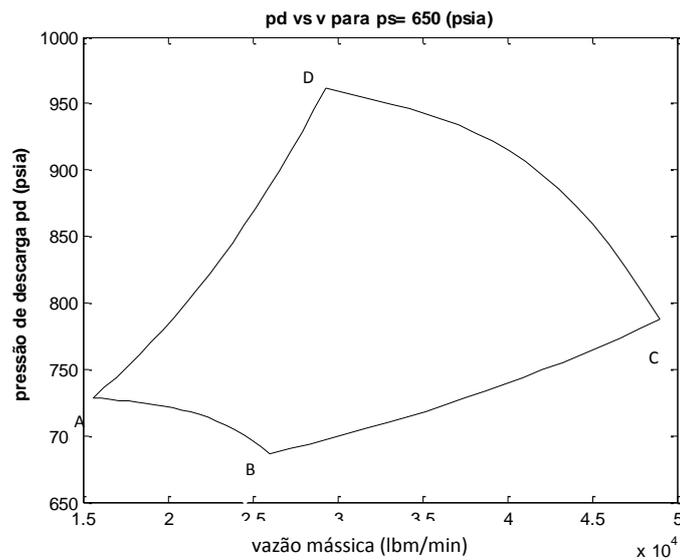


Figura 3.4 – Perfil de D^{unit} de uma unidade de compressão para p_s fixo (Fonte: Paula, 2012)

Observa-se que os arcos AD e BC são convexos, enquanto DB e AC são côncavos. Esta propriedade de não convexidade é comum para os compressores. Da relação (3.8), e de acordo com a Figura 3.3, verifica-se que o domínio D^{unit} é limitado e o domínio da superfície que o limita superiormente está dada por (AZEREDO, 2008):

$$\{v(t, x), p_s(t, x), p_d(t, x)\} = (tx, t, G^U(x)t): p_s^L \leq t \leq p_d^L, V^L \leq x \leq V^U \quad (3.13)$$

Sendo fixado um x , tem-se um segmento de reta dado por:

$$\{v(t), p_s(t), p_d(t)\} = (tx, t, G^U(x)t): p_s^L \leq t \leq p_d^L \quad (3.14)$$

Para todo x , temos $\{v(0), p_s(0), p_d(0) = (0, 0, 0)\}$, i.e, todos os segmentos de reta de (3.14), se forem prolongados passam através da origem. Portanto, o domínio D^{unit} da Figura 3.3 corresponde a um sólido cônico truncado.

3.1.2 Domínio viável para uma Estação de Compressão Clássica (EsCC)

Numa EsCC o valor das pressões de sucção e descarga para cada compressor se mantém iguais aos valores considerados nesta. Em relação à vazão mássica, Wu *et al.* (2000) assumem que a parcela de v a ser considerada para cada compressor corresponde à divisão de

v em partes iguais entre o número de compressores acionados. Assim, para r compressores acionados, o domínio D^r , $1 \leq r \leq N$, está dado em função de $(v/r, p_s, p_d) \in D^{unit}$; i.e :

$$D^r = \left\{ (v/r, p_s, p_d) : p_s^L \leq p_s \leq p_s^U, V^L \leq \frac{v}{r p_s} \leq V^U, G^L\left(\frac{v}{r p_s}\right) \leq p_s/p_d \leq G^U\left(\frac{v}{r p_s}\right) \right\} \quad (3.15)$$

Logo, o domínio de uma estação de compressão clássica está dado por:

$$D^{clássica} = \bigcup_{r=1}^N D^r \quad (3.16)$$

A Figura 3.5 mostra o gráfico do domínio D para uma estação com quatro compressores idênticos em paralelo. O perfil do domínio para um p_s fixo é representado pela área mais escura.

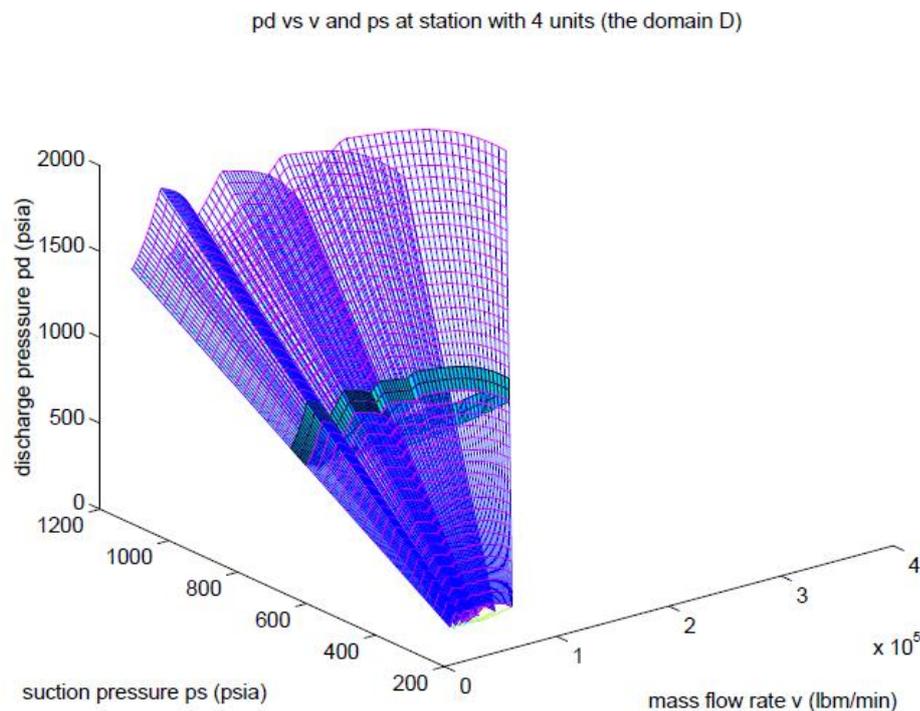


Figura 3.5 - Domínio D de uma estação com quatro compressores idênticos e em paralelo. (Fonte: Wu *et al.*, 2000)

A Figura 3.6 mostra o perfil bidimensional dos domínios $D1$, $D2$, $D3$ e $D4$ da Figura 3.5. Nota-se que o domínio D^r é obtido expandindo r vezes o domínio $D1$ na direção de v .

Portanto, pode-se afirmar que D^r tem as mesmas propriedades de DI , conforme Azeredo (2008).

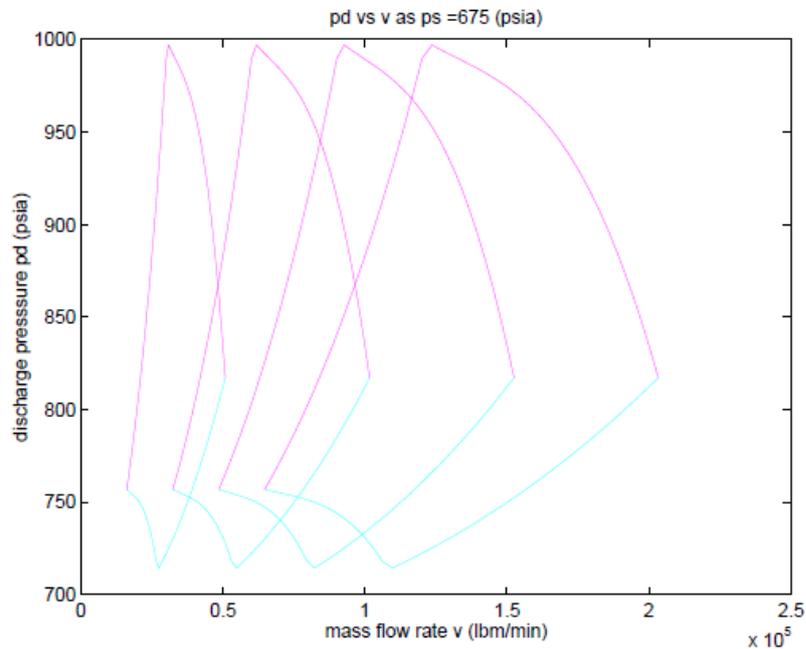


Figura 3.6 - Perfil do domínio D de uma estação com quatro compressores idênticos e em paralelo (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

A Figura 3.6 mostra que o domínio D da estação é conexo, embora este domínio dependa das características dos compressores instalados na estação. Uma condição necessária para que o domínio D seja conexo é dada a seguir (AZEREDO, 2008):

Lema 3.1. (Wu *et al.*,2000) *Se o domínio viável D de uma estação com unidades paralelas idênticas for conexo, então:*

$$\frac{Q^U}{Q^L} \geq 2 \quad (3.17)$$

onde Q^L e Q^U são as taxas volumétricas de fluxo mínimo e máximo, respectivamente.

3.1.3 Aproximação para o domínio D da Estação Clássica

Como pode ser observado, o perfil do domínio para o compressor é não convexo, o que gera um grau de dificuldade relativamente grande para a implementação de

procedimentos de programação matemática. Assim Wu *et al.* (2000) propõem uma aproximação convexa (poliedral) para o domínio D da Estação clássica de (3.16), onde propõem uma aproximação exterior poliedral convexa para D^1 , obtendo um superconjunto \bar{D} para o domínio D . Para obter tal superconjunto de D^1 , inicialmente é feita uma aproximação linear externa para o contorno ABCD (Figura 3.4) e, então, conecta-se o contorno linear externo com a origem.

Para simplificar e manter o modelo pequeno, Wu *et al.* (2000), utiliza aproximação linear que consiste de seis hiperplanos. Experiências computacionais mostram que esta aproximação, é suficientemente satisfatória.

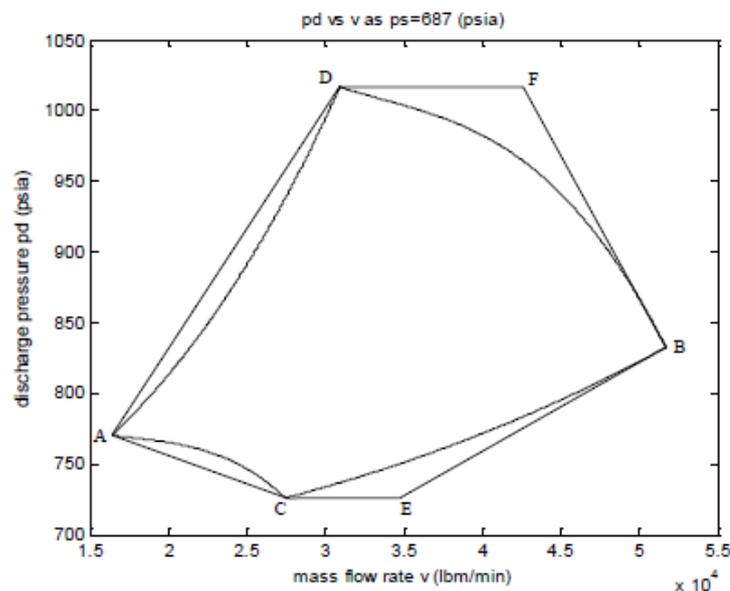


Figura 3.7: Aproximação linear externa do contorno (arco ACBD) (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

Pode ser observado na Figura 3.7, seis segmentos AD , DF , FB , AC , CE e EB que formam uma aproximação linear externa para o contorno ABCD. A partir da conexão desses seis segmentos de reta com a origem tem-se seis hiperplanos. Tais planos junto com outros dois planos, $p_s = p_s^L$ e $p_s = p_s^U$, constituem um superconjunto linear do domínio D^1 . As equações dessas seis retas, correspondentes aos segmentos de reta AD , DF , FB , AC , CE e EB , respectivamente, tendo a seguinte forma:

$$p_d = a_i v + b_i p_s, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3.18)$$

sendo a_i , b_i constantes que podem ser calculadas pelos valores das funções G^L e G^U nos pontos A, B, C, D, e as derivadas no ponto B.

O superconjunto linear \bar{D} do domínio D pode ser construído baseado no superconjunto linear de D^1 , considerando-se uma estação de compressão clássica (N unidades de compressores paralelos). Para isto, dois planos correspondentes aos segmentos de reta BE e BF movem-se na direção de v até o novo valor de v para cada ponto ser exatamente N vezes o valor original de v . Portanto, D consiste de todos os pontos (v, p_s, p_d) que satisfazem:

$$p_s^L \leq p \leq p_s^U \quad (3.19)$$

$$p_d \leq a_1 v + b_1 p_s \quad (3.20)$$

$$p_d \leq b_2 p_s \quad (3.21)$$

$$p_d \leq (a_3 v)/N + b_3 p_s \quad (3.22)$$

$$p_d \geq (a_4 v) + b_4 p_s \quad (3.23)$$

$$p_d \geq b_5 p_s \quad (3.24)$$

$$p_d \leq (a_5 v)/N + b_6 p_s \quad (3.25)$$

Na Figura 3.8 tem-se o superconjunto linear \bar{D} junto com o domínio D para uma estação com quatro unidades idênticas e em paralelo. Na Figura 3.9 pode ser visto o perfil bidimensional do domínio D junto com o perfil da aproximação de D , o \bar{D} .

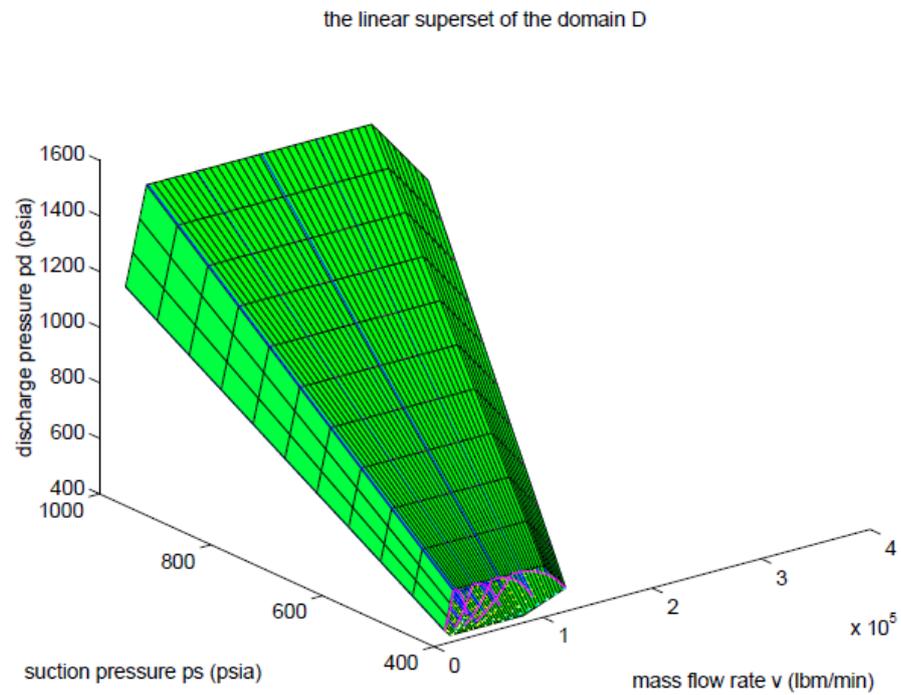


Figura 3.8 - Superconjunto \bar{D} do domínio viável D (estação com quatro compressores em paralelo) (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

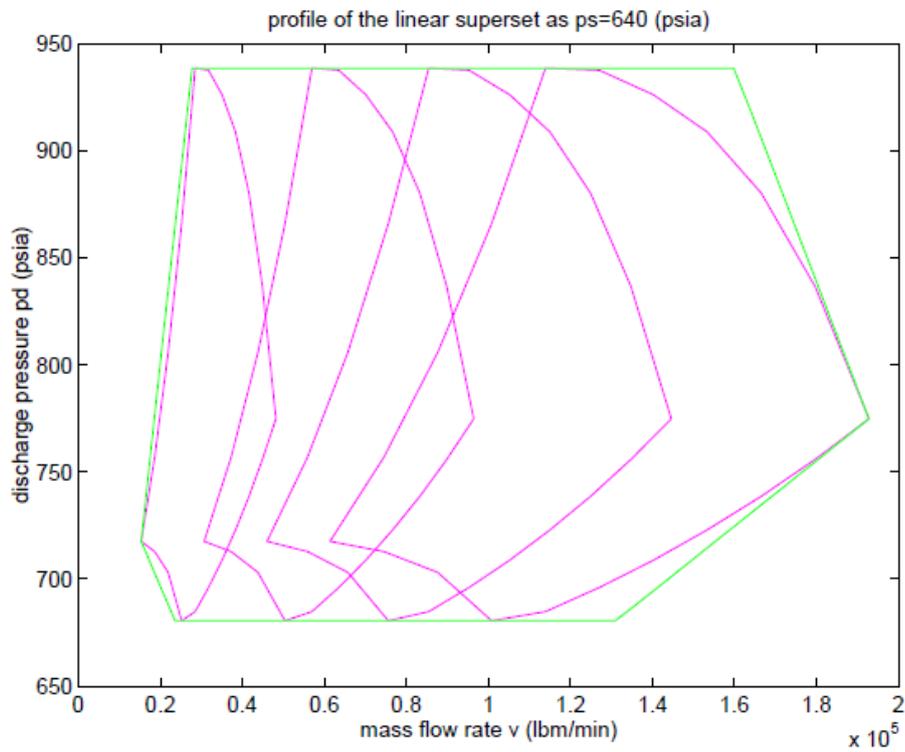


Figura 3.9 - Perfil de \bar{D} e D (estação com quatro compressores em paralelo) (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

3.2 Domínio de uma Estação Generalizada (EsCG)

A Estação de compressão generalizada é constituída por N compressores não necessariamente idênticos. Para dado compressor $i \in \{1, \dots, N\}$ as relações entre as variáveis Q , S , H e η satisfazem as equações:

$$\frac{H}{S^2} = A_{H_i} + B_{H_i}(Q/S) + C_{H_i}(Q/S)^2 + D_{H_i}(Q/S)^3 \quad (3.26)$$

$$\eta = A_{E_i} + B_{E_i}(Q/S) + C_{E_i}(Q/S)^2 + D_{E_i}(Q/S)^3 \quad (3.27)$$

Sendo $A_{H_i}, B_{H_i}, C_{H_i}, D_{H_i}, A_{E_i}, B_{E_i}, C_{E_i}, D_{E_i}$ as constantes que dependem do compressor, (estimadas por mínimos quadrados). A velocidade de rotação S do compressor varia dentro de um intervalo:

$$S_{i(\min)} \leq S \leq S_{i(\max)} \quad (3.28)$$

A razão Q/S varia entre um limite inferior *surge*, e um limite superior, *stonewall*:

$$surge_i \leq Q/S \leq stonewall_i \quad (3.29)$$

As variáveis H e S estão relacionadas como segue:

$$Q^{L_i} \leq Q \leq Q^{U_i} \quad (3.30)$$

$$H^{L_i}(Q) \leq H \leq H^{U_i}(Q) \quad (3.31)$$

Sendo $Q^{L_i} = S_{min} \times surge_i$ e $Q^{U_i} = S_{max} \times stonewall_i$. Assim, tem-se que o domínio do compressor i está dado como:

$$D_i = \left\{ (v, p_s, p_d) : p_s^{L_i} \leq p_s \leq p_s^{U_i}, V_s^{L_i} \leq \frac{v}{p_s} \leq V_s^{U_i}, G^{L_i}\left(\frac{v}{p_s}\right) \leq p_s/p_d \leq G^{U_i}\left(\frac{v}{p_s}\right) \right\} \quad (3.32)$$

onde $p_s^{L_i}$ e $p_s^{U_i}$ são limites dados para a pressão de sucção e:

$$V_i^L = \frac{Q_i^L}{ZRT_s}, \quad V_i^U = \frac{Q_i^U}{ZRT_s}$$

$$G_i^L(q) = \left[1 + \frac{m}{ZRT_s} H^L(ZRT_s q) \right]^{1/m}, \quad G_i^U(q) = \left[1 + \frac{m}{ZRT_s} H^U(ZRT_s q) \right]^{1/m}$$

Considere uma estação de compressão generalizada, com N compressores não necessariamente idênticos, uma vazão mássica v a ser comprimida e uma partição desta entre os compressores a serem ativados. Então:

$$v = v_{i_1} + \dots + v_{i_r}, \quad (3.33)$$

sendo v_{i_k} a vazão mássica no compressor i_k , $\forall i_k \in \{1, \dots, N\}$ e $k = 1, \dots, r$. A condição descrita abaixo deverá ser satisfeita:

$$(v_{i_k}, p_s, p_d) \in D_{i_k} \quad (3.34)$$

Assim, o domínio viável de uma estação com N compressores, não necessariamente idênticos, estará determinado por:

$$D = \{(v, p_s, p_d): v = v_{i_1} + \dots + v_{i_r}, r \in \{1, \dots, N\}, (v_{i_k}, p_s, p_d) \in D_{i_k}, i_k \in \{1, \dots, N\}, k = 1, \dots, r\} \quad (3.35)$$

Azeredo (2008) considerou uma Estação composta por dois tipos de compressores: 3 do tipo A e 2 do tipo B, com suas respectivas características. Assim obteve a Figura 3.10 representando o perfil dos domínios unitários para esses compressores, com uma pressão de sucção $p_s = 500$ psia.

