

SISTEMA DE PLANEJAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DE GÁS UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS

EDSON KENJI IAMASHITA

**Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense, como parte das
exigências para obtenção do título
de Doutor em Engenharia de
Reservatório e de Exploração.**

Orientador: Prof. VIATCHESLAV PRIIMENKO

Co-orientador: Prof. JOSÉ ARICA

**MACAÉ - RJ
DEZEMBRO - 2006**

**SISTEMA DE PLANEJAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DE GÁS
UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS**

EDSON KENJI IAMASHITA


Tese apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense, como parte das
exigências para obtenção do título
de Doutor em Engenharia de
Reservatório e de Exploração.

Aprovada em 15 de dezembro de 2006

Comissão Examinadora:




Prof. Albino Lopes D'Almeida, (D.Sc., PETROBRAS)




Prof. André Duarte Bueno, (D.Sc., LENEP/UENF)



Prof. Adolfo Puime Pires, (D.Sc., LENEP/UENF)



Prof. José Ramon Arica Chávez, (D.Sc., LEPROD/UENF)
(co-orientador)



Prof. Viatcheslav Ivanovich Priimenko, (Ph.D. LENEP/UENF)
(orientador)

AGRADECIMENTOS

Quero expressar a minha gratidão a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para alcançar mais este objetivo.

Primeiramente, agradeço aos meus amigos: orientador Viatcheslav Priimenko, e co-orientador José Arica, que me concederam constante atenção, compartilhando todos os afazeres, me apoiando e orientando no desenvolvimento desta tese.

A inspiração para a tese foi o desenvolvimento do Sistema PLANGAS (Sistema de Planejamento da Movimentação de Gás, PETROBRAS), cujo projeto foi coordenado pelos gerentes Sérgio Murilo Moreira Lopes, Rogério de Miranda Freire, Roberto Iachan e desenvolvido pelos engenheiros Marcos Alves França, Nelson de Maria da Silva, Kátia Maria Poppe Porto, Ricardo Accioly, Marco Antônio Magalhães Bastos, Edson Kenji Iamashita e Amaro Luiz Cassiano Dias. As idéias originais, nas quais se buscaram representar as condições reais de operação através das formulações matemáticas foram muito importantes para este projeto.

Agradeço a PETROBRAS, pelo fornecimento dos dados de movimentação de gás e pela utilização do Sistema PLANGAS.

O apoio dos gerentes Arísio Stanzani França, Roberto Iachan e Luiz Renato de Souza Justiniano foi fundamental para o desenvolvimento da tese.

A FAPERJ e o CNPq que financiaram parcialmente esta pesquisa e foram responsáveis por uma grande contribuição para a Tese, principalmente na Área de Metaheurísticas e Otimização Não Linear.

Aos pesquisadores Alexandre Alves Gomes, Frederico Galaxe e Juliana Bessa pelo suporte técnico prestado.

Aos professores Geraldo Galdino de Paula Jr., Gudelia Morales, Jacqueline

Magalhães Rangel Cortes e André Bueno pelos esclarecimentos específicos que contribuíram para o desenvolvimento da Tese.

Aos colegas, professores e funcionários do LENE e LEPROD, pela prontidão e carinho que sempre me dispensaram. Em especial, ao Chefe do LENE, Professor Abel Carrasquilla, Coordenador da pós-graduação Professor Carlos Alberto Dias e Chefe do LEPROD, Professor José Arica.

SUMÁRIO

LISTA DE APÊNDICES.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação do problema.....	1
1.2. Objetivo da Tese.....	4
1.3. Roteiro.....	5
1.4. Contribuições.....	6
1.5. Justificativa da Tese.....	6
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. O processo de compressão e escoamento de gás.....	8
2.1.1. A movimentação de gás na plataforma.....	8
2.1.2. A movimentação de gás através da rede de gasodutos...16	
2.2. Histórico do PLANGAS.....	25
CAPÍTULO 3 – INTRODUÇÃO ÀS HEURÍSTICAS E METAHEURÍSTICAS.....	29
3.1. Heurísticas.....	29
3.2. Metaheurísticas.....	31
3.2.1. O algoritmo genético.....	31
3.2.2. O sistema GRASP.....	35