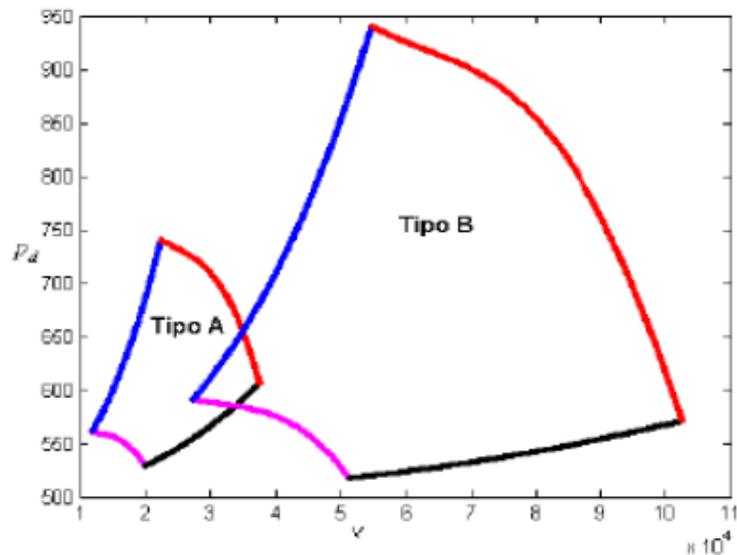


Figura 3.10: Perfil dos domínios unitários de dois tipos diferentes de compressores ($p_s = 500$ (psia)) (Fonte: Azeredo, (2008))

A eficiência η da equação (3.27) como função de Q/S , está plotada para os dois tipos de compressores A e B na Figura 3.11.

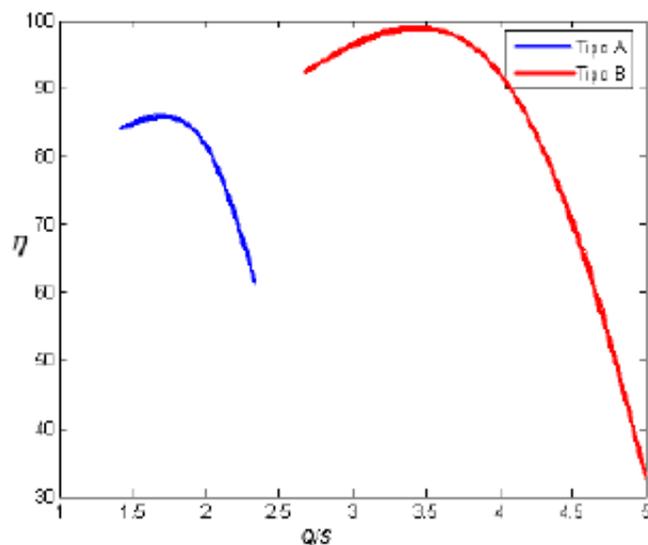


Figura 3.11: Eficiência adiabática η para os compressores de tipo A e B. (Fonte: Azeredo, 2008)

Sendo rA e rB o número de compressores do tipo A e B, respectivamente, que poderão ser ativados. Portanto, o número máximo de compressores ativados é $rA + rB$. Assim, rA e rB satisfazem:

$$0 \leq rA \leq 3, \quad 0 \leq rB \leq 2, \quad 0 \leq rA + rB \leq 5$$

A partir de rA e rB , determina-se a configuração dos compressores da estação, i.e., os compressores que poderão ser usados para processar a vazão mássica v , considerando os rA primeiros compressores tipo A e os rB primeiros compressores tipo B.

Como exemplifica Azeredo (2008), para $rA = 2$ e $rB = 2$, define-se a seguinte configuração $r = (1; 1; 0; 1; 1)$; i.e., cada vetor $r \in \{0,1\}^5$ define de maneira única uma configuração da estação e, reciprocamente, cada $0 \leq rA \leq 3$ $0 \leq rB \leq 2$ define de maneira única um vetor $r \in \{0,1\}^5$. Nesse sentido, rA e rB são equivalentes ao respectivo $r \in \{0,1\}^5$.

Assim, ao se determinar que em uma estação entra uma vazão mássica v , esta poderá ser dividida entre os dois tipos de compressores A e B. Para realizar a divisão, deve-se considerar a seguinte condição (RODRIGUES, 2010):

1. A vazão mássica total v será dividida entre os compressores tipo A e tipo B em parcelas $v / \text{ativados}$ (onde $\text{ativados} = rA + rB$);

Por exemplo, para a estação de cinco compressores se considerarmos, $rA = 3$ e $rB = 2$, teremos definido $r = (1,1,1,1,1)$ e a divisão será feita tomando parcelas de $v = 5$ de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Exemplo de divisão da taxa de fluxo de mássica v para compressores do tipo A e tipo B.

Tipo de compressores	Parcela de v alocada					
	$0 \times v/5$	$1 \times v/5$	$2 \times v/5$	$3 \times v/5$	$4 \times v/5$	$5 \times v/5$
A	$0 \times v/5$	$1 \times v/5$	$2 \times v/5$	$3 \times v/5$	$4 \times v/5$	$5 \times v/5$
B	$5 \times v/5$	$4 \times v/5$	$3 \times v/5$	$2 \times v/5$	$1 \times v/5$	$0 \times v/5$

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2010)

Até o momento, não se definiu o número de compressores que serão efetivamente utilizados entre os $rA = 3$ do tipo A e $rB = 2$ do tipo B, bem como de que maneira será distribuída a vazão mássica entre esses compressores selecionados. Será considerado que uma vez definida a alocação (a,b) de parcelas de $\left(\frac{v}{\text{ativados}}\right)$ para os compressores tipo A e tipo B (isto é, $a \times \left(\frac{v}{\text{ativados}}\right)$ para tipo A e $b \times \left(\frac{v}{\text{ativados}}\right)$ para tipo B), essas parcelas poderão ser subalocadas entre os rA compressores tipo A e rB compressores tipo B, em parcelas de sextas partes e quartas partes respectivamente (RODRIGUES, 2010).

Portanto, determina-se as matrizes $AlocaA$, para o compressor tipo A, que irá armazenar todas as formas possíveis de distribuir a vazão mássica entre os compressores do tipo A e, analogamente, a matriz $AlocaB$ que irá armazenar as possíveis distribuições da vazão mássica entre os compressores do tipo B. Tais matrizes estão dadas por:

$$AlocaA = \begin{pmatrix} 6/6 & 0 & 0 \\ 5/6 & 1/6 & 0 \\ 4/6 & 2/6 & 0 \\ 3/6 & 3/6 & 0 \\ 4/6 & 1/6 & 1/6 \\ 3/6 & 2/6 & 1/6 \\ 2/6 & 2/6 & 2/6 \end{pmatrix} \quad AlocaB = \begin{pmatrix} 4/4 & 0 \\ 3/4 & 1/4 \\ 2/4 & 2/4 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

Portanto, se $rA = 3$ e $rB = 2$, a vazão mássica v que entra na estação, poderá ser alocada segundo as seguintes alternativas:

- (i) Escolher uma alocação para compressores tipo A e tipo B, segundo a Tabela 3.1;
- (ii) Escolher uma forma de subalocar as quantias correspondentes à alocação (a;b), determinada no item anterior, definindo uma linha de $AlocaA$ e uma linha de $AlocaB$.

Como exemplo, se for escolhido a alocação (3;2) para os compressores tipo A e tipo B na Tabela 3.1, então serão distribuídos $\left(\frac{3v}{5}\right)$ para os compressores do tipo A e $\left(\frac{2v}{5}\right)$ para os do tipo B. Além disso, se escolhermos para subalocar as quantias de (3;2) a linha 4 de $AlocaA$ e a linha 3 de $AlocaB$, tem-se a seguinte distribuição entre os compressores da estação:

$$v_{parcial}^{(3;2)} = \left(\left(\frac{3}{6}\right) \times \left(\frac{3v}{5}\right), \left(\frac{3}{6}\right) \times \left(\frac{3v}{5}\right), 0, \left(\frac{2}{4}\right) \times \left(\frac{2v}{5}\right), \left(\frac{2}{4}\right) \times \left(\frac{2v}{5}\right) \right)$$

Observa-se que $\sum_{i=1}^5 v_{parcial}_i^{(3;2)} = v$. Uma vez definido o vetor $v_{parcial}_i^{(3;2)}$, este estará no domínio D da estação se, e somente se,

$$(v_{parcial}_i^{(3;2)}, p_s, p_d) \in D_i, \quad i = 1, \dots, 5$$

Caso $v_{parcial}^{(a,b)} \in D$, poderá ser calculado o custo de compressão relativo ao mesmo (Azeredo, 2008). Nota-se que no modelo de Wu *et. al* (2000) não se precisa deste cálculo, na medida que as estações de compressão são clássicas (compressores idênticos) e, portanto, a

vazão a ser comprimida se divide em partes iguais entre os r compressores ativados (resultando o custo r vezes o custo de um compressor). Assim, a proposta de Azeredo (2008) a respeito do cálculo de custos em estações de compressão generalizadas foi inédita e trouxe resultados significativos, para o trabalho de Azeredo (2008), bem como nos posteriores trabalhos como Christo (2008), Rodrigues (2010), entre outros.

3.2.1 Aproximação do domínio viável do modelo Generalizado

Azeredo (2008), apresentou em seu trabalho uma aproximação para o modelo apresentado por Wu *et. al* (2000). Para isto, trabalhou com dois tipos de compressores não idênticos, tipo A e tipo B e fixando a pressão de sucção, obteve uma figura que mostra os domínios de cada compressor como na Figura 3.12:

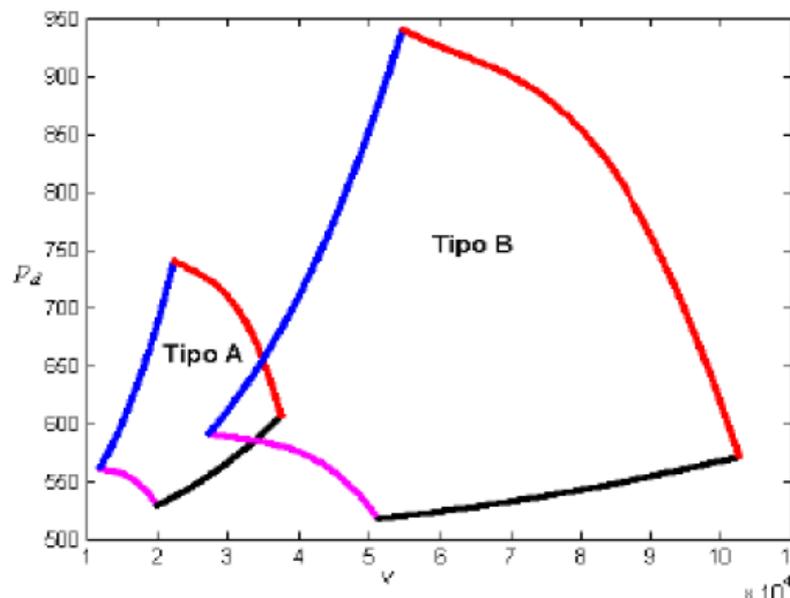


Figura 3.12: Perfil dos domínios unitários de dois tipos diferentes de compressores ($p_s = 500$ (psia)) (Fonte: Azeredo, (2008))

A Figura 3.12 mostra a não convexidade dos conjuntos, o que dificulta o uso de métodos de otimização. Baseando na mesma metodologia apresentada por Wu *et al.* (2000) (ver seção 3.1.3) de uma aproximação que envolva todos os domínios dos compressores da estação, isso poderia fornecer um conjunto não convexo, como pode ser observado na Figura 3.13. É fato que se encontra uma aproximação poliedral que envolva o domínio unitário de todos os compressores, porém, isto introduzirá erros em condições reais.

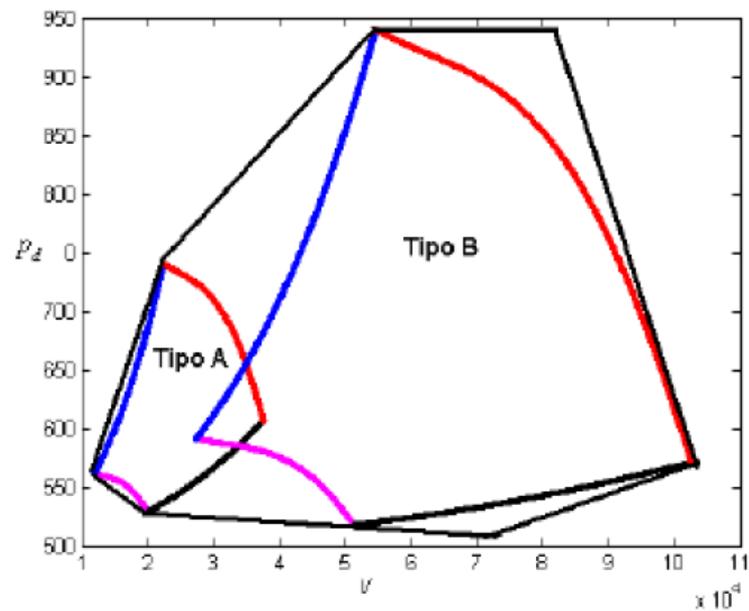


Figura 3.13: Aproximação inteira para os perfis dos domínios unitários dos compressores do tipo A e tipo B

Para sanar tal dificuldade, Azeredo (2008) apresenta em seu trabalho uma aproximação do domínio D , para encontrar uma solução aproximada, seguindo as ideias apresentadas em Wu *et al.* (2000). Para isto, realizou apenas aproximações poliedrais para cada compressor, como mostra a Figura 3.14.

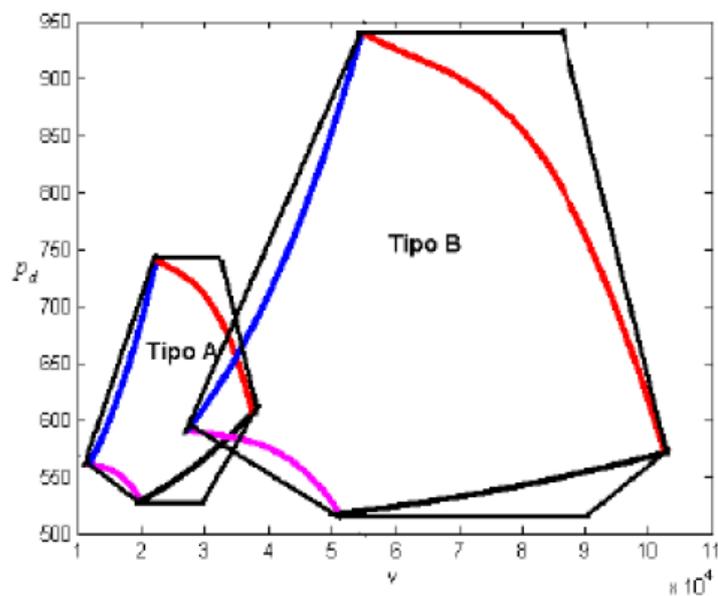


Figura 3.14: Aproximação linear externa para os perfis dos domínios unitários dos compressores do tipo A e tipo B. (Fonte: Azeredo, (2008)).

Esta aproximação linear realizada por Azeredo (2008), implica em bons resultados numéricos.

3.3 Função Custo do combustível do modelo Clássico

Para apresentar a função custo das EsCC, inicialmente será definido o cálculo do custo para um único compressor.

3.3.1 Função custo de combustível para um compressor

A função de custo de um compressor, denotada por g^{unit} , depende das características do compressor, entretanto, sabe-se que ela aumenta quando a razão p_d/p_s e a taxa de fluxo volumétrica Q (ou v/p_d) aumentam e diminuem, quando a pressão de sucção p_s diminui (ver Figura 3.14) (CHRISTO, 2008).

A função custo do combustível para uma unidade do compressor se define como (WU *et al.*, 2000):

$$g^{unit}(v, p_s, p_d) = \alpha \frac{vH}{\eta}, \forall (v, p_s, p_d) \in D^{unit} \quad (3.37)$$

Onde α é uma constante positiva conhecida (assumida igual a 1).

Wu *et al.* (2000) utiliza algumas funções que procuram aproximar a função g^{unit} , dentre as várias formas de aproximação a que apresenta menor percentual de erro é a função g^6 descrita abaixo:

$$g^6(v, p_s, p_d) = v \left(A_6 \left(\frac{v}{p_d} \right)^2 + B_6 \left(\frac{p_d}{p_s} \right)^2 + C_6 \left(\frac{v}{p_s} \right) \left(\frac{p_d}{p_s} \right) + D_6 \left(\frac{v}{p_s} \right) + E_6 \left(\frac{p_d}{p_s} \right) + F_6 \right) \quad (3.38)$$

Sendo A_6, B_6, C_6, D_6, E_6 e F_6 constantes do compressor estimadas pelo método de mínimos quadrados.

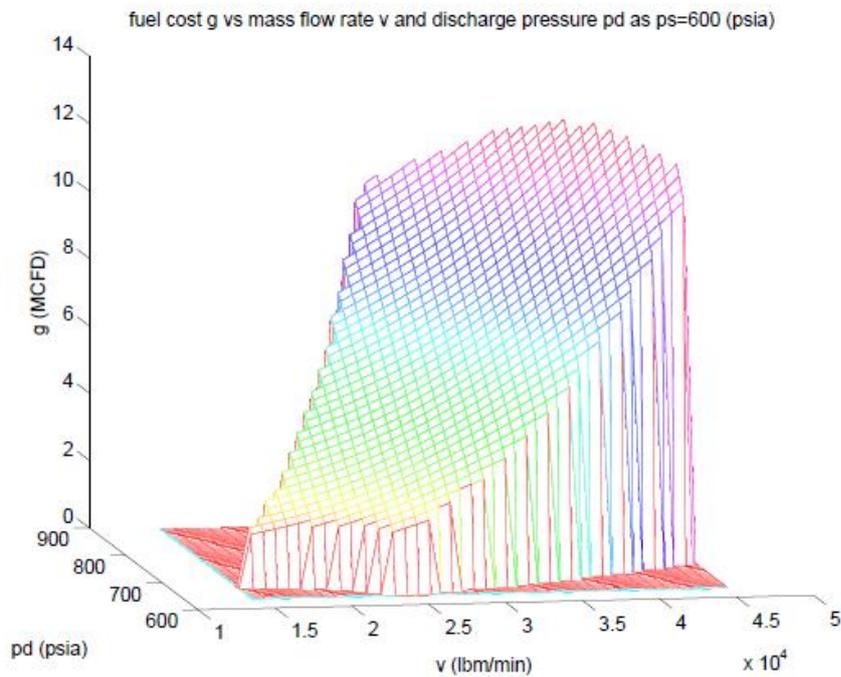


Figura 3.15: Função custo $g^{unit}(v, p_s, p_d) \in D^{unit}$ para p_s fixo (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

3.3.2 Função custo para uma Estação de compressão clássica

Uma estação de compressão, sendo dado um $(v, p_s, p_d) \in D$, pode funcionar ou não, com um ou mais compressores. Entretanto o custo de combustível varia de acordo com o número de compressores ativados, caso for alterado o número de compressores na Estação a vazão mássica de entrada e a eficiência adiabática também são alterados.

Logo, se em uma estação com N compressores idênticos, sendo $(v, p_s, p_d) \in D$, pode ser operado por r compressores, $(v, p_s, p_d) \in D^r$ e conseqüentemente $(v/r, p_s, p_d) \in D^1$. Assim, o custo total da estação será rg^{unit} , sendo $1 \leq r \leq N$. Portanto, o custo mínimo de combustível total da estação para um (v, p_s, p_d) será:

$$g(v, p_s, p_d) = \min_{r \in R} \left\{ r g^{unit} \left(\frac{v}{r}, p_s, p_d \right) \right\} \quad (3.39)$$

Sendo R o conjunto de valores viáveis de r para um dado (v, p_s, p_d) , ou seja:

$$R_{(v, p_s, p_d)} = \{ r : r \text{ inteiro}, 1 \leq r \leq N, (v, p_s, p_d) \in D^r \} \quad (3.40)$$

A função $g(v, p_s, p_d)$ é crescente em p_d , para (v, p_s) fixo e decrescente em p_s , para (v, p_d) fixo. A Fig. 3.15 e a Fig. 3.16, que correspondem ao perfil horizontal e vertical de D^{unit} (Fig. 3.3), mostram os intervalos viáveis de p_d e p_s , respectivamente para compressão de (v, p_s, p_d) num compressor. Nota-se que no primeiro caso, p_d^L corresponde à pressão de descarga ótima para comprimir v ; já, no segundo caso, p_s^U é ótimo nesse intervalo para comprimir v .