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	38
4.1. Hipóteses simplificadoras.....	38
4.2. Balanço Volumétrico.....	39
4.2.1. Na plataforma.....	39
4.2.2. Nos gasodutos.....	42
4.3. Formulação do Problema.....	43
4.3.1. O Método de Newton-Raphson.....	50
4.3.2. O Balanço em Baixa Pressão.....	51
4.4. Análise Econômica.....	54
4.4.1. Receitas.....	54
4.4.2. Custos operacionais.....	55
4.4.3 Lucro Final e Função Objetivo.....	56
4.5. Metodologia.....	56
4.5.1. Aplicando o algoritmo genético ao processo de planejamento da movimentação de gás.....	56
4.5.2. Aplicando o algoritmo GRASP ao processo de planejamento da movimentação de gás.....	60
 CAPÍTULO 5- RESULTADOS.....	 65
5.1. Avaliação computacional.....	65
5.1.1. Descrição da Base de Dados.....	65
5.1.2. Tabela de resultados.....	67
5.2. Análise dos resultados.....	70
 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	 73
6.1. Conclusões.....	73
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	75
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 76

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICES.....	82
APÊNDICE A - DEFINIÇÕES.....	83
APÊNDICE B - EQUACIONAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE PLANEJAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE GÁS DA PETROBRAS.....	91
APÊNDICE C - LINEARIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PERDA DE CARGA.....	98
APÊNDICE D: PSEUDO-CÓDIGO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	101
APÊNDICE E: PSEUDOCÓDIGO DO MÉTODO GRASP.....	107
APÊNDICE F: PUBLICAÇÕES, PRÊMIOS E PROJETOS DESENVOLVIDOS.....	111

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Reservatório de óleo.....	9
FIGURA 2: Esquema de Gás Lift.....	10
FIGURA 3: Esquema do processo de separação do gás.....	11
FIGURA 4: Esquema da produção de gás não associado.....	11
FIGURA 5: Esquema do sistema de compressão de gás de uma plataforma... 	12
FIGURA 6: Bateria de compressores de uma plataforma.....	13
FIGURA 7: Exemplo de Rede de linha reta.....	18
FIGURA 8: Exemplo de Rede tipo Árvore.....	19
FIGURA 9: Exemplo de Rede com Ciclos.....	19
FIGURA 10: Exemplo de um grafo direcionado.....	22
FIGURA 11: Os ciclos fundamentais de uma rede (Rios-Mercado et al., 2000)..	23
FIGURA 12: Diagrama esquemático simplificado do escoamento de gás da Bacia de Campos.....	28
FIGURA 13: Exemplo do método de crossover.....	32
FIGURA 14: Exemplo da ocorrência de mutação.....	33
FIGURA 15: Fluxograma do algoritmo genético híbrido.....	60

FIGURA 16: Fluxograma do algoritmo GRASP híbrido.....64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configuração de operação de compressores.....	61
Tabela 2. Resultados da Rede 01.....	68
Tabela 3. Resultados da Rede 02.....	68
Tabela 4. Resultados da Rede 03.....	69
Tabela 5. Resultados das Redes com 60 nós.....	69
Tabela 6. Resultados das Redes com 70 nós.....	69
Tabela 7. Resultados das Redes com 80 nós.....	70
Tabela 8. Resultados das Redes com 100 nós.....	70

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Matriz de incidência da rede de alta pressão	-
ABP	Matriz de incidência da rede de baixa pressão	-
B	Matriz de ciclos da rede de gasodutos	-
cA_i	Número de compressores da plataforma i	-
$capacomp_i$	Capacidade de compressão da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$comp_i$	Volume de gás comprimido da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$cons_i$	Consumo de gás interno da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$cons_{tc_i}$	Consumo de gás dos turbocompressores da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$cons_{tg_i}$	Consumo de gás dos turbogeradores da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$cons_{bp_i}$	Consumo de gás interno em baixa pressão da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
d_i	Déficit do sistema de compressão da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
D_j	Diâmetro do gasoduto j	pol
$demand$	Demanda de gás	$10^3 \text{ m}^3 / d$
Dif_{TorP}	Volume de gás abaixo do valor mínimo de entrega para venda (take or pay)	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$disp_i$	Gás disponível para venda da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$dispcomp$	Gás disponível para compressão da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
f_k	Fluxo de gás em alta pressão no duto k	$10^3 \text{ m}^3 / d$
f_{BP}	Vetor fluxo de gás em baixa pressão	
FC	Fator de conversão US\$ para R\$	$R\$ / US\$$
$FCBBL$	Fator de conversão do óleo de m^3 para bbl	bbl / m^3
KcA_{ij}	Capacidade unitária do compressor j da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
$KccA_{ij}$	Constantes associadas ao consumo de gás do compressor j da plataforma i	$10^3 \text{ m}^3 / d$
L	Comprimento do duto	km
M	Conjunto de dutos baixa pressão	-
N	Conjunto de vértices (nós)	-

N_f	Nós fonte	-
N_d	Nós demanda	
N_p	Nós de passagem	
P_f	Preço de venda do gás	$R\$ / 10^3 m^3 / d$
P_{glc}	Receita unitária do <i>gas lift</i>	$R\$ / 10^3 m^3 / d$
P_{inj}	Receita unitária do gás injetado	$R\$ / 10^3 m^3 / d$
p_i	Pressão no nó i	Kgf/cm^2
p_j	Pressão no nó j	Kgf/cm^2
PCR	Poder calorífico de referência	$Kcal/m^3$
PCS	Poder calorífico superior do gás	$Kcal/m^3$
$PGPCR$	Preço do gás no poder calorífico de referência	$R\$ / 10^3 m^3 / d$
$PRÓLEO$	Preço de venda do óleo	$US\$ / bbl$
$q_{água_i}$	Vazão de água da plataforma i	m^3 / d
q_{ga_i}	Vazão de gás associado ao óleo da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{garm_i}	Vazão de gás de reservatórios de armazenamento da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{gl_i}	Vazão de <i>gas lift</i> proposto da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{glc_i}	Vazão de <i>gas lift</i> calculado da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{gna_i}	Vazão de gás não associado da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{gst_i}	Vazão de gás liberado no surge tank da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
q_{gTi}	Vazão total de gás da plataforma i , incluindo q_{ga_i} , q_{gna_i} e q_{garm_i}	$10^3 m^3 / d$
q_{inj_i}	Injeção de gás na plataforma i para fins de armazenamento ou recuperação secundária.	$10^3 m^3 / d$
$q_{óleo_i}$	Vazão de óleo da plataforma i	m^3 / d
$quei_i$	Queima de gás na plataforma i	$10^3 m^3 / d$
$quei_{BP_i}$	Queima em baixa pressão na plataforma i	$10^3 m^3 / d$
$quei_{sti}$	Queima de gás proveniente do surge tank da plataforma i	$10^3 m^3 / d$
$receb_i$	Gás recebido pela plataforma i	$10^3 m^3 / d$
$receb_{bpi}$	Gás recebido pela plataforma i em baixa pressão	$10^3 m^3 / d$
$RGLI$	Razão gás líquido de injeção de <i>gas lift</i>	m^3 / m^3

$RUGL$	Receita Unitária do <i>gas lift</i>	$R\$/1000 m^3$
RGO	Razão gás óleo de produção	m^3/m^3
RS	Razão de solubilidade do óleo	m^3/m^3
s_{BPi}	Fluxos de saída de cada plataforma em baixa pressão – nó fonte i	$10^3 m^3/d$
s_i	Fluxos de saída de cada plataforma – nó fonte i	$10^3 m^3/d$
$transf_i$	Transferência de gás da plataforma i para outras plataformas para consumo ou injeção.	$10^3 m^3/d$
$transf_{bp_i}$	Gás transferido para outras plataformas em baixa pressão	$10^3 m^3/d$
$x_{CA_{ij}}$	Variáveis de decisão 0-1, que indicam o estado de operação do compressor j da plataforma i .	
W	Conjunto de vértices da rede de baixa pressão	-

RESUMO

O desenvolvimento desta Tese tem por objetivo solucionar o problema de planejamento de movimentação integrada de uma rede complexa de compressão e transmissão de gás natural associado em estado estacionário utilizando as equações definidas pelas relações na sua formulação original. O problema na tomada de decisões consiste em determinar a melhor configuração para operar os compressores e a rede, com o objetivo de obter o maior lucro possível da movimentação do gás do sistema integrado.