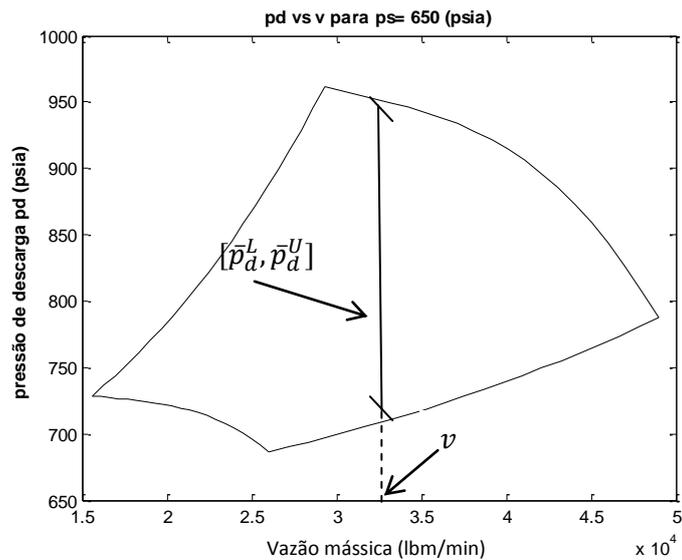


Figura 3.16 - Determinação das pressões de descarga viáveis para dados v e p_s

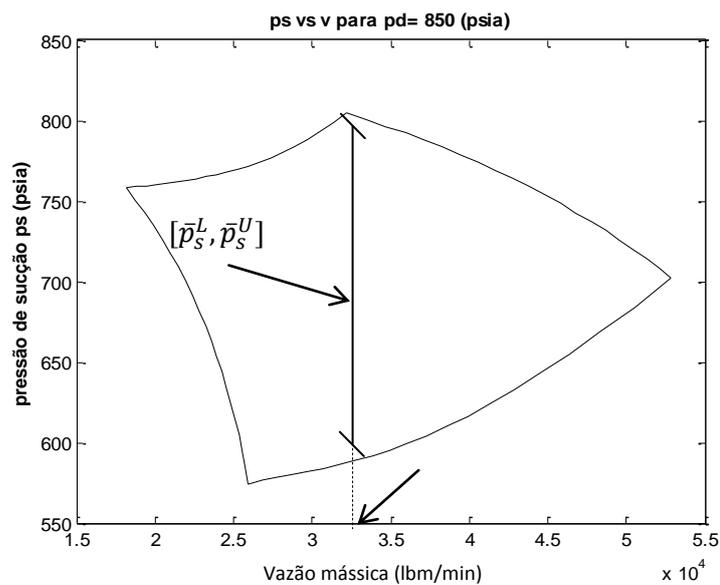


Figura 3.17 - Determinação das pressões de sucção viáveis para dados v e p_d

Proposição 3.1. (Wu *et al.*, 2000) Para qualquer $(v, p_s, p_d) \in D$, se $r_1, r_2 \in R$, então, para qualquer r inteiro com $r_1 \leq r \leq r_2$ tem-se $r \in R_{(v, p_s, p_d)}$. Isto é, para qualquer $(v, p_s, p_d) \in D$, o conjunto R é um intervalo de inteiros.

A Figura 3.18 apresenta a função custo de combustível para uma estação com quatro compressores, obtido a partir do funcionamento de um, dois, três ou quatro destes separadamente. A função custo de combustível, neste caso, é não explícita, descontínua e não diferenciável.

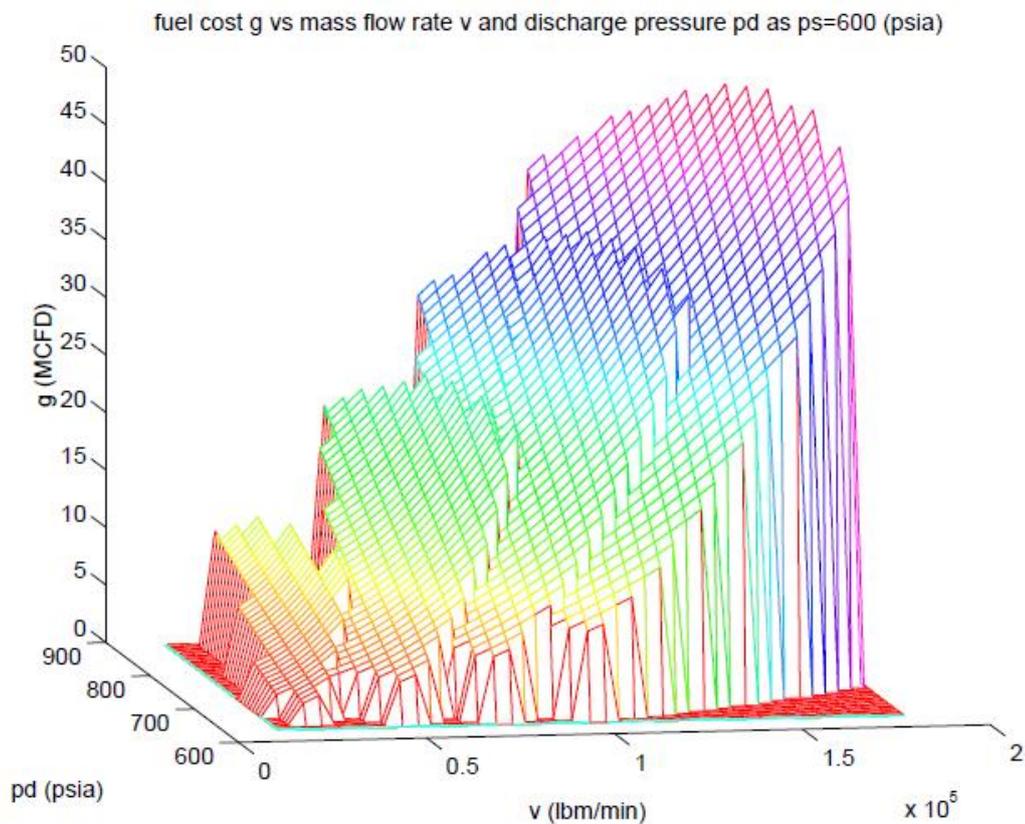


Figura 3.18: Custo de combustível para diferentes números de compressores funcionando em uma estação com quatro compressores idênticos em paralelo. (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

3.4 Função custo do combustível para uma Estação generalizada

Para determinar a função custo de combustível da Estação generalizada, serão utilizados os conceitos já desenvolvidos para uma estação que possui compressores idênticos dispostos em paralelo, como apresentado por Wu *et al.* (2000).

As Estações de compressão generalizadas são compostas de K compressores não necessariamente idênticos e a vazão mássica v que chega a essas estações pode ser comprimida por quaisquer $r \in \{1, \dots, K\}$ compressores da estação, desde que $v = v_{i_1} + \dots + v_{i_r}$ sendo v_{i_r} a vazão mássica no compressor $i_k, \forall i_k \in \{1, \dots, K\}$ e $k = 1, \dots, K$. Portanto, para alguns valores $(v, p_s, p_d) \in D$, diferentes combinações de compressores da estação poderiam ser usadas. Porém os custos de uso de combustível provavelmente seriam diferentes.

Conforme Azeredo (2008) o domínio D de uma estação de compressão generalizada com N compressores é descrito como:

$$D = \{ (v, p_s, p_d) : v = v_{i_1} + \dots + v_{i_r}, (i_1, \dots, i_k) \in C(K, r), (v_{i_k}, p_s, p_d) \in D_{i_k}, \forall i_k \in \{1, \dots, K\} \} \quad (3.41a)$$

Onde $C(K, r)$ é o conjunto de combinações de N elementos em grupos de r e D_{i_k} é o domínio do ik -ésimo compressor da estação. Observe que dado $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_r}) \in D$ como em (3.41a), fica estabelecido de maneira única um vetor $\bar{r} = (\bar{r}_A, \bar{r}_B \dots) \in \{0, 1\}^K$ de configuração de funcionamento da estação contabilizando o número de vezes que cada tipo de compressor da estação é usado para definir v . Assim, se a estação tiver *Tipo A* compressores A e se usam $n_A \leq \text{TipoA}$ para definir $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_r}) \in D$ então $\bar{r}_A = \{\underbrace{1, \dots, 1}_{n_A}, 0, \dots, 0\}^{\text{TipoA}}$, analogamente $\bar{r}_B = \{\underbrace{1, \dots, 1}_{n_B}, 0, \dots, 0\}^{\text{TipoB}}$, para $n_B \leq \text{TipoB}$ compressores B usados e assim sucessivamente. Reciprocamente, cada vetor $\bar{r} = (\bar{r}_A, \bar{r}_B \dots) \in \{0, 1\}^K$ determina uma possível configuração dos compressores da estação (RODRIGUES, 2010).

Portanto, considerando o vetor $(v, p_s, p_d) \in D$, de acordo com Rodrigues (2010), o conjunto associado de configurações viáveis da estação R_v , como um conjunto de vetores $\bar{r} \in \{0, 1\}^N$ determinados pelas partições $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_r}) \in D$. Logo, fazendo a associação da partição $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_r})$ a $\bar{r} = (\bar{r}_A, \bar{r}_B, \dots) \in \{0, 1\}^K$, é denotado por:

$$(v_{i_1}, \dots, v_{i_r}) \approx (\bar{r}_A, \bar{r}_B, \dots) \in \{0, 1\}^K \quad (3.41b)$$

e assim,

$$R_v = \{ (\bar{r}_A, \bar{r}_B, \dots) \in \{0,1\}^K : v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_r}) \approx (\bar{r}_A, \bar{r}_B, \dots), (v_{i_1}, \dots, v_{i_r}, p_s, p_d) \in D \} \quad (3.42)$$

A função custo do combustível correspondente para um dado $(v, p_s, p_d) \in D$, está dado como:

$$g(v, p_s, p_d) = \min_{r \in R_v} \{ \sum_{k=1}^r g_{i_k}^{unit}(v_{i_k}, p_s, p_d) \} \quad \{3.43\}$$

onde $g_{i_k}^{unit}(v_{i_k}, p_s, p_d)$ é o custo correspondente a comprimir (v_{i_k}, p_s, p_d) no ik -ésimo, compressor da estação.

CAPÍTULO 4

METAHEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU

Neste Capítulo apresentam-se dois algoritmos de metaheurísticas distintas para a resolução do problema proposto (2.17)-(2.22) adaptado para EsCG: GRASP e Busca Tabu. Para estas duas metaheurísticas foram elaborados dois pseudocódigos. O desenvolvimento do pseudocódigo utilizando GRASP inspira-se em casos bem sucedidos apresentados por trabalhos anteriores como Iamashita (2006), Jubini (2008), Azeredo (2008), Christo (2008) e Rodrigues (2010). O segundo pseudocódigo, que utiliza a heurística de Busca Tabu, inspirou-se no trabalho desenvolvido por Borraz-Sánchez e Ríos-Mercado (2009) que obteve resultados satisfatórios para a minimização do custo do transporte do combustível.

A construção das heurísticas GRASP e Busca Tabu, deu-se a partir dos algoritmos propostos por Christo *et al.* (2009) e Paula *et al.* (2011). Para explicar os princípios nos que se baseiam esses algoritmos, apresenta-se a ilustração do gasoduto na Figura 4.1.

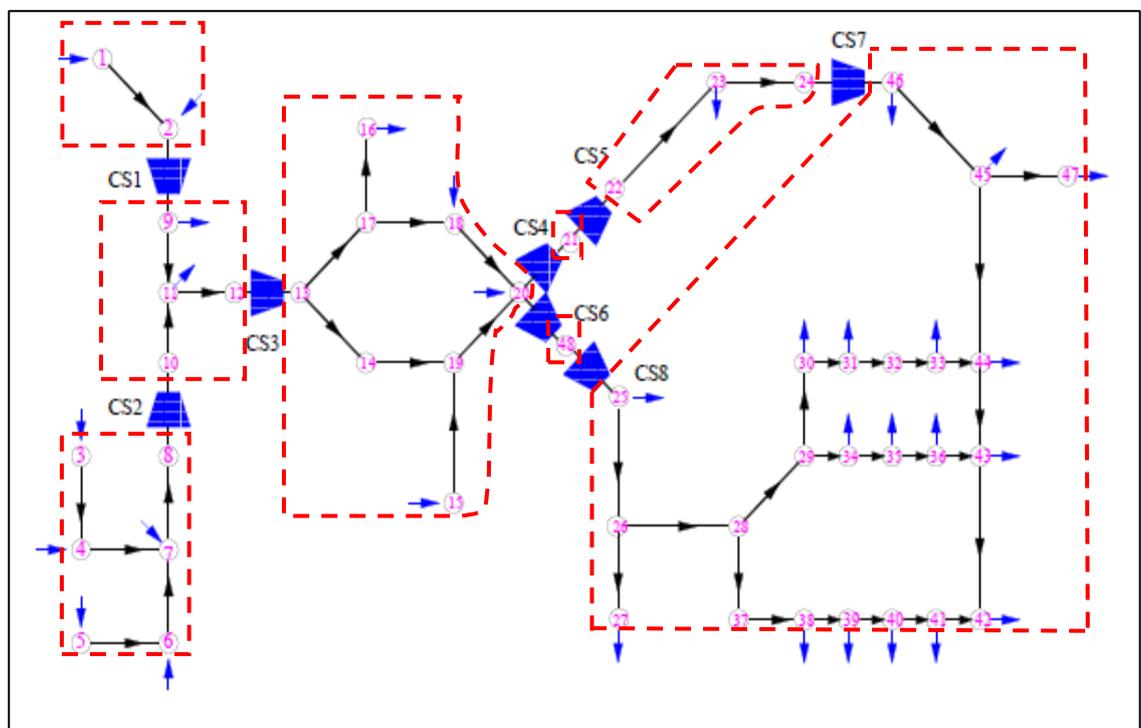


Figura 4.1- Exemplo de gasoduto (adaptado de Wu *et al.*,2000)

Como se pode observar, o gasoduto da Figura 4.1 tem 48 nós, 43 dutos e 8 EsC. Os vértices que possuem setas que entram correspondem a vértices com as vazões líquidas positivas (nós de injeção), os que possuem setas que saem correspondem a vértices com as vazões líquidas negativas (nós de entrega) e os que não possuem setas são vértices de transbordo. As linhas pontilhadas separam de maneira única a rede de gasodutos em 8 subredes, as quais se caracterizam por não possuir EsC; i.e., nas subredes o problema consiste em distribuir pressões (p) e vazões (u) de forma a atender as respectivas demandas sem originar custos, pois não existe compressão. Note que algumas dessas pressões irão se constituir em pressões de sucção ou de descarga para o processamento do vetor de vazões $v^T = (v_1, \dots, v_8)$ é a vazão na i -ésima EsC, originando custos de compressão.

Assim, dado um vetor viável de vazões nas estações ($v^T = (v_1, \dots, v_8)$), este vetor irá gerar custos de compressão, desde que se encontrem vazões e pressões nas subredes que permitam processar cada uma das vazões v_i nas respectivas EsC. Portanto, para um dado v , o problema poderia ser resolvido encontrando sequencialmente, a partir de uma das subredes, fixados um nó de referência e a respectiva pressão de referência, vazões e pressões nas subredes, de forma a percorrer toda rede, gerando em cada passagem de subrede para subrede custos de compressão mínimos.

Por exemplo, em relação à Fig. 4.1, fixada a pressão de referência no nó 1, irão se encontrar a pressão no nó 2 e a vazão no arco (1,2). A pressão do nó 2 será pressão de sucção para a EsC 1, (2,9), que deverá processar com custo mínimo a vazão v_1 , para o qual deverá encontrar-se a pressão (ótima) do nó 9. Sequencialmente, com esta informação irão se encontrar as pressões dos nós 10 a 12 e as vazões dos arcos respectivos. Note que a pressão no nó 10 constituísse em pressão de descarga para o processamento de v_2 na EsC 2 e a pressão no nó 12 em pressão de sucção para processamento de v_3 na EsC 3 (ambas deverão ser processadas ao mínimo custo; i.e., encontrar-se-ão as pressões ótimas 8 e 13 que gerem custo mínimo de processamento nas respectivas EsC).

Continuando desta maneira, e supondo que se consegue percorrer a rede toda, ter-se-ia um vetor de vazões nos dutos, pressões nos nós, e vazões nas estações (u, p, v), com um custo associado, para funcionamento da rede. Ir-se-ia, em continuação, escolher outro vetor v , de forma a tentar melhorar o custo e assim, sucessivamente. Caso não se consigam as pressões p e/ou vazões nos dutos u para um dado vetor v , este se descarta como não viável para a rede e se procederá à escolha de outro vetor.

Portanto, são necessários vários procedimentos para compor os algoritmos centrais. Estes se diferenciam na forma de escolha do vetor v , para a que existem várias estratégias. Aqui, devido à experiência dos autores citados, se usam técnicas GRASP e Busca Tabu, para comparação.

São dois os algoritmos básicos: Algoritmo 1, para cálculo de custos de compressão, o qual, fixada a vazão v_i numa EsC e dada uma das pressões envolvidas para compressão (já seja a pressão de sucção p_s ou a de descarga p_d), otimiza o processo, calculando a outra pressão de forma a obter o custo mínimo de compressão e a distribuição da vazão v_i entre os compressores operados conforme Paula *et al.* (2011); Algoritmo 2, para cálculo de vazões e pressões numa subrede, o qual, fixado um vetor v de vazões nas EsC, calcula o vetor (p, u) de pressões nos nós e vazões nos dutos de qualquer subrede da rede, de forma a atender as demandas operacionais de gás estabelecidas no gasoduto, a partir de um nó de referência e de uma pressão de referência da subrede (CHRISTO *et al.*, 2009). Estes algoritmos serão apresentados a frente.

O uso combinado dos Algoritmos 1 e 2 permite construir os algoritmos de busca principais. A estratégia consiste em definir uma sequência de percurso da rede, a partir de uma primeira subrede (Subrede1). Usando o Algoritmo 2 na subrede atual, determinam-se as pressões e vazões nela, determinando pressões de sucção e/ou de descarga para EsC incidentes a esta. Usando o Algoritmo 1, encontram-se as pressões ótimas de passagem para as redes vizinhas e, seguindo a sequência de percurso das subredes estabelecida, busca-se percorrer a rede toda, definindo em cada passagem por uma EsC um custo ótimo de compressão. Assim sendo, caso se encontre o vetor (p, u, v) associado à rede toda, este resulta um ponto viável de operação da rede e tem um custo associado.

A Subrede 1 e o primeiro nó de referência a serem considerados correspondem a qualquer subrede que possua ao menos um nó de sucção (para outra subrede) e qualquer nó de injeção dela, que não corresponda a sucção ou descarga na rede. Considera-se, de forma gulosa, como *pressão de referência* (p_{REF}), o limite superior de pressão do nó de referência. Se não for possível escoar o gás pelos dutos da subrede, decresce-se p_{REF} , adequadamente, até que se atinja o vetor viável *mais guloso* (p_M, u) para a subrede. Adicionalmente, encontra-se o vetor viável *menos guloso* (p_m, u) , trabalhando com p_{REF} como o limite inferior de pressão do nó de referência (se não for possível escoar o gás pelos dutos com esse valor de p_{REF} , aumenta-se adequadamente p_{REF} até se atingir viabilidade). Dessa forma, conseguem-se

limites operacionais de pressão (p_m, p_M) para todos os nós da subrede, correspondentes às pressões menos e mais gulosas, respectivamente.

Como mencionado, desta forma se atingem subredes incidentes, através das EsC, já seja por meio de uma pressão de descarga ou de sucção. Para o caso da rede descrita na Figura 4.1, por exemplo, parte-se da subrede de nós 1 e 2, com nó de referência 1, encontram-se pressões e vazões desta subrede (pelo Algoritmo 2), onde a única subrede incidente é a de nós 9 a 12, através do nó de sucção 2. Usando o Algoritmo 1, encontra-se p_9 e passa-se para essa subrede, encontrando as pressões e vazões respectivas. Já nesta segunda subrede existem duas subredes incidentes: a que corresponde aos nós 3 a 8, através do nó de descarga 10, e a de nós 13 a 20, através do nó de sucção 12.

No primeiro algoritmo, Paula *et al.* (2011) realizam a operação de comprimir, com custo mínimo, a vazão correspondente a uma EsCG, desde que se conheça uma das duas pressões associadas; i.e., dada a vazão v_i para a EsCG i e uma das pressões p_s ou p_d associadas, otimiza-se a compressão minimizando seu custo e determinando a outra pressão. Note que este processo de otimização pode ser realizado tanto para a pressão mais gulosa como a menos gulosa do nó correspondente. Gerando, assim, um intervalo de operação para a pressão de saída (descarga ou sucção), um limite *mais guloso* e outro *menos guloso*; i.e., $[p_d^L, p_d^U]$, se a saída for descarga, ou $[p_s^L, p_s^U]$, se a saída for sucção (onde o superíndice U denota o limite de pressão mais guloso e superíndice L o menos guloso).

É importante indicar que dada uma subrede, esta pode apresentar ciclos ou não (por exemplo, em relação à Fig. 4.1, a subrede formada pelos nós 3 a 8 não possui ciclos, já a subrede formada pelos nós 25 a 48 possui dois ciclos). Essa característica gera um comportamento substancialmente diferente quanto a distribuição de pressões e vazões na subrede, como mostrado por Rios-Mercado *et al.* (2002): quando a subrede é acíclica a distribuição de pressões e vazões (p, u) é única; já no caso de redes cíclicas existem infinitas soluções (p, u) . Os algoritmos aqui desenvolvidos funcionam tanto para subredes acíclicas como cíclicas.

4.1 Determinação da viabilidade e custo de compressão de (v, p_s, p_d) numa EsCG

Apresentam-se aqui o algoritmo para determinação do custo de compressão de (v, p_s, p_d) numa EsCG, Algoritmo 1, e o algoritmo para distribuição de pressões e vazões numa subrede, Algoritmo 2.

O Algoritmo 1, que determina o custo de compressão para uma EsCG, faz uso do Algoritmo 0.1, o qual determina principalmente se um dado vetor (v, p_s, p_d) é viável para compressão. O Algoritmo 0.1 funciona da seguinte maneira: dados (v, p_s) ou (v, p_d) , determina $p_d \in [p_d^L, p_d^U]$, respectivamente $p_s \in [p_s^L, p_s^U]$, de forma que (v, p_s, p_d) seja viável para o compressor (ver Fig. 3.16 e Fig. 3.17). Note que em ambos os casos se tem a pressão ótima de compressão (a de menor custo): p_d^L e p_s^U , respectivamente.