A estrutura matemática que define o problema de maximização do lucro da movimentação de gás na sua formulação original (modelo misto inteiro não linear) é complexa do ponto de vista da otimização. Em particular, sabe-se que este é um problema não convexo e NP-completo, isto é, neste caso, o tempo utilizado para solucionar o problema cresce exponencialmente com o número de variáveis. Além disso, a Função Objetivo e as restrições de perda de carga através dos gasodutos não são diferenciáveis.

A abordagem e algoritmos desenvolvidos utilizam as metaheurísticas GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* e Algoritmo Genético. Estas metaheurísticas proporcionam uma reformulação do problema deixando-o mais apto e simples para a busca de resultados.

Os resultados obtidos foram comparados com um software comercial que utiliza um algoritmo exato, o LINGO.

As metaheurísticas Algoritmo Genético e GRASP tiveram ótimos desempenhos. Todos os testes realizados com a rede original utilizando o LINGO resultaram em soluções piores que as metaheurísticas. Para comparação do LINGO com as metaheurísticas, foi necessário implementar alguns ajustes, garantindo que os níveis mínimos de demanda contratual sempre fossem atingidos (de forma que não necessitasse pagar multa por não satisfazer a demanda, assim, a Função Objetivo comportou-se de forma diferenciável). Por outro lado, uma vez conhecidos

os resultados dos sentidos dos fluxos através das soluções das metaheurísticas podemos também reorientar convenientemente as direções dos gasodutos para garantir o fluxo positivo, tornando diferenciáveis as restrições para o LINGO.

ABSTRACT

The development of this Thesis has the goal to solve the steady state problem of an integrated natural gas network balance planning using all of the equations on its original formulation. The problem of this planning consists of determining the best configuration to operate these compressors and the pipeline network, with the goal of obtaining the largest possible profit of the integrated gas balance system.

The mathematical structure that defines this profit maximization problem of the gas balance planning is very complex. In particular, we know that this problem is considered nonconvex and NP- complete. A direct implication of this result is that the time used by any algorithm to find the global optimized solution of the problem grows exponentially with the number of variables. Another problem to find a solution using an exact algorithm is the fact that the objective function and the pressure drop constraints are nondifferentiable.

To solve these difficulties we used the metaheuristics GRASP and Genetic Algorithm. These metaheuristics provide a reformulation of the problem, resulting in a system reliable and simple for the search of results.

The performance of metaheuristics: GRASP and Genetic Algorithm was compared with commercial software that uses an exact algorithm, LINGO.

The metaheuristics Genetic Algorithm and GRASP had very good performance. All numerical tests resulted negative flows in the original network using metaheuristics. Using LINGO with original network the optimization solution was always worse than metaheuristics. Then, to make effective comparison of LINGO with metaheuristics, only was possible to be implemented doing some adjusts, making sure that the take or pay level always were reached (never paying a take or pay fine, the objective function become differentiable). On the other hand, once the optimum network flow directions were reached with metaheuristics solutions, we could redirect the pipelines network, becoming the restrictions differentiable to the LINGO.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do problema

Um sistema de produção de óleo e gás *offshore* compreende um determinado número de reservatórios, plataformas de produção, e gasodutos interligados a um destino final. Neste tipo de problema o interesse das companhias de petróleo é maximizar o lucro da movimentação de gás, atender as demandas, além de satisfazer os níveis de pressão e capacidades nos diversos nós.

O planejamento da movimentação e utilização de gás natural produzido por plataformas, que têm um sistema de escoamento integrado por gasodutos comuns, é complexo, envolvendo uma grande quantidade de variáveis operacionais, tais como: diferentes níveis de produção ao longo do horizonte de planejamento, disponibilidade de compressores, capacidades operacionais de gasodutos, e equipamentos, demanda de gás, eventos estatísticos que causam queima de gás, preços de venda de óleo e gás, custos, etc.

Estas variáveis operacionais podem gerar várias soluções, para os destinos do gás disponibilizados de cada plataforma:

- Gás disponibilizado para venda, isto é, a parcela do volume de gás produzido e comprimido em alta pressão, que for enviado para o ponto final de venda ou distribuição.
- Gás injetado ou produzido de reservatórios de armazenamento, que é uma quantidade de gás que é reinjetada em reservatórios próprios com o objetivo de formar um estoque de gás para garantir um equilíbrio entre a oferta e demanda de gás.
- Gás reinjetado para recuperação secundária, com objetivo de manter o reservatório pressurizado e assim, contribuir para o aumento da produção de óleo e gás;
- Gás para elevação artificial (*gas lift*), que é o gás comprimido a alta pressão que é injetado na coluna de produção em uma determinada profundidade para elevação artificial, isto é, para diminuir o gradiente de

pressão da coluna de óleo. O *gas lift* aumenta a produção de óleo, o que contribui para o aumento da receita do sistema de compressão;

- Gás consumido na plataforma, para movimentar os turbocompressores, turbogeradores e outros equipamentos como fornos e fornalhas;
- Gás transferido para maximizar o aproveitamento das folgas das capacidades de compressão das plataformas e para atender necessidades de consumo e injeção de outras plataformas com déficit de gás;
- Gás queimado devido à extrapolação da movimentação de gás acima da capacidade operacional dos equipamentos do sistema de compressão ou escoamento de gás.

Por outro lado, cada plataforma (unidade funcional) é gerenciada separadamente, com a tarefa de obter o melhor retorno financeiro, desenvolvendo assim, objetivos próprios. Os objetivos das diferentes plataformas nem sempre são concordantes. A alteração na movimentação de gás de uma plataforma poderá afetar a movimentação e objetivos próprios das demais. Assim, além do gerenciamento de cada unidade, deve-se ter um planejamento de movimentação de gás centralizado, podendo-se definir melhor a estratégia de movimentação de gás do sistema, levando-se em consideração a compatibilidade entre a oferta e a demanda de gás.

O planejamento da movimentação de gás deverá ser realizado para todas as fases de desenvolvimento da produção destas plataformas, visando o máximo lucro possível, minimizando a queima de gás.

As restrições são os obstáculos encontrados durante o percurso do gás desde a sua produção, até atingir o seu destino final nas condições de operação. As restrições definem valores permissíveis ou extensões para as variáveis, e especificam relações entre as variáveis. São exemplos de restrições, as limitações de capacidade e pressão do sistema de compressão e dos gasodutos.

A partir da previsão de produção de gás, da necessidade de *gas lift*, além de um detalhado estudo de demanda de gás, devem-se verificar as futuras restrições na malha de escoamento e do sistema de compressão. Tais levantamentos são

importantes para antecipar, com obras e projetos, essas limitações, evitando com isso a queima de gás.

Ao mesmo tempo, é importante que os custos operacionais e investimentos sejam considerados, visando o objetivo de aumentar o lucro da empresa. Os resultados do planejamento de gás de longo prazo incluem a eliminação dos problemas futuros, detectados durante as simulações de movimentação.

Para otimizar a movimentação de gás leva-se em consideração, além do balanço volumétrico nas condições padrão (Temperatura de 20° C e Pressão de 1 atm), também os parâmetros econômicos, tais como: preço do petróleo e do gás natural, custos envolvidos na compressão, tratamento, transporte, injeção do gás, etc.

Um sistema de equações e inequações mistas inteiras não lineares são utilizadas para modelar a Função Objetivo e as restrições. As variáveis poderão assumir certo intervalo de valores, que poderão ser números reais, inteiros ou binários (são permitidos valores de 0 ou 1). As restrições lineares expressam as equações de conservação de fluxo em cada nó da rede, que são as equações de balanço nas plataformas e também nos nós da rede de gasodutos. As restrições não lineares dão a relação entre o fluxo em cada arco e a pressão entre as suas duas extremidades.

A Função Objetivo mede a performance de um dado conjunto de soluções viáveis. A Função Objetivo utilizada neste problema é a função lucro da previsão integrada da movimentação de gás.

A estrutura matemática que define este problema de maximização do lucro da previsão de movimentação de gás na sua formulação original (modelo misto inteiro não linear) é complexa do ponto de vista de otimização. Em particular, sabe-se que este é um problema não convexo (De Wolf, 2003) e NP-completo (Bemporad et al., 1999; Rios-Mercado et al., 2004), i.e., neste caso, o tempo utilizado para solucionar o problema cresce exponencialmente com a dimensão do problema. A Função Objetivo e as restrições de perda de carga nos gasodutos são não

diferenciáveis, e desta forma os métodos clássicos de programação não linear (Método do Gradiente, método do gradiente conjugado, etc.) não poderão ser aplicados diretamente ao problema.