Algoritmo 0.1 Viabilidade de (v, p_s, p_d) para um compressor

Passo 1. (Dados de entrada da EsC)

Fornecer as características do compressor: coeficientes das relações (3.1)–(3.4), vazão v a ser comprimida, pressão de sucção p_s (ou pressão de descarga p_d) a ser usada, limites $[p_s^L, p_s^U]$ e $[p_d^L, p_d^U]$ das pressões de descarga e sucção a serem considerados, etc.

Passo 2. Se $p_s \notin [p_s^L, p_s^U]$ (ou $p_d \notin [p_d^L, p_d^U]$), Parar! O ponto (v, p_s, p_d) não é viável para o compressor. Caso contrário, continuar.

Passo 3. Se p_s for dado, ir ao Passo 3.1; caso contrário, se p_d for dado, ir ao Passo 3.2.

Passo 3.1 Em função das relações (3.1)–(3.10), determinar se:

$$V^L \leq \left(\frac{v}{p_s}\right) \leq V^U$$

Caso positivo, ir ao Passo 4; caso contrário, Parar! (v, p_s, p_d) não é viável para nenhum p_d (ou para nenhum p_s).

Passo 3.2 Em função das relações (3.1)–(3.8), das funções $H^L(Q)$ e $H^U(Q)$ (limites inferior e superior de H em função de Q , para S fixo) e (3.10)–(3.11), determinar se:

$$G^L\left(\frac{v}{p_s}\right) \leq \frac{v}{p_d} \leq G^U\left(\frac{v}{p_s}\right)$$

Caso positivo, ir ao Passo 4; caso contrário, Parar! (v, p_d) não pode ser comprimido para nenhum p_s .

Passo 4. Se p_s for dado, em função as relações (3.1)–(3.11), determinar (como na Fig. 3.16):

$$\bar{p}_d^L = \frac{v}{G^U\left(\frac{v}{p_s}\right)} \text{ e } \bar{p}_d^U = \frac{v}{G^L\left(\frac{v}{p_s}\right)}$$

(v, p_s, p_d) é viável para $p_d \in [\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$.

Se p_d for dado, em função as relações (3.1)-(3.11), determinar (como na Fig. 3.17):

$$\bar{p}_s^L = \frac{v}{v^U} \text{ e } \bar{p}_s^U = \frac{v}{v^L}$$

(v, p_s, p_d) é viável para $p_s \in [\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$.

Algoritmo 1. Viabilidade de (v, p_s, p_d) para uma EsCG e custo de compressão

Passo 1. (Dados de entrada da EsCG)

Fornecer as características da EsC: K , número total de compressores; *Tipo-de-compressor*, diferentes tipos de compressor na estação; *Tipo*, número de compressores de cada tipo (*Tipo1*, ..., *TipoK*) e características dos mesmos; vazão v a ser comprimida, pressão de sucção p_s (ou pressão de descarga p_d) a ser operada, limites $[p_s^L, p_s^U]$ e $[p_d^L, p_d^U]$ das pressões de descarga e sucção a serem considerados, etc. Fazer $Custo_{Estação} = \infty$.

Passo 2. Se $p_s \notin [p_s^L, p_s^U]$ (respectivamente, $p_d \notin [p_d^L, p_d^U]$), Parar! O ponto (v, p_s, p_d) não é viável para a estação para nenhum p_d (respectivamente, para nenhum p_s). Caso contrário, continuar.

Passo 3. Estabelecer o conjunto de partições discretas da vazão v entre os diferentes tipos de compressores e definir uma lista L de possíveis distribuições de $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_K})$, a serem testadas; e, definir a lista $L_{viáveis} := \emptyset$ (ver Paula *et al.* (2011) para detalhes).

Passo 4.

Enquanto $L: \neq \emptyset$, escolher $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_K}) \in L$, verificar se $((v_{i_1}, \dots, v_{i_K}), p_s, p_d) \in D_{Estação}$ e, caso positivo, calcular o custo guloso de compressão:

Usando o Algoritmo 0.1, para cada $v_j = \frac{v_{i_j}}{Tipo_j}, j = 1, \dots, K$, determinar se existem os limites de pressão viável e os custos associados a p_s (ou p_d): $[\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (ou $[\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$).

Caso positivo, de acordo com (3.35), $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_K}) \in D_{Estação}$;

$$\text{Fazer } Custo_{Atual} := \sum_{j=1}^K Tipo_j \times g_{i_k}^{unit}(v_j, p_s, \bar{p}_d^L)$$

$$(\text{respectivamente, } Custo_{Atual} := \sum_{j=1}^K Tipo_j \times g_{i_k}^{unit}(v_j, \bar{p}_s^U, p_d))$$

Se $Custo_{Atual} < Custo_{Estação}$, fazer $Custo_{Estação} := Custo_{Atual}$;

Fazer $L_{viáveis} := L_{viáveis} \cup \{(v_1, \dots, v_k)\}$ e $L := L \setminus \{(v_1, \dots, v_k)\}$;

Caso negativo, $v = (v_{i_1}, \dots, v_{i_K}) \notin D_{Estação}$, continuar.

Fim do Enquanto.

Passo 5. Se $L_{viáveis} \neq \emptyset$, então $(v, p_s, p_d), p_d \in [\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (respectivamente, $p_s \in [\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$) é viável para estação; caso contrário (v, p_s, p_d) não é viável para estação para nenhum p_d (respectivamente, para nenhum p_s). O custo de compressão guloso é $Custo_{Estação}$.

Algoritmo 2. Cálculo de distribuição da pressão p e vazão u na subrede n_{SR}

Passo 1. (Entrada de Dados)

Fixar o vetor v na rede do gasoduto, conforme (2.8). Fornecer os dados de entrada da subrede n_{SR} do gasoduto: $A_i; A_m; [p_{n_{SR}}^L, p_{n_{SR}}^U]; t_i$, para todo duto i ; s_j , para todo nó j ; características do gás, etc.

Passo 2. (Cálculo guloso da distribuição das pressões e vazões na subrede)

- Fixar a pressão de referência p_{REF} como o limite superior permitido para o respectivo nó (gulosamente!).
- Determinar a distribuição das pressões e vazões $(u^{n_{SR}}, p)$ na subrede atual conforme as equações de balanço de massas e a dinâmica de pressões nos dutos, de acordo com o sistema (2.7).
- Se $p \in [p_{n_{SR}}^L, p_{n_{SR}}^U]$, fazer $p_{n_{SR}}^M = p$, o vetor $(u^{n_{SR}}, p_{n_{SR}}^M)$ é viável para a Subrede n_{SR} ; caso contrário, não é viável. Se o vetor for viável para a Subrede n_{SR} , ir para o Passo 3; caso contrário decrescer adequadamente o valor de p_{REF} , para conseguir a maior $p < p_{n_{SR}}^U$ de forma a que $(u^{n_{SR}}, p_{n_{SR}}^M)$ seja viável para a Subrede n_{SR} . Continuar (caso $(u^{n_{SR}}, p)$ seja inviável para todo $p \in [p_{n_{SR}}^L, p_{n_{SR}}^U]$, PARAR; o problema não tem solução).

Passo 3. (Cálculo da p_{REF} menos gulosa para escoar vazões na subrede e determinação do intervalo de pressões viáveis – intervalo de viabilidade operacional da subrede)

- Fixar a pressão de referência p_{REF} como o limite inferior permitido para o nó de referência na subrede n_{SR} .
- Determinar a distribuição das pressões e vazões $(u^{n_{SR}}, p)$ na subrede atual conforme as equações de balanço de massas e a dinâmica de pressões nos dutos, de acordo com o sistema (2.7).
- Se $p \in [p_{n_{SR}}^L, p_{n_{SR}}^U]$, fazer $p_{n_{SR}}^m = p$, o vetor $(u^{n_{SR}}, p_{n_{SR}}^m)$ é viável para a Subrede n_{SR} ; caso contrário, não é viável. Se o vetor for viável para a Subrede n_{SR} , continuar; caso contrário crescer adequadamente o valor de p_{REF} , para conseguir encontrar o menor valor de $p > p_{n_{SR}}^L$, tal que $(u^{n_{SR}}, p_{n_{SR}}^m)$ seja viável para a Subrede n_{SR} .

- O intervalo $[p_{n_{SR}}^m, p_{n_{SR}}^M]$ é o intervalo de viabilidade operacional da subrede, sendo $p_{n_{SR}}^M$ a pressão de operação mais gulosa.

4.2 Metaheurística GRASP (*GREEDY RANDOMIZED ADAPTIVE SEARCH PROCEDURE*)

Feo e Resende (1995) desenvolveram a heurística GRASP na década de 80 (sigla em inglês para Procedimento de Busca Adaptativa Aleatória Gulosa) sendo este um método de múltiplos reinícios, onde as soluções iniciais são posteriormente melhoradas através de um algoritmo de busca local.

O GRASP é um método iterativo probabilístico que a cada iteração consiste de dois estágios:

- Na construção de uma solução aleatória onde uma solução viável é preparada elemento por elemento;
- Seguida de uma busca local usando a solução construída como o ponto inicial de busca local, explorando a sua vizinhança até que um ótimo local seja alcançado.

Este procedimento se repete várias vezes até o número máximo de iterações, critério de parada usual, e a melhor solução encontrada sobre todas as iterações GRASP se devolve como a solução aproximada.

A cada iteração da fase construtiva, uma função gulosa avalia o conjunto de elementos candidatos a serem incorporados na solução parcial. A partir desta avaliação constrói-se o conjunto Lista Restrita de Candidatos (LRC) e um dos candidatos é escolhido probabilisticamente. Um parâmetro α controla o nível de *gulosidade* e aleatoriedade do procedimento de construção, sendo função adaptativa gulosa é dada por $g: C \rightarrow \mathfrak{R}$ onde:

- $\alpha = 0$ gera soluções puramente gulosas
- $\alpha = 1$ gera soluções aleatórias em sua totalidade

O procedimento de construção interfere na busca local. O GRASP procura unir procedimentos aleatórios de construção de solução a bons aspectos dos algoritmos puramente gulosos.

4.2.1 Lista restrita de candidatos (LCR) e busca local

O parâmetro α determina o tamanho da Lista Restrita de Candidatos, ele é praticamente o único parâmetro a ser ajustado. Valores de α que geram uma lista restrita de tamanho muito limitado (α próximo da escolha gulosa) implicam em soluções pouco diversificadas e, valores de α próximos da seleção puramente aleatória geram uma grande diversidade de soluções, mas com qualidade inferior tornando o processo lento.

A seleção das soluções na LCR é feita de forma probabilística, pode-se adotar uma distribuição uniforme ou não. A ordem de prioridade pode ser baseada numa relação *rank* $r(\sigma)$, atribuído a cada elemento, ordenando do melhor (menor *rank*) para o pior (maior *rank*). As soluções iniciais obtidas na fase de construção do GRASP (que não são as soluções procuradas) são submetidas a uma busca local, a qual objetiva melhorar a solução construída.

4.2.2 Metaheurística GRASP para resolução do problema

Para a construção da metaheurística GRASP, irão ser detalhados seus passos. Inicialmente será descrito a construção da solução e da lista de candidatos e sua hierarquização, para posteriormente descrever a busca local e o critério de parada.

Para a construção do algoritmo, é necessário trabalhar com o conceito de rede reduzida associada a um gasoduto (Figura 4.2). Para gerar a lista de candidatos restrita, tem-se o seguinte resultado: quando a rede reduzida é acíclica (i.e., uma árvore) existe uma única possível forma de distribuir o vetor v entre os compressores (essa única forma é obtida da solução do sistema $Av = s$, onde A é a matriz de incidência do grafo que corresponde à rede reduzida - dado que, neste caso o grafo é uma árvore, o sistema tem solução única). Já quando a rede reduzida possui ciclos, existem infinitas soluções v para o sistema $Av = s$ (CHRISTO, 2008).

Sendo determinada a solução v do sistema $Av = s$, tal solução determinará uma distribuição de vazões mássica u_h para cada subrede h da rede reduzida. Assim, para um vetor v de vazões mássicas nos compressores, determina-se um vetor $u^T = (u_1^T, \dots, u_r^T)$ de distribuição de vazão mássica no interior de cada subrede $h = 1, \dots, r$ (RODRIGUES, 2010).

Assim, o vetor (v^T, u^T) satisfaz o sistema $A_l u + A_m v = s$, sendo respectivamente, A_l e A_m as matrizes de incidência nó-duto e de incidência estação-duto da rede original. A partir

disto, tendo uma distribuição de vazões mássicas na rede, determina-se a existência de um vetor de pressões p que permite escoar essas vazões pela rede. Obtendo-se assim, uma solução viável (v^T, u^T, p^T) que atenda as demandas de cada sub-rede.

Como exemplo, seja a rede da Figura 4.1 e sua respectiva rede reduzida (Figura 4.2). É possível observar que, as sub-redes S4, S5, S6, S7 e S8, constituem um ciclo. O vetor v é composto por oito componentes $v = (v_1, \dots, v_8)$, sendo v_i a vazão mássica na Estação de compressão $i=1, \dots, 8$. Tem-se que, ainda, para cada par de vazões mássicas (v_4, v_6) , o vetor v fica completamente definido. Logo, fixando-se cada par (v_4, v_6) que satisfaz $Av = s$, é determinado o vetor $v = (v_1, \dots, v_8)$.

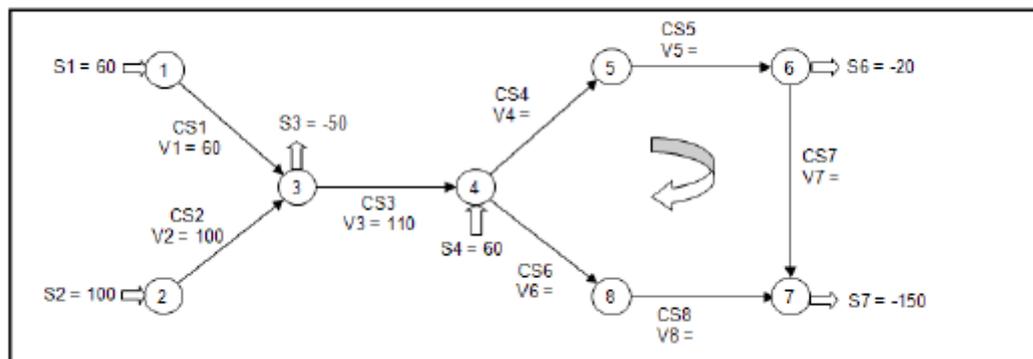


Figura 4.2 - Rede reduzida da Figura 4.1 (Fonte: Azeredo (2008))

Assim, a estratégia para construir a lista de candidatos restrita é elaborar todos os possíveis pares (v_4, v_6) que satisfazem $Av = s$. No caso cíclico existem infinitas possibilidades. Para tanto, será discretizado o par (v_4, v_6) , obtendo-se um número finito deste. Sendo definido isto, é associado um custo a cada variação do par (v_4, v_6) considerando a mesma pressão de sucção e qualquer pressão de descarga, de forma que se possa formar uma lista de candidatos hierarquizada crescente a partir do mencionado. Posteriormente, usando o parâmetro α que controla o nível de gulosidade e aleatoriedade do procedimento de construção do GRASP, pode-se montar a lista de candidatos restrita, onde se escolherão os candidatos da fase de construção do GRASP.

Escolhendo-se um par (v_4, v_6) , da Lista de candidatos restrita (LCR), se determina os vetores $v = (v_1, \dots, v_8)$, se distribuem as vazões $u^T = (u_1^T, \dots, u_r^T)$ e busca-se a distribuição das pressões p a partir da subrede de referência. Diferente dos trabalhos propostos por Azeredo

(2008), Jubini (2008) e Christo (2008), que pesquisam esse tipo de problema, iniciando com a subrede da direita (a última, SG7) como a subrede de referência e o respectivo nó de referência como sendo o último, o nó 47, neste trabalho, baseado no fato de que a função de custo do combustível tipicamente decresce com o aumento da pressão de sucção (Wu *et al.* 2000), escolhe-se como nó de referência o nó 2 da subrede 1.

A partir da pressão de referência, tem-se a vazão mássica da estação e a pressão de descarga (ou sucção), onde se pode tentar procurar uma pressão de descarga (ou sucção) que permita comprimir a respectiva vazão com as pressões especificadas.

Sendo que estas pressões existam, dentro dos limites pré-definidos, o vetor (v^T, u^T) estará viabilizado, construindo-se, portanto a solução (v^T, u^T, p^T) . Caso contrário o vetor de vazões (v^T, u^T) não será escoado. Determinando-se (v^T, u^T, p^T) , encontra-se simultaneamente o menor custo para comprimir $v = (v_1, \dots, v_8)$ e as respectivas configurações de compressores das estações.

Definindo-se o ponto (v^T, u^T, p^T) e seu custo, passa-se a busca local, que consiste em variar o vetor $v = (v_1, \dots, v_8)$, considerando para tal, as seguintes variações de v_4 : $\hat{v}_4 = (v_4 + \Delta)$ e $\tilde{v}_4 = (v_4 - \Delta)$, para gerar os vizinhos associados $\hat{v} = (\hat{v}_1, \dots, \hat{v}_8)$ e $\tilde{v} = (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_8)$. Para a geração dos vizinhos, somente será considerado o vetor v_4 pois este define os demais vetores nas topologias acíclicas e cíclicas a partir do sistema $Av = s$.

Posteriormente, determinam-se as distribuições de vazão $\hat{u}^T = (\hat{u}_1^T, \dots, \hat{u}_r^T)$ e $\tilde{u}^T = (\tilde{u}_1^T, \dots, \tilde{u}_r^T)$ como também os vetores de pressão de forma a encontrar os vizinhos viáveis $(\hat{v}^T, \hat{u}^T, \hat{p}^T)$ e $(\tilde{v}^T, \tilde{u}^T, \tilde{p}^T)$, de maneira que possuam as mesmas configurações dos compressores.

Logo, têm-se três pontos viáveis e seus respectivos custos, então, considera-se a solução de menor custo e volta-se a lista de candidatos restrita, para a construção de uma nova solução aleatória. O critério de parada considerado consiste em atingir o número máximo de iterações definidos pelo parâmetro α . Diferente de Cristo *et al.* (2009), neste trabalho faz-se uma modificação do Algoritmo GRASP, introduzindo-se um refinamento da melhor busca obtida. Assim, quando uma solução ótima final é gerada, é reiniciado a busca a partir de uma discretização refinada do melhor par (v_4, v_6) obtido. A discretização refinada permite uma melhor busca em torno do par ótimo até então gerado, para determinar, se possivelmente, um outro par de vetores melhores, que otimize o custo do transporte na rede do gasoduto.

Para o algoritmo GRASP, foram realizadas implementações em cinco casos existentes da literatura (Borraz-Sánchez (2009) e Wu *et al.* (2000)), sendo que, para a geração de vizinhos a partir do melhor vetor v_4 obtido nas buscas, foi considerado o passo $\Delta=1$ (Tabelas A.1, A.3, A.5, A.7) e três implementações com sete testes de cinco passos (Δ), sendo que $1 \leq \Delta \leq 5$, $\Delta \in \mathbb{N}$ (Tabelas A.11, A.12 e A.13). As Tabelas mencionadas seguem no Anexo A.

Para os algoritmos GRASP e Busca Tabu, considerou-se EsC compostas por dois tipos de compressores, três Tipo A e dois do Tipo B. Segue abaixo o pseudocódigo GRASP.

Algoritmo 3. Metaheurística GRASP - Minimização do custo em um gasoduto

Passo 1. (Entrada de Dados)

Matrizes de incidência do gasoduto, A_l e A_m , respectivamente; características dos dutos e limites de pressão nos nós, $[p_s^L, p_s^U]$; características das estações de compressão: número de compressores, tipos de compressores e características de cada tipo de compressor; número de subredes, S , e uma sequência de percurso de todas as subredes da rede, $SR := \{1, 2, \dots, S\}$. Incluir os dados necessários para rodar os Algoritmos 1 e 2 e um parâmetro $\alpha \in (0, 1)$ para determinação da lista de candidatos restrita com que os algoritmos GRASP trabalham. Fazer $Custo = \infty$

Passo 2. (Pré-processamento do gasoduto e definição da lista de candidatos restrita para o GRASP)

- Montar a rede reduzida do gasoduto e determinar um conjunto $L_{Candidatos} := \{v^1, v^2, \dots, v^{Lis}\}$ de soluções discretas v , conforme (2.8), de maneira que se $v^k, v^{k+1} \in L_{Candidatos}$, então $\|v^k - v^{k+1}\| = \max_{1 \leq i \leq m} |v_i^k - v_i^{k+1}| = Discret$ e $\|v^k\| < \|v^{k+1}\|$, onde $Discret$ é um parâmetro para o tamanho da discretização.
- Ordenação inicial de $L_{Candidatos}$: usando o Algoritmo 1, ordenar de forma crescente o conjunto $L_{Candidatos}$ em função do custo de compressão das vazões v_i^k , numa EsCG i , para a qual $v_i^{k+1} = v_i^k + Discret$; i.e.; encontram-se (p_s^k, p_d^k) e $g_i(v_i^k, p_s^k, p_d^k)$, $1 \leq i \leq m$, ordenando $L_{Candidatos}$ de forma crescente. (Os vetores v^k para os quais não seja possível encontrar as pressões (p_s^k, p_d^k) , necessárias para a compressão, declaram-se inviáveis e retiram-se da lista $L_{Candidatos}$).
- Definir o custo total de compressão para cada vetor $v^k \in L_{Candidatos}$ como:

$$g(v^k, p_s, p_d) := \sum_{i=1}^m g_i(v_i^k, p_s^k, p_d^k).$$

- A partir do parâmetro $\alpha \in (0,1)$, definir o conjunto lista de candidatos restrita para o GRASP, $L_{Restrita}$, como os $\alpha\%$ primeiros elementos do conjunto $L_{Candidatos}$.