1.2. Objetivo da Tese

Os objetivos centrais da tese são:

- Desenvolver modelos computacionais de otimização para solucionar o problema de maximização do lucro do planejamento integrado de compressão e escoamento de uma rede complexa de gasodutos, contendo vários ciclos, na sua formulação original mista inteira não linear.
- Testar a robustez destes modelos comparando-os entre si e com algoritmos exatos quando possível, utilizando dados de compressores e redes de escoamentos reais da indústria do Petróleo e gás natural.

Nesta tese se pretende analisar e avaliar algumas técnicas que poderão contribuir para um melhor desempenho de otimização e que poderão ser aplicados ao problema de planejamento de movimentação de gás.

1.3. Roteiro

O desenvolvimento deste trabalho é uma continuidade da Tese de Mestrado (Iamashita, 2002), cujo objetivo é solucionar algumas das dificuldades do modelo atual utilizado na PETROBRAS e incorporar novas ferramentas e metodologias para aumentar a precisão e confiabilidade do processo de planejamento da movimentação de gás.

Realizou-se uma análise bibliográfica, para efetuar um amplo levantamento das pesquisas já realizadas nesta área (Ver Capítulo 2).

Verificou-se que as pesquisas anteriores, geralmente focavam problemas de minimização de consumo de gás em redes com estações recompressoras e que estas soluções não poderiam ser aplicadas diretamente ao nosso problema. O planejamento de movimentação de gás de sistemas de produção *offshore* tem diversas particularidades. Assim, foram estudadas novas metodologias para resolver este problema.

Neste estudo foram desenvolvidos dois sistemas híbridos para resolver o problema do planejamento da movimentação de gás na sua formulação original, utilizando as metaheurísticas: algoritmo genético e GRASP. A definição da melhor configuração de operação dos compressores foi realizada utilizando as técnicas heurísticas. Os balanços de fluxo e pressão no gasoduto, que determinam o grau de adaptação dessas soluções, foram realizados com técnicas exatas.

Foram realizados diversos testes destes algoritmos através da rede de gás da Bacia de Campos e também de redes virtuais com diferentes graus de complexidade e com variações no número de plataformas, nós, gasodutos, ciclos e compressores.

Para comparação dos resultados dos algoritmos híbridos, utilizou-se também o otimizador LINGO, com o objetivo de se verificar a precisão, estabilidade e o tempo de processamento dos modelos e algoritmos desenvolvidos.

Diversos testes apresentados ao final deste trabalho demonstram a excelente performance dos algoritmos heurísticos aqui desenvolvidos.

1.4. Contribuições

A contribuição científica deste trabalho se baseia:

- Na aplicação de um procedimento heurístico de algoritmo genético na solução do problema de grande porte de planejamento da movimentação de gás, na sua formulação original mista, inteira não linear contendo não convexidade e não diferenciabilidade no espaço de soluções;
- Na aplicação de um procedimento heurístico de algoritmo GRASP na solução do problema de grande porte de planejamento da movimentação de gás, na sua formulação original mista, inteira não linear contendo não convexidade e não diferenciabilidade no espaço de soluções;
- Comparação e avaliação dos resultados destes algoritmos com o modelo exato, através da utilização de premissas complementares que tornassem possível, a utilização do algoritmo exato.
- Na comprovação prática destes modelos heurísticos desenvolvidos, através de testes computacionais que resultaram em soluções rápidas, simples e de alta qualidade que poderão ser utilizados tanto para o planejamento como para o dimensionamento de redes complexas de compressão e escoamento de gás.

1.5. Justificativa da Tese

Nesta tese, estamos buscando formas de solucionar algumas dificuldades que ainda temos no principal sistema utilizado atualmente na Indústria de Petróleo da América do Sul para resolver este tipo de problema, devido a linearização da equação da perda de carga através da malha de gasodutos. Em Castro et al. (2000), a equação de Weymouth é linearizada, aproximando-a pela equação de seu plano tangente, em um ponto típico de operação (representando o equilíbrio entre a pressão à montante e a pressão à jusante do gasoduto para um determinado fluxo de gás). Esta linearização traz erros no cálculo de fluxos e equilíbrio de pressões através dos gasodutos na medida em que os fluxos otimizados se distanciam do ponto típico de operação.

Este estudo visa proporcionar um melhor entendimento do assunto, desenvolvendo novos métodos para solucionar o problema da previsão de movimentação de gás. Para efeito de aplicação, usamos dados simulados provenientes da Bacia de Campos.

Assim, o desenvolvimento deste módulo de planejamento integrado da movimentação de gás irá proporcionar maior segurança no planejamento desses sistemas.

Para a indústria do Petróleo, a otimização do aproveitamento de gás irá melhorar as receitas, conseqüentemente o seu lucro e também a sua imagem perante a sociedade. Com um melhor planejamento da movimentação de gás, através de informações precisas e detalhadas, podem-se obter melhores índices de aproveitamento do gás, intensificando a confiabilidade da oferta, para assim negociar melhores contratos de venda, aumentando assim a lucratividade.

A diminuição da queima causará menor emissão de CO₂ para a atmosfera, além de um melhor aproveitamento dos recursos naturais, economizando outras formas de energia, o que deverá ser percebido pela sociedade e os órgãos ambientais. A utilização adequada do gás trará economia de divisas para o país, pela diminuição da importação de combustíveis.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O processo de compressão e escoamento de gás

Consideramos o nosso sistema em estado estacionário, na qual as variáveis consideradas são independentes do tempo. O problema se modela matematicamente como um problema de otimização misto inteiro não linear. Para um melhor entendimento do processo podemos dividir o processo em duas etapas:

- A movimentação de gás na plataforma;
- A movimentação de gás através da rede de gasodutos.

O problema é constituído de variáveis inteiras que definem o modo de operação dos compressores e as restrições de fluxo nos gasodutos que definem um conjunto não linear e não convexo (Morales, 2002), além da grande quantidade de variáveis e equações.

2.1.1. A movimentação de gás na plataforma

Para ilustrar a movimentação de gás nas plataformas, começaremos descrevendo brevemente o processo de produção de gás.

O gás natural é a porção do petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições de reservatório (altas pressões e temperatura), e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura.

Um reservatório é constituído por uma formação rochosa porosa ou altamente fraturada onde se acumula o petróleo (ver Figura 1).

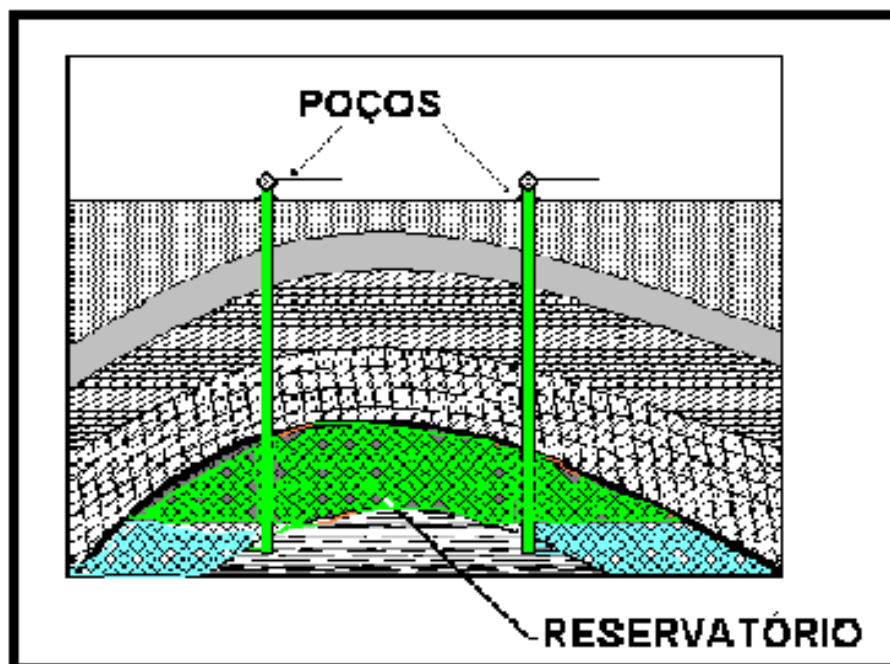


FIGURA 1: Reservatório de óleo. Fonte: Adaptado de (Rosa et al., 2006).

O óleo e o gás associado são produzidos através dos poços produtores. Na coluna de produção, também pode ser injetado o gás lift. O gás lift é um gás que é injetado a uma determinada profundidade na coluna de produção com o objetivo de reduzir o gradiente gravitacional do óleo produzido, aumentando assim a produção do mesmo (ver Figura 2).