Passo 3. (Construção de uma solução viável)

Enquanto $L_{Restrita} \neq \emptyset$

Escolher aleatoriamente $v \in L_{Restrita}$;

Fazer $Custo_{processamento} := 0$;

Fazer $n_{SR} := 1$;

Enquanto $n_{SR} \leq S$

Aplicar o Algoritmo 2 à subrede n_{SR} para determinar o vetor $(u^{n_{SR}}, p^{n_{SR}})$ viável para a subrede atual, com $p^{n_{SR}} \in [p_{n_{SR}}^m, p_{n_{SR}}^M]$, intervalo de pressões viáveis (lembrar que $p_{n_{SR}}^M$ é a pressão mais gulosa em termos da pressão);

Usando os nós de incidência entre a subredes n_{SR} e $n_{SR} + 1$ e as respectivas componentes de v e $p_{n_{SR}}^M$, aplicar o Algoritmo 1 à correspondente EsCG, para encontrar a $[\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (respectivamente, $[\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$) intervalo de pressões viáveis no nó incidente da subrede $n_{SR} + 1$ que determina o custo de compressão guloso ótimo, $Custo_{Estação\ n_{SR}}$, entre as duas subredes para \bar{p}_d^L (respectivamente, \bar{p}_s^U).

Fazer $p_{REF}^{n_{SR}+1} := \bar{p}_d^L$ (respectivamente, $p_{REF}^{n_{SR}+1} := \bar{p}_s^U$).

Caso não exista $[\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (respectivamente, $[\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$), diminuir a componente de $p_{n_{SR}}^M$ de forma até permitir a compressão da componente de v na correspondente EsCG.

Se $Custo_{Estação\ n_{SR}} < \infty$

Fazer

$Custo_{processamento} := Custo_{processamento} + Custo_{Estação\ n_{SR}}$;

Fazer $n_{SR} := n_{SR} + 1$;

C.c.,

Fazer $n_{SR} := S$; (v não é viável!)

$Custo_{processamento} := \infty$;

Fim do Enquanto $n_{SR} \leq S$

Se $Custo_{processamento} < Custo$

Fazer $Custo := Custo_{processamento}$;

Fazer $(u^*, p^*, v^*) := (u^1, \dots, u^S, p_1^M, \dots, p_S^M, v)$ (solução atual!)

Se $Custo < \infty$

(u^*, p^*, v^*) é a melhor solução viável atual para o gasoduto, com custo de transporte determinado por $Custo$;

C.c.,

Não existe solução viável para $v \in L_{Restrita}$;

$L_{Restrita} := L_{Restrita} \setminus \{v\}$;

Passo 4. (Busca local no ponto (u^*, p^*, v^*))

Se $Custo < \infty$ (Procura-se melhorar (u^*, p^*, v^*) numa vizinhança!)

Construir uma vizinhança discreta Viz de (u^*, p^*, v^*) considerando variações das componentes de v^* , de tamanho de passo Δ com as configurações dos compressores determinadas no Passo 3 fixas e calcular os respectivos custos dos pontos vizinhos: $g(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz})$, para cada $(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz}) \in Viz$;

Fazer $g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p}) := \min_{(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz}) \in Viz} \{g(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz})\}$;

Se $g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p}) < Custo$

Fazer $Custo := g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p})$;

Fazer $(u^*, p^*, v^*) := \operatorname{argmin} g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p})$;

Fim do Enquanto $L_{Restrita} \neq \emptyset$ (Voltar ao Passo 3!)

Passo 5. (Refinamento da busca: Busca de melhores soluções a partir de vizinhanças mais refinadas para a solução atual, (u^*, p^*, v^*))

Se $Custo < \infty$

Mantendo fixas as configurações dos compressores obtidas para (u^*, p^*, v^*) , gerar vizinhanças desse ponto, sendo que ao reiniciar a discretização considerar $DiscretRefin := Discret/5$, a fim de tentar encontrar um (u^*, p^{**}, v^*) tal que:

$$g((u^*, p^{**}, v^*)) < g((u^*, p^*, v^*)).$$

Se encontrado tal ponto, a melhor solução encontrada e o custo associado são:

$(u^*, p^*, v^*) := (u^*, p^{**}, v^*)$ e $Custo := g(u^*, p^*, v^*)$;

C.c.,

Não se encontrou solução para o problema dado.

Fim.

4.3 Metaheurística de Busca Tabu

A Busca Tabu foi desenvolvida por Glover (1986) e se tornou uma das mais difundidas metaheurísticas para a resolução de problemas de otimização combinatória. O autor formalizou esta técnica e publicou uma série de trabalhos contendo diversas aplicações da mesma. A experiência tem mostrado a eficiência do procedimento de Busca Tabu na resolução de vários problemas de diferentes naturezas (GLOVER; LAGUNA, 1993) e atualmente pode-se afirmar que se trata de uma técnica definitivamente consolidada (SUBRAMANIAN *et al.*, 2011).

A Busca Tabu é um procedimento iterativo que aceita movimentos de piora para tentar escapar de ótimos locais distantes de um ótimo global (MARINHO *et al.*, 2004). O algoritmo usa exploração sensível e memória adaptativa para guiar um procedimento de busca em vizinhança no processo de solução. Através da exploração sensível, determina-se uma direção de busca baseada em propriedades da solução corrente e da história da busca (MANSANO, 2008).

De acordo com Marinho *et al.* (2004), a Busca Tabu começa a partir de uma solução inicial s_0 . A heurística então explora a cada iteração, um subconjunto V da vizinhança $N(s)$ da solução atual s . O membro s' de V com melhor valor nessa região segundo a função $f(\cdot)$, torna-se a nova solução atual mesmo que s' seja pior que s , isto é, que $f(s') > f(s)$ (sendo este um problema de minimização). Entretanto, a melhor solução gerada até o momento, s^* é sempre armazenada. O critério de escolha do melhor vizinho é utilizado para escapar de um ótimo local.

Esta estratégia pode fazer com que o algoritmo entre em um processo de ciclagem. Um exemplo de ciclagem ocorre quando um ótimo local é atingido. Nesse caso, a Busca Tabu se moverá, então, para seu melhor vizinho, o qual possui uma solução de pior qualidade. Quando este melhor vizinho se tornar a solução atual e a Busca Tabu vasculha a vizinhança a partir do mesmo, o novo melhor vizinho será novamente o ótimo local encontrado na iteração anterior, conforme aponta Fraga *et al.* (2006). A Figura 4.3 mostra a ocorrência da ciclagem na Busca Tabu.

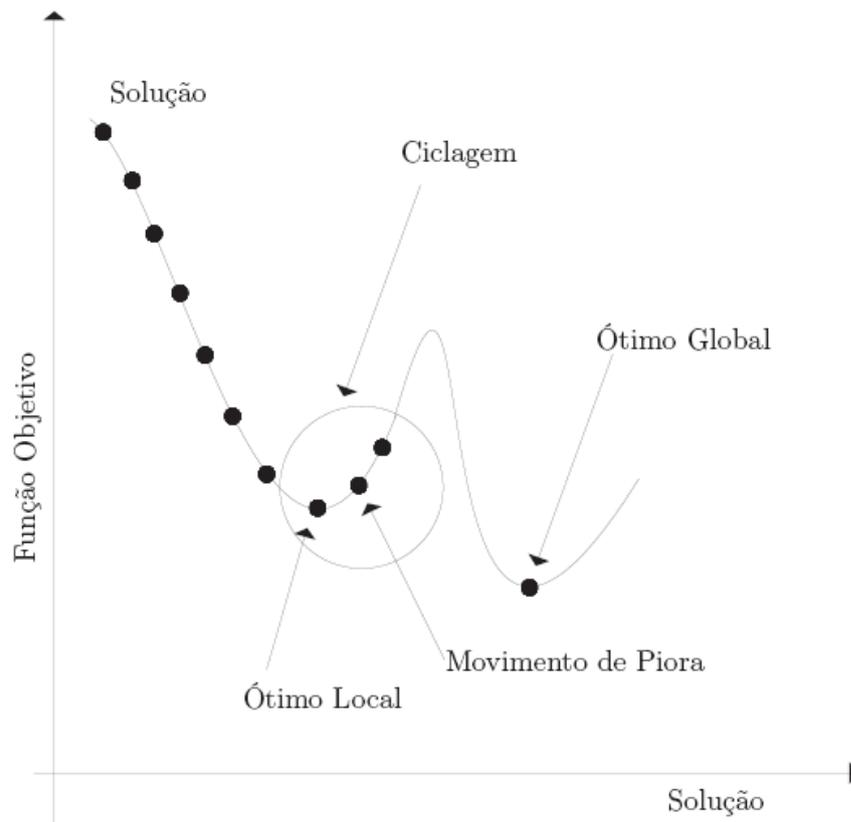


Figura 4.3 – Ciclagem na Busca Tabu (Fonte: FRAGA *et al.*, 2006).

Para evitar a ocorrência de ciclagem, utiliza-se memória adaptativa, que consiste de estruturas de memória de curto e longo prazo que armazenam a história da busca. Segundo Mansano (2008), a memória de curto prazo armazena atributos de soluções já visitadas no passado recente, sendo estes armazenados em uma lista tabu para impedir o retorno às soluções já visitadas. Estas soluções são armazenadas nesta lista e permanecem proibidas (com status tabu), por um dado número de iterações, chamado *tabu tenure* (MARINHO *et al.*, 2004). A lista tabu armazena estes movimentos efetuados na forma de fila, assim, quando a lista tabu atinge seu tamanho máximo (*tabu tenure*) e um novo movimento deve ser adicionado, exclui-se o mais antigo da lista. A memória de longo prazo contém uma história seletiva de soluções e seus atributos encontrados durante o processo de busca e é utilizada em estratégias de diversificação e intensificação (MANSANO, 2008) (neste trabalho utilizou-se a memória de curto prazo, empregando-se no algoritmo a lista tabu).

A lista tabu reduz o risco de ciclagem garantindo o não retorno a uma solução já visitada anteriormente, entretanto pode proibir movimentos para soluções que ainda não

foram visitadas. Para sanar tal impossibilidade gera-se a função de aspiração, que é um mecanismo que retira, sob certas circunstâncias, o status tabu de determinado movimento.

Como exemplifica MARINHO *et al.* (2004):

Para cada possível valor v da função objetivo existe um nível de aspiração $A(v)$: uma solução s' em V pode ser gerada se $f(s') < A(f(s))$, mesmo que o movimento m esteja na lista tabu. A função de aspiração A é tal que, para cada valor v da função objetivo, retorna outro valor $A(v)$, que representa o valor que o algoritmo aspira ao chegar de v . Um critério de aspiração comumente adotado o critério de aspiração por objetivo. Neste caso, aceita-se um movimento tabu somente se ele conduzir a um vizinho melhor que s^* . Por esse critério, uma solução s' se fundamenta no fato de que soluções melhores que a solução s^* atual, ainda que gerada por movimentos tabu, é aceita se $f(s')$ for melhor que $f(s^*)$ (sendo para um caso de minimização $f(s') < f(s^*)$).

Conforme Fraga *et al.* (2006), os critérios de parada mais comuns à Busca Tabu são:

- Número de iterações sem melhora: o processo para após certo número de iterações sem melhora;
- Tempo de processamento: o processo para após um tempo de processamento pré-determinado;
- Limite a atingir: o processo para quando um limite pré-definido é alcançado.

Os parâmetros principais de controle do método de Busca Tabu são: a cardinalidade $|T|$ da lista tabu; a função de aspiração A ; a cardinalidade do conjunto $|V|$ de soluções vizinhas testadas em cada iteração, a cardinalidade da busca a ser realizada $BTmax$ sendo este o número máximo de iterações sem melhora no valor da melhor solução conforme Marinho *et al.* (2004). A Figura 4.4 abaixo apresenta o algoritmo de Busca Tabu clássico.

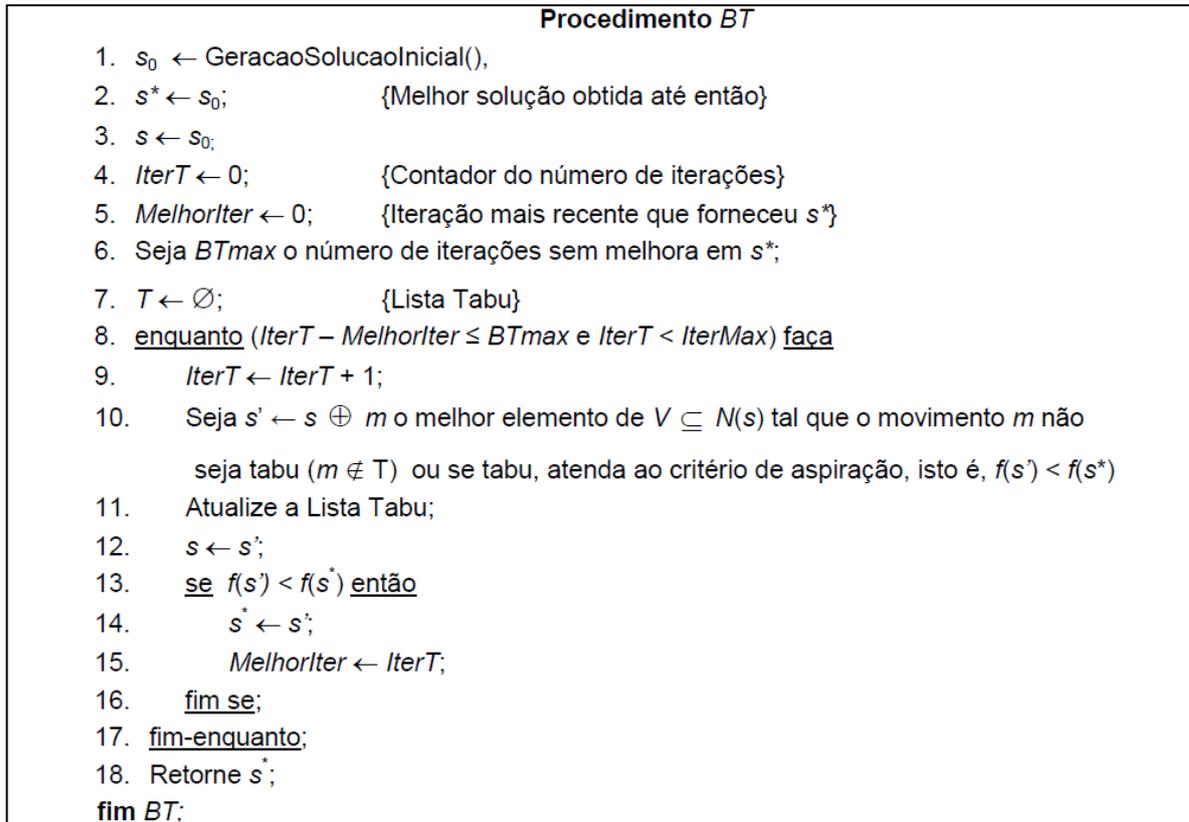


Figura 4.4 – Algoritmo clássico de Busca Tabu (Fonte: SUBRAMANIAN *et al.*, 2011).

Existem outros módulos na Busca Tabu que tem sido incorporados, mas que não fazem parte do escopo deste trabalho, que são: estratégias de intensificação e diversificação.

A Estratégia de intensificação abordado em Glover e Laguna (1997) tem por objetivo efetuar buscas mais refinadas em determinadas regiões consideradas promissoras do espaço de soluções, exemplificado algumas destas: reinício da BT com soluções elite; frequência das soluções elite; memória e intensificação e reconexão por caminhos (*path relinking*). A estratégia de diversificação, segundo Glover e Laguna (1997), que podem fazer uso de memórias de longo prazo redirecionam a pesquisa para regiões ainda não suficientemente exploradas do espaço de soluções. Algumas destas: frequência das soluções não-elite, Busca Tabu reativa, abordagens por *Ejection Chains*.

4.3.1 Metaheurística de Busca Tabu para a resolução do problema

A construção da heurística de Busca Tabu segue passos iniciais semelhantes à heurística GRASP, sendo o mesmo até a fase de construção da lista de candidatos restrita, conforme foi determinado no tópico 4.3.

Utilizando-se a rede da Figura 4.1 como exemplo, escolhe-se um ponto (v_4, v_6) , da lista de candidatos restrita (LCR). Determinam-se os vetores $v = (v_1, \dots, v_8)$ e a partir da pressão de referência, tem-se a vazão mássica da Estação e a pressão de descarga (ou sucção), onde se pode tentar procurar uma pressão de descarga (ou sucção) que permita comprimir a respectiva vazão com as pressões especificadas. Sendo que estas pressões existam, dentro dos limites pré-definidos, o vetor (v^T, u^T) , estará viabilizado, construindo-se, portanto a solução (v^T, u^T, p^T) . Caso contrário o vetor de vazões (v^T, u^T) não será escoado.

Ao encontrar (v^T, u^T, p^T) , encontra-se simultaneamente o menor custo para comprimir $v = (v_1, \dots, v_8)$, e as respectivas configurações de compressores das estações. Definindo-se o ponto (v^T, u^T, p^T) que seja viável para o gasoduto bem como seu custo, passa-se a busca local. Inicialmente, considera-se $g(v^T, u^T, p^T)$ a melhor solução obtida até o momento, e o vetor v_4 (que define os demais vetores) é colocado na lista Tabu, e portanto, sua solução não pode ser novamente gerada. O critério de Aspiração é ativado (sua função é retirar o *Status Tabu*, caso tal solução seja melhor que a solução atual).

Definindo-se o ponto (v^T, u^T, p^T) e seu custo, passa-se a busca local, que consiste em construir a vizinhança do vetor $v = (v_1, \dots, v_8)$, considerando as variações de v_4 , da seguinte forma: $(\tilde{v}_{4i}) = (v_4 - \Delta \times i)$ e $(\hat{v}_{4i}) = (v_4 + \Delta \times i)$, onde i gera os vizinhos relacionados a v_4 a partir dos passos (Δ) e N é o número total de vizinhos, sendo que $1 \leq i \leq N$, conforme a Tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.1 – Variações de intervalos i e dos passos Δ e dos vizinhos inferior e superior de v_4

Passo	Variações de i para $[\tilde{v}_{4i}; \hat{v}_{4i}]$	N (Número total de vizinhos)
$\Delta = 1$	$i = [1:10; 1:30]$	40
$\Delta = 2$	$i = [1:5; 1:15]$	20
$\Delta = 3$	$i = [1:4; 1:10]$	14
$\Delta = 4$	$i = [1:3; 1:8]$	11
$\Delta = 5$	$i = [1:2; 1:6]$	8

Fonte: Elaborado pelo autor

Os vizinhos associados a v_4 são descritos como: $\hat{v} = (\hat{v}_1, \dots, \hat{v}_8)$ e $\tilde{v} = (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_8)$. Para a geração dos vizinhos, somente será considerado o vetor v_4 pois, este define os demais vetores nas topologias acíclicas e cíclicas, obtidos pelo sistema $Av = s$.

Observa-se, que, o que varia para gerar os vizinhos são os passos, pois o tamanho da distancia do vetor v_4 para o último vizinho inferior e superior gerado é fixo, sendo estas distancias dez e trinta respectivamente.

Posteriormente, determinam-se as distribuições de vazão $\hat{u}^T = (\hat{u}_1^T, \dots, \hat{u}_r^T)$ e $\tilde{u}^T = (\tilde{u}_1^T, \dots, \tilde{u}_r^T)$ como também os vetores de pressão de forma a encontrar os vizinhos viáveis $(\hat{v}^T, \hat{u}^T, \hat{p}^T)$ e $(\tilde{v}^T, \tilde{u}^T, \tilde{p}^T)$, de maneira que possuam as mesmas configurações dos compressores. A partir dos vizinhos gerados, obtém-se todos os custos associados ao mesmo. Retira-se o melhor vizinho a partir de v_4 , mesmo que este seja pior que a solução inicial $g(v^T, u^T, p^T)$.

A partir disto, um novo vetor \bar{v}_4 é posto como a nova solução atual (sendo este o melhor obtido entre todos os vizinhos gerados), sendo este colocado na lista Tabu e atualizado o critério da Aspiração. Tal critério retira a solução escolhida do “Status Tabu” caso esta solução seja melhor que a solução atual. Assim, o procedimento novamente se repete, iniciando com a geração dos vizinhos de \bar{v}_4 . A busca Tabu finaliza-se quando o número máximo de soluções sem melhora da solução atual for atingida, sendo este determinado pelo parâmetro α . No final, a solução ótima da busca Tabu é apresentada. Com a mesma, uma nova busca é efetuada, sendo um refinamento desta solução efetuado pela discretização de (\bar{v}_4, \bar{v}_6) , sendo seu objetivo otimizar a melhor solução encontrada até então pelo procedimento.

Para o algoritmo Busca Tabu, foram realizadas implementações em cinco casos existentes na literatura (aplicados em casos de Borraz-Sánchez (2009) e Wu *et al.* (2000)), sendo que para a geração de vizinhos a partir do vetor melhor obtido v_4 obtido nas buscas foi considerado o passo $\Delta=1$ (Tabelas A.2, A.4, A.6 e A.8) e três implementações com sete testes de cinco passos (Δ), sendo que $1 \leq \Delta \leq 5$, $\Delta \in \mathbb{N}$ (Tabelas A.14, A.15 e A.16). As Tabelas seguem no Anexo A. Logo abaixo tem-se o pseudocódigo da Busca Tabu, para a solução do problema de transporte do combustível.

Algoritmo 4. Metaheurística Busca Tabu - Minimização do custo em um gasoduto

Passo 1. (Entrada de Dados)

Matrizes de incidência do gasoduto, A_l e A_m , respectivamente; características dos dutos e limites de pressão nos nós, $[p_s^L, p_s^U]$; características das estações de compressão: número de compressores, tipos de compressores e características de cada tipo de compressor; número de subredes, S , e uma sequência de percurso de todas as subredes da rede, $SR := \{1, 2, \dots, S\}$. Incluir os dados necessários para rodar os Algoritmos 1 e 2 e um parâmetro $\alpha \in (0, 1)$ para determinação da lista de candidatos restrita com que os algoritmos GRASP trabalham. Fazer $Custo = \infty$ e $solução_{viável} = falso$

Passo 2. (Pré-processamento do gasoduto e definição da lista de candidatos restrita para o GRASP)

- Montar a rede reduzida do gasoduto e determinar um conjunto $L_{Candidatos} := \{v^1, v^2, \dots, v^{Lis}\}$ de soluções discretas v , conforme (2.8), de maneira que se $v^k, v^{k+1} \in L_{Candidatos}$, então $\|v^k - v^{k+1}\| = \max_{1 \leq i \leq m} |v_i^k - v_i^{k+1}| = Discret$ e $\|v^k\| < \|v^{k+1}\|$, onde $Discret$ é um parâmetro para o tamanho da discretização.
- Ordenação inicial de $L_{Candidatos}$: usando o Algoritmo 1, ordenar de forma crescente o conjunto $L_{Candidatos}$ em função do custo de compressão das vazões v_i^k , numa EsCG i , para a qual $v_i^{k+1} = v_i^k + Discret$; i.e.; encontram-se (p_s^k, p_d^k) e $g_i(v_i^k, p_s^k, p_d^k)$, $1 \leq i \leq m$, ordenando $L_{Candidatos}$ de forma crescente. (Os vetores v^k para os quais não seja possível encontrar as pressões (p_s^k, p_d^k) , necessárias para a compressão, declaram-se inviáveis e retiram-se da lista $L_{Candidatos}$).
- Definir o custo total de compressão para cada vetor $v^k \in L_{Candidatos}$ como:

$$g(v^k, p_s, p_d) := \sum_{i=1}^m g_i(v_i^k, p_s^k, p_d^k).$$
- A partir do parâmetro $\alpha \in (0, 1)$, definir o conjunto lista de candidatos restrita para o GRASP, $L_{Restrita}$, como os $\alpha\%$ primeiros elementos do conjunto $L_{Candidatos}$.

Passo 3. (Construção de uma solução viável)

Enquanto $solução_{viável} = falso$

Escolher aleatoriamente $v \in L_{Restrita}$;

Fazer $Custo_{processamento} := 0$;

Fazer $n_{SR} := 1$;

Enquanto $n_{SR} \leq S$

Aplicar o Algoritmo 2 à subrede n_{SR} para determinar o vetor $(u^{n_{SR}}, p^{n_{SR}})$ viável para a subrede atual, com $p^{n_{SR}} \in [p_{n_{SR}}^m, p_{n_{SR}}^M]$,

intervalo de pressões viáveis (lembrar que $p_{n_{SR}}^M$ é a pressão mais gulosa em termos da pressão);

Usando os nós de incidência entre a subrede n_{SR} e $n_{SR} + 1$ e as respectivas componentes de v e $p_{n_{SR}}^M$, aplicar o Algoritmo 1 à correspondente EsCG, para encontrar a $[\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (respectivamente, $[\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$) intervalo de pressões viáveis no nó incidente da subrede $n_{SR} + 1$ que determina o custo de compressão guloso ótimo, $Custo_{Estação\ n_{SR}}$, entre as duas subredes para \bar{p}_d^L (respectivamente, \bar{p}_s^U). Fazer $p_{REF}^{n_{SR}+1} := \bar{p}_d^L$ (respectivamente, $p_{REF}^{n_{SR}+1} := \bar{p}_s^U$).

Caso não exista $[\bar{p}_d^L, \bar{p}_d^U]$ (respectivamente, $[\bar{p}_s^L, \bar{p}_s^U]$), diminuir a componente de $p_{n_{SR}}^M$ de forma até permitir a compressão da componente de v na correspondente EsCG.

Se $Custo_{Estação\ n_{SR}} < \infty$

Fazer

$$Custo_{processamento} := Custo_{processamento} + Custo_{Estação\ n_{SR}};$$

Fazer $n_{SR} := n_{SR} + 1$;

C.c.,

Fazer $n_{SR} := S$; (v não é viável!)

$$Custo_{processamento} := \infty;$$

Fim do Enquanto $n_{SR} \leq S$

Se $Custo_{processamento} < Custo$

Fazer $Custo := Custo_{processamento}$;

Fazer $(u^*, p^*, v^*) := (u^1, \dots, u^S, p_1^M, \dots, p_S^M, v)$ (solução atual!)

Se $Custo < \infty$

Fazer $solução_{viável} = verdadeiro$. Ir para o Passo 4.

(u^*, p^*, v^*) é a melhor solução viável atual para o gasoduto, com custo de transporte determinado por $Custo$;

C.c.,

Não existe solução viável para $\in L_{Restrita}$;

$$L_{Restrita} := L_{Restrita} \setminus \{v\};$$

Fim do Enquanto $solução_{viável} = falso$

Passo 4. (Geração da vizinhança de (u^*, p^*, v^*))

Fazer $Iterações = 0$ e $busca_max = \alpha \times 100$;

Passo 4.1 Enquanto $Iterações \leq busca_max$

Colocar a solução atual (v^*) na lista tabu (L_{Tabu});

$Iterações := iterações + 1$;

Se $Custo < \infty$ (Geração e busca dos melhores vizinhos de (u^*, p^*, v^*))

Construir uma vizinhança discreta Viz de (u^*, p^*, v^*) considerando variações das componentes de v^* , de tamanho de passo Δ (conforme Tabela 4.3) com as configurações dos compressores determinadas no Passo 3 fixas e calcular os respectivos custos dos pontos vizinhos:

$g(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz})$, para cada $(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz}) \in Viz$;

Fazer $g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p}) := \min_{(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz}) \in Viz} \{g(v_{Viz}, u_{Viz}, p_{Viz})\}$;

Passo 4.1.1 Se $\hat{v} \in L_{Tabu}$

Se $g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p}) < Custo$

Ativar a função de Aspiração: *função_Aspiração* (esta função retira o *Status Tabu* de \hat{v} caso este tenha um custo melhor que o custo atual - $Custo$);

Fazer $Custo := g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p})$; C.c,

Escolher o vizinho posterior v_{Viz} de \hat{v} melhor que não seja Tabu;

Reiniciar a geração de vizinhos a partir de $v^* = \hat{v}$ obtido;

Fim Se

Fim Se

Se $\hat{v} \notin L_{Tabu}$

Se $g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p}) > Custo$

Reiniciar a geração de vizinhos a partir de $v^* = \hat{v}$ obtido;

C.c,

Fazer $Custo := g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p})$;

Reiniciar a geração de vizinhos a partir de $v^* = \hat{v}$ obtido;

Fim Se

Fim Se

Fazer $(u^*, p^*, v^*) := \operatorname{argmin} g(\hat{v}, \hat{u}, \hat{p})$;

Fim do Enquanto iterações \leq busca_max

Passo 5. (Refinamento da busca: Busca de melhores soluções a partir de vizinhanças mais refinadas para a solução atual, (u^*, p^*, v^*))

Se $Custo < \infty$

Mantendo fixas as configurações dos compressores obtidas para (u^*, p^*, v^*) , gerar vizinhanças desse ponto, sendo que ao reiniciar a discretização considerar $DiscretRefin := Discret/5$, a fim de tentar encontrar um (u^*, p^{**}, v^*) tal que:

$$g((u^*, p^{**}, v^*)) < g((u^*, p^*, v^*)).$$

Se encontrado tal ponto, a melhor solução encontrada e o custo associado são:

$$(u^*, p^*, v^*) := (u^*, p^{**}, v^*) \text{ e } Custo := g(u^*, p^*, v^*);$$

C.c.,

Não se encontrou solução para o problema dado.

Fim.

No próximo Capítulo serão apresentados exemplos numéricos encontrados na literatura dos algoritmos GRASP e Busca Tabu aqui tratados.

CAPÍTULO 5

EXEMPLOS NUMÉRICOS E RESULTADOS DAS IMPLEMENTAÇÕES DAS HEURÍSTICAS GRASP E BUSCA TABU

As heurísticas GRASP e Busca Tabu, apresentados no Capítulo 4, foram implementadas em casos existentes na literatura. Tais implementações se comparam aqui, em termos da minimização do transporte do gás..

Para todos os exemplos apresentados neste trabalho, irão ser considerados as seguintes propriedades do gás:

- Z (fator de compressibilidade do gás): 0,95, adimensional;
- S_g (gravidade específica do gás): 0,6248, adimensional;
- T (temperatura média): 519,67 °R;
- R (constante do gás): 85,2, $(\text{lb}f \times \text{ft})/(\text{lb}m \times \text{°}R)$;
- f (fator de fricção): adimensional;
- L (comprimento dos dutos): *milhas*;
- d (diâmetro interno dos dutos): polegadas;
- t (resistência dos dutos): $1,3305 \times 10^5 \times \frac{fL}{d^5}$;
- p (pressão): *psia (pounds-force per square inch absolute - libras-força por polegada quadrada absoluta)*;
- u (vazão mássica ou vazão volumétrica): *lbm/min* ou *MMSCFD* (Milhões de pés cúbicos de gás por dia).

Em todas as redes que serão apresentadas, as Estações de compressão são constituídas por dois tipos de Compressores: três do Tipo A e dois do Tipo B. A vazão volumétrica de entrada Q (ft^3/min) dos compressores deve variar entre um limite inferior Q^L e um limite superior e Q^U . Para o compressor Tipo A é considerado a seguinte vazão volume de entrada Q :

$$Q_A^L = 7000 \leq Q \leq Q_A^U = 22000$$

Para o compressor Tipo B considera-se o seguinte:

$$Q_B^L = 16000 \leq Q \leq Q_B^U = 60000$$

A velocidade de rotação dos compressores S (ver equação 3.28) deve variar entre um limite inferior S^L e um limite superior e S^U . Para o compressor Tipo A considera-se o seguinte:

$$S_A^L = 5000 \leq S \leq S_A^U = 9400$$

Para o compressor Tipo B considera-se:

$$S_B^L = 6000 \leq S \leq S_B^U = 12000$$

Os valores das constantes que aparecem nas equações (3.26) e (3.27) para o Compressor Tipo A e B são descritas na Tabela 5.1 abaixo:

Tabela 5.1 - Variáveis dos Compressores Tipo A e B

Variáveis	Tipo A	Tipo B
A_H	0.6824×10^{-3}	0.6824×10^{-3}
B_H	-0.9002×10^{-3}	-0.4501×10^{-3}
C_H	0.5689×10^{-3}	0.1422×10^{-3}
D_H	-0.1247×10^{-3}	-0.01558×10^{-3}
A_E	134.8055	140.7825
B_E	-148.5468	-93.6928
C_E	125.1013	44.2825
D_E	-32.0965	-5.9793

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2010)

Nas Tabelas A.1 à A.8, foi considerando um $\alpha=0,5$ (este representa 50% dos melhores casos apresentados da LCR) no algoritmo principal e $\alpha=0,3$ no algoritmo de busca refinada (em todos os exemplos apresentados para esta).

Nas Tabelas A.11 e A.14 considerou-se $\alpha=0,3$ no algoritmo principal. Nas Tabelas A.12 e A.15, considerou-se $\alpha=0,5$. E por fim, nas Tabelas A.13 e A.16 considerou-se $\alpha=0,7$ no algoritmo principal.

Exemplo 1. (net-c-6c2-C1, Borraz-Sánchez (2009)): Este exemplo corresponde a uma rede com 6 nós, 4 dutos e 2 Estações, conforme a Figura 5.1. A rede inclui um nó de fornecimento (nó 1), com $s_1 = 1100$ e um nó de entrega (nó 6), com $s_6 = 1100$. Os limites inferiores de

pressão estão dados por $p_i^L = 200$. Os limites superiores de pressão estão dados por $p_i^U = 1200$. O conjunto de dutos é $\{(1,2);(1,3);(4,6);(5,6)\}$ com comprimento de 50 milhas, diâmetro interno de 3 pés para todos os dutos. As Estações de compressão são o conjunto $\{(2,4);(3,5)\}$.

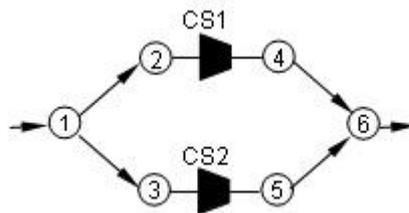


Figura 5.1 - Rede do exemplo 1 (Fonte: Borráz-Sánchez (2009))

Os resultados obtidos para o Exemplo 1 para a heurística GRASP e Busca Tabu, podem ser encontrados nas Tabelas A.1 e A.2, apresentados no ANEXO A.

Exemplo 2 (Exemplo net-c-10c3-C2 de Borráz-Sánchez (2009)): Este exemplo corresponde a uma rede, com 10 nós, 7 dutos e 3 Estações, como na Figura 5.2. A rede inclui dois nós de fornecimento (nós 1 e 3), com $s_1 = 900$ e $s_3 = 400$ e três nós de entrega (nós 8, 9 e 10), com $s_8 = 1000$, $s_9 = 200$ e $s_{10} = 100$. Os limites inferiores de pressão estão dados por $p_i^L = 200$. Os limites superiores de pressão estão dados por $p_i^U = 1200$. O conjunto de dutos é $\{(2,3);(4,6);(5,7);(6,8);(7,8);(8,9);(9,10)\}$ com comprimento de 30 milhas, diâmetro interno de 3 pés para todos os dutos. As Estações de compressão são apresentados pelo conjunto $\{(1,2);(3,4);(3,5)\}$.

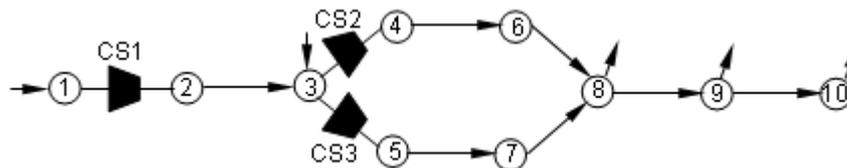


Figura 5.2 - Rede do exemplo 2 (Fonte: Borráz-Sánchez (2009))

Os resultados obtidos para o Exemplo 2 para a heurística GRASP e Busca Tabu, podem ser encontrados nas Tabelas A.3 e A.4, apresentado no ANEXO A.

Exemplo 3 (Exemplo net-c-15c5-C2 de Borraz-Sánchez (2009)): Este exemplo corresponde a uma rede, com 15 nós, 10 dutos e 5 Estações, como na Figura 5.3. A rede inclui três nós de fornecimento (nós 1, 2 e 3), com $s_1 = 500$, $s_2 = 450$ e $s_3 = 400$ e seis nós de entrega (nós 10, 11, 12, 13, 14 e 15), com $s_{10} = 200$, $s_{11} = 250$, $s_{12} = 300$, $s_{13} = 200$, $s_{14} = 200$ e $s_{15} = 200$. Os limites inferiores de pressão estão dados por $p_i^L = 200$. Os limites superiores de pressão estão dados por $p_i^U = 1200$. O conjunto de dutos é $\{(1,2); (1,3); (4,6); (5,6); (7,10); (7,11); (8,12); (8,13); (9,14); (9,15)\}$ com comprimento de 50 milhas, diâmetro interno de 3 pés para todos os dutos. As Estações de compressão são o conjunto $\{(2,4);(3,5);(6,7);(6,8);(6,9)\}$.

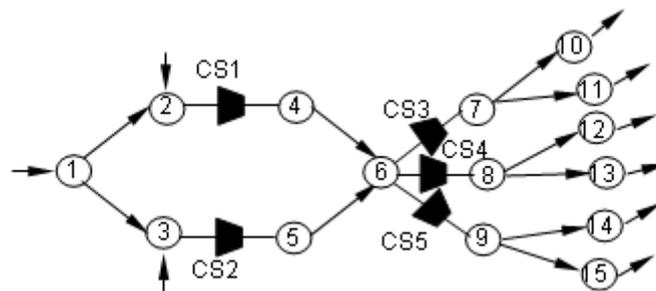


Figura 5.3 - Rede do exemplo 3 (Fonte: Borraz-Sánchez (2009))

Os resultados obtidos para o Exemplo 3 para a heurística GRASP e Busca Tabu, podem ser encontrados nas Tabelas A.5 e A.6, apresentado no ANEXO A.

Exemplo 4 (Exemplo 2 de Wu *et al.* (2000)): Este exemplo corresponde a uma rede, com 10 nós, 6 dutos e 3 Estações, como na Figura 5.4. A rede inclui um nó de fornecimento (nó 1), com $s_1 = 800$ e cinco nós de entrega (nós 5, 6, 7, 9 e 10), com $s_5 = s_9 = -100$, $s_6 = s_7 = -150$ e $s_{10} = -300$. Os limites inferiores de pressão estão dados por $p_1^L = p_2^L = 600$, $p_3^L = p_6^L = p_7^L = p_9^L = 450$, $p_4^L = 500$, $p_5^L = p_{10}^L = 400$. Os limites superiores de pressão estão dados por $p_1^U = 700$ e $p_i^U = 800$. O conjunto de dutos é $\{(2,3);(4,5);(5,6);(5,7);(8,9);(9,10)\}$ com comprimento de 50 milhas, diâmetro interno de 3 pés. As Estações de compressão são o conjunto $\{(1,2);(3,4);(3,8)\}$.

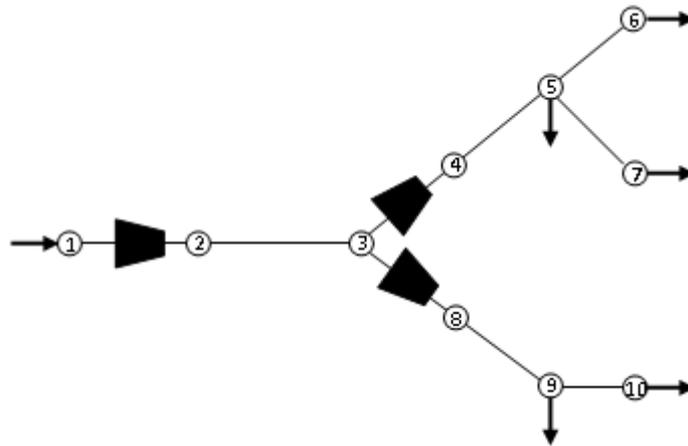


Figura 5.4 - Rede do exemplo 4 (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

Os resultados obtidos para o Exemplo 4 para a heurística GRASP e Busca Tabu, podem ser encontrados nas Tabelas A.7 e A.8, apresentado no ANEXO A.

Exemplo 5 (Exemplo 3 de Wu *et al.* (2000)): Este exemplo corresponde a uma rede mais complexa, com 48 nós, 43 dutos e 8 Estações, como na Figura 5.5. Os dados correspondentes as fontes podem ser vistos na Tabela A.9 e as configurações dos dutos, na Tabela A.10. Os limites de pressões para todos os nós são: $p_i^L=50$ e $p_i^U=1500$, exceto para os nós 1 ($p_1^L=900$, $p_1^U=1300$) e 3 ($p_3^L=990$ e $p_3^U=1150$). As Estações de compressão são compostas do conjunto descrito conforme o seguinte: $\{(2,9);(8,10);(12,13);(20,21);(21,22);(20,48);(24,46);(48,25)\}$.

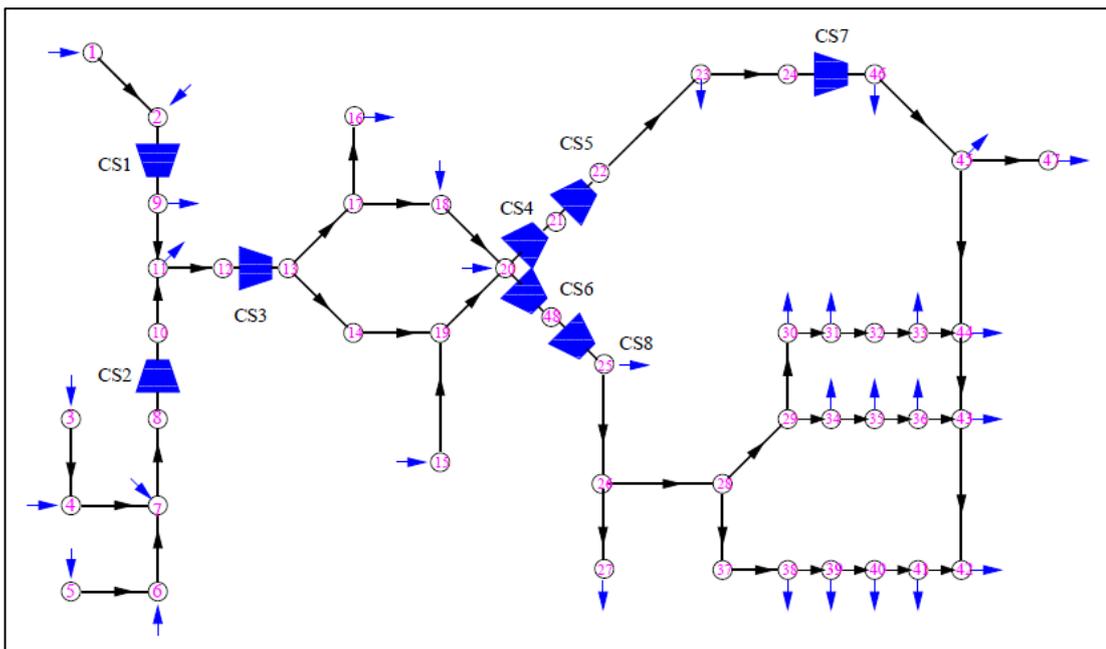


Figura 5.5 - Rede do exemplo 5 (Fonte: Wu *et al.*, (2000))

Os resultados obtidos para o Exemplo 5 para a heurística GRASP e Busca Tabu, podem ser encontrado nas Tabelas (A.11) a (A.16), apresentado no ANEXO A.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 abaixo, tem-se um resumo dos casos apresentados neste Capítulo para as heurísticas GRASP e Busca Tabu (Para o Exemplo 5 foi selecionado um caso particular da Tabela A.11 e A.14 para a heurística GRASP e Busca Tabu respectivamente, do primeiro teste efetuado).

Tabela 5.2 - Resumo das distribuições das pressões e custos (Exemplos de 1 a 5 - Heurística GRASP).

HEURÍSTICA GRASP					
	Exemplo 1	Exemplo 2	Exemplo 3	Exemplo 4	Exemplo 5
p1	786	700	746,6148	600	1241,7389
p2	719,5301	743,9992	700	640,5589	830
p3	736,5279	642,9182	746,5622	547,3094	1102,4753
p4	799,988	794,2347	747,3356	607,3095	1058,3394
p5	784,3667	663,672	597,646	584,0657	1205,4443
p6	734,7846	708,7703	554,2031	580,7224	1005,6556
p7	---	638,1075	610,4307	580,7224	904,4497
p8	---	611,4752	666,8885	604,2819	727,2727
p9	---	598,6027	647,1314	580,917	930,5628
p10	---	597,1552	606,0703	567,3516	1074,7329
p11	---	---	591,0098	---	930,5628
p12	---	---	584,2602	---	898,7045
p13	---	---	607,2527	---	1160,2621
p14	---	---	597,6768	---	1050,3157
p15	---	---	597,6768	---	940,1132
p16	---	---	---	---	1019,5949
p17	---	---	---	---	1022,4957
p18	---	---	---	---	884,3733
p19	---	---	---	---	927,4254
p20	---	---	---	---	664,5319
p21	---	---	---	---	816,6789
p22	---	---	---	---	958,689
p23	---	---	---	---	732,6029
p24	---	---	---	---	561,6699
p25	---	---	---	---	905,9293
p26	---	---	---	---	775,7122
p27	---	---	---	---	773,0075
p28	---	---	---	---	669,9698
p29	---	---	---	---	474,4957
p30	---	---	---	---	438,9435
p31	---	---	---	---	429,2318
p32	---	---	---	---	429,2814
p33	---	---	---	---	429,331
p34	---	---	---	---	381,2809
p35	---	---	---	---	339,3925
p36	---	---	---	---	329,7368
p37	---	---	---	---	563,1898
p38	---	---	---	---	430,7039
p39	---	---	---	---	340,1922
p40	---	---	---	---	297,2622
p41	---	---	---	---	289,6817
p42	---	---	---	---	291,4459
p43	---	---	---	---	329,9924
p44	---	---	---	---	440,799
p45	---	---	---	---	498,1427
p46	---	---	---	---	595,3309
p47	---	---	---	---	489,4466
p48	---	---	---	---	806,9075
CUSTO TOTAL	2,055739*10⁶	3,362773*10⁶	4,691173*10⁶	2,772427*10⁶	1,002990*10⁶
TEMPO TOTAL (Segundos)	101,2758	198,1837	209,1193	52,2915	445,1021

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.3 - Resumo das distribuições das pressões e custos. (Exemplos de 1 a 5 - Heurística Busca Tabu).

HEURÍSTICA BUSCA TABU					
	Exemplo 1	Exemplo 2	Exemplo 3	Exemplo 4	Exemplo 5
p1	786	700	746,6148	600	1241,7389
p2	719,1754	743,9992	700	640,5589	830
p3	736,8276	642,9182	746,5622	547,3094	1102,4753
p4	799,5175	790,5646	747,3356	607,3095	1058,3394
p5	783,2794	649,6494	597,646	584,0657	1205,4443
p6	733,9247	701,6624	554,2031	580,7224	1005,6556
p7	---	625,1849	610,4307	580,7224	904,4497
p8	---	599,7232	666,8885	604,2819	727,2727
p9	---	586,5928	647,1314	580,917	930,5628
p10	---	585,1157	606,0703	567,3516	1074,7329
p11	---	---	591,0098	---	930,5628
p12	---	---	584,2602	---	898,7045
p13	---	---	607,2527	---	1160,2621
p14	---	---	597,6768	---	1050,3157
p15	---	---	597,6768	---	940,1132
p16	---	---	---	---	1019,5949
p17	---	---	---	---	1022,4957
p18	---	---	---	---	884,3733
p19	---	---	---	---	927,4254
p20	---	---	---	---	664,5319
p21	---	---	---	---	816,6789
p22	---	---	---	---	958,689
p23	---	---	---	---	732,6029
p24	---	---	---	---	561,6699
p25	---	---	---	---	905,9293
p26	---	---	---	---	775,7122
p27	---	---	---	---	773,0075
p28	---	---	---	---	669,9698
p29	---	---	---	---	474,4957
p30	---	---	---	---	438,9435
p31	---	---	---	---	429,2318
p32	---	---	---	---	429,2814
p33	---	---	---	---	429,331
p34	---	---	---	---	381,2809
p35	---	---	---	---	339,3925
p36	---	---	---	---	329,7368
p37	---	---	---	---	563,1898
p38	---	---	---	---	430,7039
p39	---	---	---	---	340,1922
p40	---	---	---	---	297,2622
p41	---	---	---	---	289,6817
p42	---	---	---	---	291,4459
p43	---	---	---	---	329,9924
p44	---	---	---	---	440,799
p45	---	---	---	---	498,1427
p46	---	---	---	---	595,3309
p47	---	---	---	---	489,4466
p48	---	---	---	---	806,9075
CUSTO TOTAL	2,054962*10⁶	3,314974*10⁶	4,691173*10⁶	2,772417*10⁶	1,002990*10⁶
TEMPO TOTAL (Segundos)	61,17	135,0189	154,5502	59,686	274,5774

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1 Resultados

A partir dos resultados gerados nos exemplos demonstrados neste Capítulo (ver Tabelas do ANEXO A) pelas implementações das heurísticas GRASP e Busca Tabu, verificou-se que em ambos os casos os resultados foram satisfatórios.

Comparando-se as duas heurísticas GRASP e Busca Tabu respectivamente nos pares das Tabelas (A.1)-(A.2) (exemplo 1 - Borraz-Sánchez (2009)), (A.3)-(A.4) (exemplo 2 - Borraz-Sánchez (2009)), (A.5)-(A.6) (exemplo 3 - Borraz-Sánchez (2009)) e (A.7)-(A.8) (exemplo 4 - Wu *et al.* (2000)), sendo estes casos de redes de gasodutos menos complexas, observou-se que os resultados dos custos totais para se transportar o combustível foram relativamente próximos, sendo que, a Busca Tabu sugere melhores resultados que a heurística GRASP. Comparando-se os tempos gerados por estes resultados, nota-se que, a Busca Tabu mostrou-se, em sua maioria, resultados de tempo relativamente melhores em relação à heurística GRASP.

Comparando os resultados das Tabelas A.11, A.12 e A.13 do exemplo 5 (implementação da heurística GRASP; rede três de Wu *et al.* (2000)), sendo este caso o mais complexo (e a base da implementação de todos os algoritmos) verificou-se que, quando $\alpha=0,3$, a potencialidade de gerar resultados melhores ficou minimizada. Isto se deve a redução do espaço de busca que limita-se apenas aos “melhores” da lista restrita de candidatos, que não necessariamente representam os melhores resultados para se escoar o combustível no gasoduto. A quantidade de resultados ótimos gerados quando se “aumenta” o valor α fica evidenciado, o que pode ser visto, comparando-se os resultados da Tabela A.13 ($\alpha=0.7$) em relação às Tabelas A.11($\alpha=0.3$) e A.12 ($\alpha=0.5$). Comparando-se os tempos, nota-se que quando aumenta-se o espaço de busca, o tempo torna-se proporcional, i.e., o tempo aumenta relativamente a medida que se aumenta o espaço para efetuar a busca local.

Em relação à implementação da heurística de Busca Tabu, sendo seus resultados apresentados nas Tabelas A.14, A.15 e A.16 (rede do exemplo 3 de Wu *et al.* (2000)), verificou-se que a quantidade de resultados ótimos gerados foram significativamente iguais. Nota-se também que a heurística gerou um valor adverso ($v_4 = 801.5$) que quando aplicado para se escoar o gás natural não se comporta adequadamente, sendo este o único caso gerado pelas heurísticas (este valor permanecerá destacado dos outros valores gerados nas Tabelas).

Na comparação dos tempos gerados, nota-se que foram significativamente próximos, embora o mesmo tenha se tornado relativo para os casos gerados, já que, em sua maioria os resultados foram bastante satisfatórios, independente do tamanho do espaço de busca inicial.

Rodrigues (2010), implementou o exemplo 5 deste trabalho, (rede três de Wu *et al.* (2000)), considerando os mesmos dados apresentados, utilizando heurística GRASP. Comparando-se o resultado do custo final das duas heurísticas implementadas neste trabalho, em relação à heurística de Rodrigues (2010), observou-se que, os custos totais gerados para a minimização do transporte do combustível foram bastante significativos.

É fato observar que a heurística GRASP fica dependente dos resultados gerados pela lista restrita de candidatos e pela escolha do tamanho do espaço de busca gerado, limitando também a aleatoriedade da escolha. A Busca Tabu, por sua vez, depende somente, num primeiro momento, da lista restrita de candidatos para gerar os vizinhos e iniciar a exploração. Assim, o tamanho da lista para a escolha de um candidato, não se torna necessariamente relevante, já que, o que prevalece para a Busca Tabu é a geração de um bom “espaço de vizinhos” a partir da primeira escolha inicial da busca.

A heurística GRASP permite voltar em soluções já visitadas anteriormente o que leva o mesmo a uma ciclagem, o que pode muitas vezes distanciar de valores melhores. Diferente desta heurística, a Busca Tabu armazena conhecimento sobre espaços percorridos, utilizando memória adaptativa (lista tabu), o que permite pouca dependência com a solução inicial e evita o mesmo não visitar soluções já geradas anteriormente, permitindo ao mesmo determinar boas soluções independente do valor α para as buscas.

Portanto, comparando-se as implementações das heurísticas GRASP e Busca Tabu em todos os exemplos apresentados, verifica-se que, a Busca Tabu, devido aos seus atributos (memória adaptativa, estratégia de exploração da busca por geração de vizinhos, função de aspiração) mostrou-se significativamente mais eficaz em relação à heurística GRASP.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho, o tema aborda sobre a minimização do custo do transporte de gás natural nas redes de gasodutos. Para isto, deve-se determinar distribuições de pressões p e vazões v e u que seja passível de ser distribuído em todas as sub-redes, mantendo o fluxo contínuo do gás natural. O tema tem importância significativa, devido aos altos custos embutidos para o transporte do gás, o que se torna relevante para o setor de petróleo e gás.

Considera-se, que, gasodutos são formados por dutos para condução do gás, válvulas e outros dispositivos que permitem a junção destes dutos com outros, denominado nós (ou vértices), e, estações de compressão, que permitem manter a pressão necessária para que o gás flua continuamente até os nós de entrega. As estações de compressão são compostas de compressores, que tem por intuito, comprimir a vazão do gás natural, aumentando a pressão da vazão a ser escoada. Porém, estes consomem uma parcela do gás e devido ao grande volume a ser escoado torna-se significativo. A resolução deste problema consiste em determinar distribuições de vazões mássicas ótimas e a configuração dos compressores nas Estações de modo a minimizar o custo do transporte do gás natural.

Para isto, foram desenvolvidos e implementados dois algoritmos para as metaheurísticas com o objetivo de resolver o problema: o GRASP e a Busca Tabu. O motivo da utilização da heurística GRASP deve-se aos resultados satisfatórios encontrados na literatura, como: Azeredo (2008), Jubini (2008), Christo (2008), Cristo *et al.* (2009), Rodrigues (2010) e Paula *et al.* (2011). Estes trabalhos, consideram-se Estações compostas por compressores não necessariamente idênticos, denominado *generalizado*, diferente das propostas iniciais de Wu *et al.* (2000), Ríos-Mercado *et al.* (2002) e Ríos-Mercado *et al.* (2004), que consideram estações de compressão compostas por compressores idênticos, denominado *clássico*. A utilização da heurística de Busca Tabu deve-se aos resultados apresentados em Borraz-Sánchez e Ríos-Mercado (2009), que apresentaram tal heurística para o modelo de Wu *et al.* (2000) e Ríos-Mercado *et al.* (2002), sendo que, para isto, utilizaram o modelo de Estação clássico, obtendo para o mesmo resultados significativos.

No modelo de Estação *clássico*, a vazão mássica a ser comprimida é dividida igualmente nos compressores. Portanto, basta definir quantos compressores devem estar ativados em cada Estação de compressão. No modelo de Estação *generalizado*, a vazão mássica não é necessariamente dividida em parcelas iguais entre os compressores ativados. Neste, determina-se quais compressores devem estar ativados, o que resulta num modelo misto-inteiro quadrático não diferenciável, e que, portanto aumenta a complexidade do problema.

Para a implementação das heurísticas, considerou-se neste trabalho, o modelo de Estação *generalizado* apresentado em Christo (2008) e Rodrigues (2010). Para o desenvolvimento da heurística, Christo (2008) adota o domínio viável de uma estação e a função custo de combustível, estudados por Azeredo (2008), que por sua vez, utiliza conceitos desenvolvidos em Wu *et al.* (2000) adaptando-os, de acordo com a necessidade, para se aplicar ao caso do modelo de Jubini (2008). Rodrigues (2010) explora o fato de que a função custo do combustível normalmente diminui com relação à pressão de sucção, obtendo resultados satisfatórios.

Wu *et al.* (2000), define uma aproximação poliedral para o domínio D de uma estação de compressão e uma aproximação poliedral para uma estação clássica. Azeredo (2008) propõe uma aproximação poliedral para cada um dos domínios individuais dos compressores componentes da Estação generalizada.

Na Estação de compressão generalizada, o cálculo da função custo para dado $(v, p_s, p_d) \in D$ é considerado como em Wu *et al.* (2000), pois quando se têm compressores não idênticos em uma estação, torna-se necessário introduzir variáveis binárias para determinação da utilização ou não de cada compressor da Estação.

Inicialmente, para a resolução do problema de minimização do custo de transporte do gás natural apontado em (2.17)-(2.22), algumas questões surgiram: dada uma pressão inicial de referência, tal pressão será viável para ser distribuída para os demais nós da subrede? Qual o intervalo (superior e inferior) desta pressão que torna viável a distribuição das pressões e vazões em todos os nós e dutos desta sub-rede respectivamente? Como viabilizar o escoamento do gás natural para todas as subredes do gasoduto?

Para solucionar tais questões vários procedimentos foram necessários, e estes compoem os algoritmos centrais, para a resolução do transporte do combustível. Foram construídos dois algoritmos básicos: Algoritmo 1, o qual, fixada a vazão v_i numa EsC e dada

uma das pressões envolvidas para compressão (já seja a pressão de sucção p_s ou a de descarga p_d), otimizar o processo, calculando a outra pressão de forma a obter o custo mínimo de compressão e a distribuição da vazão v_i entre os compressores operados conforme Paula *et al.* (2011) e o Algoritmo 2, o qual, fixado um vetor v de vazões nas EsC, calcula o vetor (p, u) de pressões nos nós e vazões nos dutos de qualquer subrede da rede, de forma a atender as demandas operacionais de gás estabelecidas no gasoduto, a partir de um nó de referência e de uma pressão de referência da subrede, conforme Christo *et al.* (2009).

Posteriormente, duas heurísticas principais foram elaboradas, já com a pressão de referência pré-definida: GRASP e Busca Tabu. O objetivo destas implementações foram explorar espaços de busca, que determinassem vazões mássicas ótimas, simultaneamente definir configurações dos compressores nas Estações que minimizassem o transporte do combustível.

Estas duas heurísticas foram testadas em cinco exemplos encontrados na literatura (de Wu *et al.* (2000) e Borraz-Sánchez, (2009)) e em ambos os casos, os resultados encontrados foram satisfatórios. Verificou-se que a Busca Tabu em comparação com GRASP, mostrou-se mais eficaz, encontrando soluções iguais e melhores, e em sua maioria, num espaço de tempo menor do que a heurística GRASP.

Como apresentado em Christo (2008) e Rodrigues (2010), neste trabalho não se considerou a capacidade dos dutos como embutidos nas heurísticas GRASP e Busca Tabu, na etapa de processamento. Propõem-se para trabalhos futuros, desenvolver as heurísticas trabalhadas nesta pesquisa, levando-se em consideração a capacidade dos dutos e assim generalizar o modelo proposto.

Neste trabalho foi considerado o domínio e a função custo originais. Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se na implementação das heurísticas, considerar o domínio aproximado e a função custo generalizada apresentada por Azeredo (2008). Para novas implementações da heurística Busca Tabu, propõem-se incorporar as estratégias de diversificação ou intensificação para efetuar buscas mais refinadas em determinadas regiões consideradas promissoras no espaço das soluções geradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNES, Clarice; HELFER, Inácio. **Normas para apresentação de trabalhos acadêmicos**. 8.ed. Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 2008. 72p.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim Mensal do Gás Natural**. Superintendência de Comercialização e Movimentação de Petróleo, seus Derivados e Gás Natural – SCM. Junho de 2011. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=59925&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1394136846543>. Acessado em: 10 Jul. 2013.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Março de 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=69700&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1394137510348>. Acessado em: 10 Jul. 2013.

AZEREDO, M. M. **Aproximações do Domínio e a Função Custo de uma Estação de Compressão no Transporte de Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). 81p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

BORRAZ-SÁNCHEZ, C.; RIOS-MERCADO, R. Z., **Improving the operation of pipeline systems on cyclic structures by tabu search**. *Computers and Chemical Engineering* . v 33,p. 58–64, 2009.

BP Statistical Review of World Energy. Disponível em: www.bp.com/statisticalreview. Acessado em: 12 Jun. 2013.

CHRISTO, A.C.T. **Uma metaheurística Grasp para o planejamento de movimentação de gás natural em gasodutos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). 72p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

CHRISTO, A.C.T.; JUBINI, G.M.; AZEREDO, M. M.; ARICA, J; RODRIGUES, P. F. C. **Uma Heurística GRASP para a Minimização do Custo de Combustível no Transporte de Gás Natural por Gasodutos**. XIV ELAVIO, El Fuerte, Sinaloa, México, 9-14 de agosto de 2009.

CNI - Confederação Nacional da Indústria . **A indústria e o Brasil – gás natural: uma proposta de política para o Brasil.** *Confederação Nacional da Indústria.* – Brasília, 2010. 89 p.: il.

FEO T. A., RESENDE M. G. C. (1995). **Greedy Randomized Adaptive Search Procedures.** *Journal of Global Optimization*, 6: 109–134.

FIGUEIREDO, M.; HEDLUND, K.F.S.; GRAEPIN, C.; SILVA, T.C.N.; AZEVEDO, F.C.G.; KEMERICH, P.D.C. **Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil.** *Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.* Santa Maria, v.10, nº 10, p. 2251-2265, jan-abr, 2013.

FRAGA, M.C.P; SOUZA,S.R; COELHO,A.M. **Uma metodologia híbrida Colônia de Formigas – Busca Tabu - Reconexão por Caminhos para resolução do Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo.** In: IX Encontro de Modelagem Computacional. Belo Horizonte-MG, 2006.

GLOVER, F. **Future paths for integer programming and artificial intelligence.** *Computers and Operations Research.* Amsterdam, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu search. **Modern Heuristics Techniques for Combinatorial Problems,** Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 70-150, 1993.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu Search. Boston Dordrecht London: Kluwer Academic Publishers, 1997.

IAMASHITA, E. K. **Teste do Módulo Econômico do Sistema Otimizador da Movimentação de Gás.** 2002. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo). Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF. Campos dos Goytacazes-RJ.

IAMASHITA, E. K. **Sistema de Planejamento de Movimentação de Gás Utilizando Metaheurísticas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Reservatório e da Exploração).128p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Macaé – RJ, 2006.

IAMASHITA, E. K.; GALAXE, F.; ARICA, J.. **A Planning Model for Offshore Natural Gas Transmission.** *Pesquisa Operacional,* Rio de Janeiro, v.28, n.1, p.29-44, 2008.

IEA - International Energy Agency (2011). **World Energy Outlook - Special Report: Are we entering a golden age of gas?** OECD/IEA, Paris.

JUBINI, G.M. **Um modelo para otimização da operação de gasodutos e uma proposta heurística para a sua solução.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). 2008. 95p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

LUONGO, C. A.; GILMOUR, B. J.; SCHROEDER, D. W. **Optimization in Natural Gas Transmission Networks: A Tool to Improve Operational Efficiency.** In: 3rd SIAM Conference on Optimization, Boston, 1989.

MANSANO, E. M. **Algoritmos Busca Tabu Paralelos Aplicados ao Planejamento da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica.** 2008. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNESP, Ilha Solteira-SP, 2008.

MARINHO, E. H; OCHI, L.S; DRUMMOND, L.M.A. **Heurísticas Busca Tabu para o Problema de Programação de Tripulações de Ônibus Urbano.** In: XXXVI SBPO – O impacto da Pesquisa Operacional nas Novas Tendências Multidisciplinares. 2004, São João Del Rei- MG.

PACHECO, D. J. **Cálculo do Custo do combustível em Estações de Compressão de Gasodutos.** 30p. TCC (Graduação em Eng. de Produção) - UENF, Campos dos Goytacazes, 2012.

PARO, A.C. **Estudo da contribuição do gás natural no setor elétrico – uma análise de cenários de sua expansão nos setores de geração termelétrica, cogeração e residencial.** 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). EP/USP, São Paulo, 2005.

PAULA, C; ARICA, J.; VIEIRA, M.C.B. **Minimização de custos de combustível em transporte de gás natural por gasodutos,** XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Belo Horizonte (MG, Brasil), 2011.

PAULA, C. **Minimização do custo de transporte de gás natural por gasoduto: o caso de compressores não idênticos.** 38p. TCC (Graduação em Eng. de Produção) - UENF, Campos dos Goytacazes, 2012.

RAMAN, R.; GROSSMANN, I.E. **Relation between MILP Modelling and Logical Inference for Chemical Process Synthesis**. Computers and Chemical Engineering 15(2), 73-84.

RÍOS-MERCADO, R. Z.; WU, S.; SCOTT, R.L.;BOYD, E. A.(2000) **Preprocessing on Natural Gas Transmission Networks**. Technical Report PISIS-2000-01, Graduate Program in Systems Engineering, UANL, San Nicolás de los Garza, México.

RÍOS-MERCADO, R. Z.; WU, S.; SCOTT, R.L.; BOYD, E. A. (2002). **A Reduction Technique for Natural Gas Transmission Network Optimization Problems**. Annals of Operations Research, 217-234.

RÍOS-MERCADO, R. Z.; KIM, S.; BOYD, E. A. (2004). **Efficient Operation of Natural Gas Transmission Systems: A Network-Based Heuristic for Cyclic Structures**. Universidad Autónoma de Nuevo León - UANL, San Nicolás de los Garza, México.

RODRIGUES, P. F. C. **Uma Metaheurística GRASP para Minimização do Custo de Combustível no Transporte de Gás Natural por Gasodutos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). 88p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2010.

SUBRAMANIAN, A.; MEDEIROS, J.M.F; FORMIGA, L.A. *et al.* **Aplicação da metaheurística de Busca Tabu ao problema de alocação de aulas a salas em uma Instituição Universitária**. Revista Produção Online. v.11, n.1, p.54-75, mar. 2011.

VAZ, C. E. M.; SANTOS, W.G.; MAIA, J.L.P. (2008). **Tecnologia da Indústria do Gás Natural**. Macaé: Petróbas/E&P – BC, 440p.

VIEIRA, P. L; GARCIA, C. B.; GUIMARÃES, H. B. *et al.* – **Gás natural: benefícios ambientais no Estado da Bahia**. Salvador: Solisluna Design e Editora, 2005. 132 p.: il.

WU, S.; RÍOS-MERCADO, R. Z.; BOYD E. A.; SCOTT, L. R. (2000). **Model Relaxations for the Fuel Cost Minimization of Steady-State Gas Pipeline Networks**. Elsevier Science: Mathematical and Computer Modeling. Houston, v.31, n.122, p.197-220, 2000.

ANEXO A

RESULTADO DOS EXEMPLOS NUMÉRICOS

Exemplo 1

Tabela A.1: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 1 (GRASP)

HEURÍSTICA GRASP										
V=[589;511]						Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	p6	Estações	CS1	CS2	Custo Total	
786	719,5301	736,5279	799,988	784,3667	734,7846	Custos	1071519,204	984219,4712	2,055739*10 ⁶	
TEMPO DE PROCESSAMENTO : 101.2758 seg.										

Tabela A.2: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 1 (BUSCA TABU)

HEURÍSTICA BUSCA TABU										
V=[590.5;509.5]						Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	p6	Estações	CS1	CS2	Custo Total	
786	719,1754	736,8276	799,5175	783,2794	733,9247	Custos	1072879,649	982082,4013	2,054962*10 ⁶	
TEMPO DE PROCESSAMENTO : 61.17 seg										

Exemplo 2

Tabela A.3: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 2 (GRASP)

HEURÍSTICA GRASP										
V=[900;861.5;438.5]						Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5		Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
700	744	642,918	794,23	663,672		Custos	1297006,87	1225035,708	840731,16	3,362773*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10		TEMPO DE PROCESSAMENTO: 198.1837 seg.				
708,7703	638,11	611,475	598,6	597,1552						

Tabela A.4: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 2 (BUSCA TABU)

HEURÍSTICA BUSCA TABU										
V=[900;875.5;424.5]						Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5		Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
700	744	642,918	790,56	649,6494		Custos	1297006,87	1199632,472	818335,25	3,314974*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10		TEMPO DE PROCESSAMENTO: 135.0189 seg.				
701,6624	625,18	599,723	586,59	585,1157						

Exemplo 3

Tabela A.5: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 3 (GRASP)

HEURÍSTICA GRASP									
V=[933.5;416.5;450;500;400]					Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
746,6	700	746,56	747,34	597,65	Custos	1447297,175	777297,887	821457,285	4,691173*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10	CS4		CS5		
554,2	610,4	666,89	647,13	606,07	874015,3962		771106,251		
p11	p12	p13	p14	p15	TEMPO DE PROCESSAMENTO : 209.1193 seg.				
591	584,3	607,25	597,68	597,68					

Tabela A.6: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 3 (BUSCA TABU)

HEURÍSTICA BUSCA TABU									
V=[933.5;416.5;450;500;400]					Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
746,6	700	746,56	747,34	597,65	Custos	1447297,175	777297,887	821457,285	4,691173*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10	CS4		CS5		
554,2	610,4	666,89	647,13	606,07	874015,3962		771106,251		
p11	p12	p13	p14	p15	TEMPO DE PROCESSAMENTO: 154.5502 seg.				
591	584,3	607,25	597,68	597,68					

Exemplo 4

Tabela A.7: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 4 (GRASP)

HEURÍSTICA GRASP									
V=[800;398;402]					Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
600	640,56	547,31	607,31	584,07	Custos	1239876,098	764350,56	768200,82	2,772427*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10	TEMPO DE PROCESSAMENTO: 52.2915 seg.				
580,72	580,72	604,28	580,92	567,35					

Tabela A.8: Pressões da rede e custo das estações de compressão - Exemplo 4 (BUSCA TABU)

HEURÍSTICA BUSCA TABU									
V=[800;400.5;399.5]					Custo Final				
p1	p2	p3	p4	p5	Estações	CS1	CS2	CS3	Custo Total
600	640,56	547,31	607,21	583,96	Custos	1239876,098	766751,97	765789,39	2,772417*10 ⁶
p6	p7	p8	p9	p10	TEMPO DE PROCESSAMENTO: 59.686 seg.				
580,62	580,62	604,37	581,01	567,45					

Exemplo 5 (6 casos: 3 Tabelas GRASP e 3 Tabelas Busca Tabu).

Tabela A.9: Fontes da Rede – Exemplo 5

<i>i</i>	<i>s_i</i>	<i>i</i>	<i>s_i</i>	<i>i</i>	<i>s_i</i>	<i>i</i>	<i>s_i</i>
1	600	13	0	25	-550	37	0
2	0	14	0	26	0	38	-30
3	200	15	100	27	-50	39	-30
4	200	16	-100	28	0	40	-30
5	200	17	0	29	0	41	-30
6	200	18	100	30	-30	42	-40
7	200	19	0	31	-30	43	-40
8	0	20	450	32	0	44	-40
9	-400	21	0	33	-30	45	-100
10	0	22	0	34	-30	46	-200
11	-100	23	-200	35	-30	47	-180
12	0	24	0	36	-30	48	0

Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2000)

Tabela A.10: Dados dos dutos – Exemplo 5

Duto	L	d	f	Duto	L	d	f
(1,2)	10,1015	1,5	0,0108	(30,31)	5,0507	1	0,013
(3,4)	4,5175	1,5	0,0108	(31,32)	4,5175	1	0,013
(4,7)	5,1508	1,5	0,0108	(32,33)	4,5175	1	0,013
(5,6)	5,1508	1	0,013	(33,34)	4,5175	1	0,013
(6,7)	5,1508	1,5	0,0108	(29,34)	5,0507	1	0,013
(7,8)	5,1508	2	0,009	(34,35)	4,5175	1	0,013
(9,11)	10,1015	1,5	0,0108	(35,36)	4,5175	1	0,013
(10,11)	5,1508	2	0,009	(36,43)	4,5175	1	0,013
(11,12)	10,1015	3	0,0085	(28,37)	5,0507	1	0,013
(13,14)	10,1015	1,5	0,0108	(37,38)	5,0507	1	0,013
(14,19)	10,1015	1,5	0,0108	(38,39)	5,0507	1	0,013
(15,19)	10,1015	1,5	0,0108	(39,40)	5,0507	1	0,013
(19,20)	10,1015	1,5	0,0108	(40,41)	5,0507	1	0,013
(13,17)	10,1015	2	0,0095	(41,42)	5,0507	1	0,013
(17,16)	10,1015	1,5	0,0108	(43,42)	4,5175	1	0,013
(17,18)	10,1015	2	0,0095	(44,43)	4,5175	1	0,013
(18,20)	10,1015	2	0,0095	(45,44)	8,3299	1,5	0,0108
(25,26)	10,1015	1,5	0,0108	(45,47)	5,7143	2	0,009
(26,27)	7,1429	1,5	0,0108	(46,45)	11,5175	2	0,009
(26,28)	10,1015	1,5	0,0108	(22,23)	11,5175	2	0,009
(28,29)	5,0507	1	0,013	(23,24)	11,4286	2	0,009
(29,30)	4,5175	1	0,013				

Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2000)

Tabela A.11: Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,3$ - algoritmo principal)

	Passo (Δ)	Vizinho ($\tilde{v}_4 = v_4 + \Delta; \hat{v}_4 = v_4 - \Delta$)	Tempo (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5 ;vetor4+5	345,3394	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	272,4245	837.5	$1,0072 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	286,5114	845.5	$1,0032 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	290,802	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	289,27270	841.5	$1,0053 \cdot 10^7$
TESTE 2	5	vetor4-5 ;vetor4+5	344,2942	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	385,9621	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	375,5568	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	328,601	847	$1,0031 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	283,07940	841.5	$1,0053 \cdot 10^7$
TESTE 3	5	vetor4-5 ;vetor4+5	356,6027	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	311,9084	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	310,8164	845.5	$1,0032 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	462,855	843.5	$1,0043 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	359,27030	831.5	$1,0098 \cdot 10^7$
TESTE 4	5	vetor4-5 ;vetor4+5	302,1583	843.5	$1,0043 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	381,6564	847.5	$1,0031 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	346,915	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	317,774	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	304,84160	841.5	$1,0053 \cdot 10^7$
TESTE 5	5	vetor4-5 ;vetor4+5	413,1374	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	339,2866	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	356,1659	845.5	$1,0032 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	337,6018	846.5	$1,0030 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	282,22140	846	$1,0030 \cdot 10^7$
TESTE 6	5	vetor4-5 ;vetor4+5	422,8095	848	$1,0032 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	379.02	847	$1,0031 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	332,6253	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	341,1742	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	445,10210	846	$1,0030 \cdot 10^7$
TESTE 7	5	vetor4-5 ;vetor4+5	357,8039	847.5	$1,0031 \cdot 10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	379.02	847	$1,0031 \cdot 10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	332,6253	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	341,1742	846	$1,0030 \cdot 10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	445,10210	846	$1,0030 \cdot 10^7$

Tabela A.12: Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,5$ - algoritmo principal)

	Passo (Δ)	Vizinho ($\bar{v}_4 = v_4 + \Delta; \bar{v}_4 = v_4 - \Delta$)	Tempo de execução (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5 ;vetor4+5	313,57760	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	273,0798	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	332,7189	845.5	$1,0032*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	291,192	833.5	$1,0090*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	309,24080	846	$1,0030*10^7$
TESTE 2	5	vetor4-5 ;vetor4+5	299,70910	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	311,1284	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	296,9635	844.5	$1,0037*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	417,662	842.5	$1,0049*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	301,59670	841.5	$1,0053*10^7$
TESTE 3	5	vetor4-5 ;vetor4+5	322,37610	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	319,7708	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	324,6381	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	289,834	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	289,55350	846	$1,0030*10^7$
TESTE 4	5	vetor4-5 ;vetor4+5	291,47230	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	292,5799	847	$1,0031*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	304,1239	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	319,116	847	$1,0031*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	404,93180	846	$1,0030*10^7$
TESTE 5	5	vetor4-5 ;vetor4+5	305,7152	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	324,2793	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	284,265	844.5	$1,0038*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	325,1061	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	515,2557	846	$1,0030*10^7$
TESTE 6	5	vetor4-5 ;vetor4+5	277,4166	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	300,4267	846.5	$10030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	296,0899	846.5	$10030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	297,0103	843	$10045*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	296,0275	846	$1,0030*10^7$
TESTE 7	5	vetor4-5 ;vetor4+5	293,6719	847	$1,0031*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	298,6951	843	$1,0045*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	313,6556	845.5	$10032*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	338,257	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	358,9115	846	$1,0030*10^7$

Tabela A.13: Execução dos testes e custo finais - (GRASP: $\alpha=0,7$ - algoritmo principal)

	Passo(Δ)	Vizinho ($\hat{v}_4=v_4+\Delta$; $\hat{v}_4=v_4-\Delta$)	Tempo de execução (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5 ;vetor4+5	391,73410	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	395,9929	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	348,943	845.5	$1,0032*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	330,753	842	$1,0051*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	440,87440	841.5	$1,0053*10^7$
TESTE 2	5	vetor4-5 ;vetor4+5	380,93880	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	418,676	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	466,7706	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	406,929	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	334,26330	846	$1,0030*10^7$
TESTE 3	5	vetor4-5 ;vetor4+5	342,51580	847	$1,0031*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	356,977	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	335,5114	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	364,153	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	397,11610	846	$1,0030*10^7$
TESTE 4	5	vetor4-5 ;vetor4+5	398,0054	846.5	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	396,0553	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	341,3926	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	329,4117	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	406,1018	846	$1,0030*10^7$
TESTE 5	5	vetor4-5 ;vetor4+5	434,962	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	345,199	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	324,8097	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	317,1812	843.5	$1,0042*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	385,0573	840	$1,006*10^7$
TESTE 6	5	vetor4-5 ;vetor4+5	482,3551	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	347,7262	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	478,0183	843.5	$1,0042*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	317,4152	842	$1,006*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	376,7736	846	$1,0030*10^7$
TESTE 7	5	vetor4-5 ;vetor4+5	513,8361	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4 ;vetor4+4	464,649	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3 ;vetor4+3	484,7263	845.5	$1,0031*10^7$
	2	vetor4-2 ;vetor4+2	458,5961	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-1 ;vetor4+1	487,1443	841.5	$1,0053*10^7$

Tabela A.14: Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu: $\alpha=0,3$ algoritmo principal)

	Passo (Δ)	Vizinho ($\hat{v}_4=v_4+\Delta*i$; $\hat{v}_4=v_4-\Delta*i$)	Tempo de execução (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	255,09280	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	259,9445	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	256,9648	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	251,505	846	1,0030*10 ⁷
	1	vetor4-i;vetor4+i	321,61170	846	1,0030*10 ⁷
TESTE 2	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	272,4713	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	273,813	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	263,782	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	240,5847	846	1,0030*10 ⁷
	1	vetor4-i;vetor4+i	304,67	846	1,0030*10 ⁷
TESTE 3	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	359,4263	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	241,0839	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	283,6722	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	271,6133	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i;vetor4+i	273,7194	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 4	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	284,811	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	230,1327	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	282,2058	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	231,0063	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i;vetor4+i	274,7646	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 5	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	263,0021	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	266,3405	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	247,6828	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	227,9487	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i;vetor4+i	261,4733	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 6	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	278,0718	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	244,3756	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	250,1944	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	232,6443	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i;vetor4+i	338,0698	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 7	5	vetor4-5*;vetor4+5*i	260,2409	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*;vetor4+4*i	247,8076	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*;vetor4+3*i	265,0301	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*;vetor4+2*i	228,4167	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i;vetor4+i	274,5774	801.5	1,0004*10 ⁷

Tabela A.15: Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu: $\alpha=0,5$ algoritmo principal)

	Passo (Δ)	Vizinho ($\tilde{v}_4=v_4+\Delta^*$; $\hat{v}_4=v_4-\Delta^*$)	Tempo de execução (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	260,4593	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	344,3566	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	280,8018	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	271,629	846	1,0030*10 ⁷
	1	vetor4-i ;vetor4+i	356,11910	846	1,0030*10 ⁷
TESTE 2	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	369,33240	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	363,3887	846	1,0030*10 ⁷
	3*	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	430,7344	801.5	1,0004*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	263,377	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	362,65550	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 3	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	430,4224	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	359,4887	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	341,611	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	351,2519	846	1,0030*10 ⁷
	1	vetor4-i ;vetor4+i	435,38320	846	1,0030*10 ⁷
TESTE 4	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	507,8457	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	481,8559	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	425,5239	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	402,7166	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	470,7486	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 5	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	548,3747	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	514,4757	846	1,0030*10 ⁷
	3*	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	741,8004	801.5	1,0004*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	487,6591	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	626,1568	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 6	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	361,0331	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	345,121	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	305,8088	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	292,861	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	398,3174	801.5	1,0004*10 ⁷
TESTE 7	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	308,4296	846	1,0030*10 ⁷
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	414,6663	846	1,0030*10 ⁷
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	376,8516	846	1,0030*10 ⁷
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	314,5916	846	1,0030*10 ⁷
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	485,1319	801.5	1,0004*10 ⁷

Tabela A.16: Execução dos testes e custo finais - (Busca Tabu $\alpha=0,7$ - algoritmo principal)

	Passo (Δ)	Vizinho ($\hat{v}_4=v_4+\Delta^*i$; $\hat{v}_4=v_4-\Delta^*i$)	Tempo de execução (seg.)	Melhor Vetor 4	Custo final
TESTE 1	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	323,5617	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	322,2825	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	323,4525	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	398,5202	846	$1,0030*10^7$
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	488,04910	801.5	$1,0004*10^7$
TESTE 2	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	324,1857	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	345,8074	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	327,8517	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	421,9203	846	$1,0030*10^7$
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	405,8054	801.5	$1,0004*10^7$
TESTE 3	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	352,2971	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	356,3999	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	349,5046	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	350,7526	846	$1,0030*10^7$
	1*	vetor4-i ;vetor4+i	437,068	801.5	$1,0004*10^7$
TESTE 4	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	524,9122	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	325,0749	846	$1,0030*10^7$
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	377,8656	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	349,645	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-i ;vetor4+i	702,5973	846	$1,0030*10^7$
TESTE 5	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	311,5964	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	648,621	846	$1,0030*10^7$
	3*	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	447,3329	801.5	$1,0004*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	277,1826	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-i ;vetor4+i	303,1723	846	$1,0030*10^7$
TESTE 6	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	373,2636	846	$1,0030*10^7$
	4	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	352,7651	846	$1,0030*10^7$
	3*	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	448,5653	801.5	$1,0004*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	318,8036	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-i ;vetor4+i	462,3714	846	$1,0030*10^7$
TESTE 7	5	vetor4-5*i ;vetor4+5*i	332,2512	846	$1,0030*10^7$
	4*	vetor4-4*i ;vetor4+4*i	328,7825	801.5	$1,0004*10^7$
	3	vetor4-3*i ;vetor4+3*i	378,2365	846	$1,0030*10^7$
	2	vetor4-2*i ;vetor4+2*i	418,1134	846	$1,0030*10^7$
	1	vetor4-i ;vetor4+i	524,7896	846	$1,0030*10^7$

*Valor adverso