FIGURA 2: Esquema de Gás Lift contínuo e intermitente. Fonte: (Weatherford, 2006).

Na plataforma, o gás associado produzido com o *gas lift* é separado do óleo e da água através dos separadores de produção e separadores atmosféricos (*surge tank*). Os separadores de produção trabalham numa pressão de 8 a 12 Kgf/cm². O óleo com gás em solução, quando sai dos separadores de produção, é direcionado para o separador atmosférico.

No separador atmosférico, o gás remanescente no óleo é separado em pressão próxima da atmosférica. Este volume de gás é previsto a partir de dados de

razão de solubilidade do óleo (RS) na pressão em referência, multiplicado pelo volume de óleo.

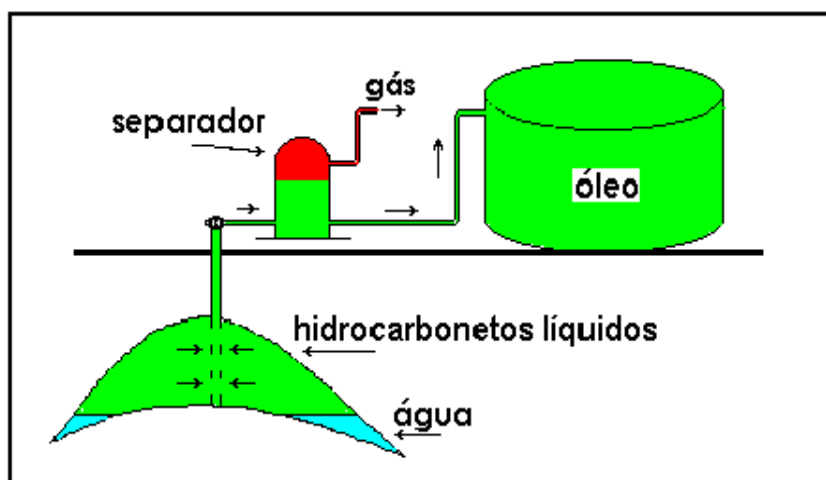


FIGURA 3: Esquema do processo de separação do gás. Fonte: (Rosa et al., 2006)

Algumas plataformas poderão ter poços que produzem gás não associado ao óleo (ver Figura 4). Em função da característica de pressão de produção, estes poços de gás não associado podem produzir com pressão suficiente para serem escoados para o ponto de venda, sem necessidade de compressão.

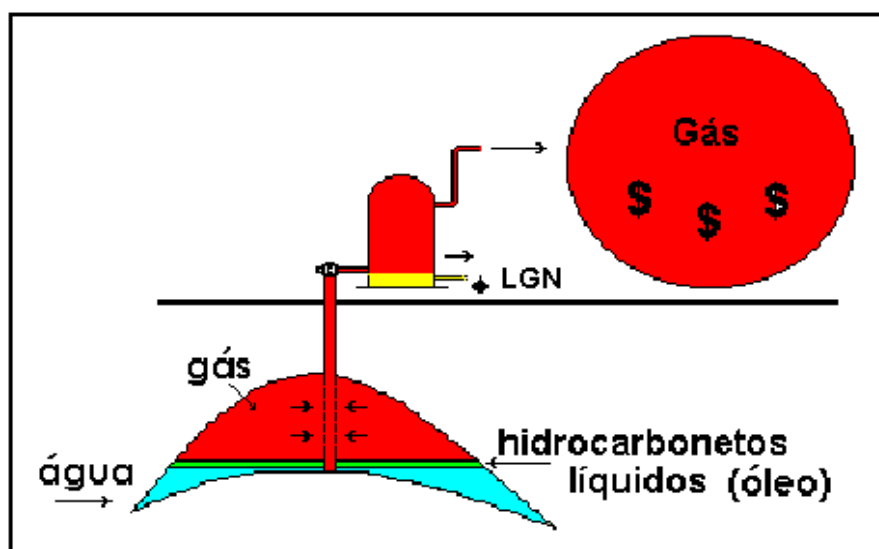


FIGURA 4: Esquema da produção de gás não associado. Fonte: (Rosa et al., 2006)

Quando a pressão do reservatório de gás não associado declinar para um valor que não seja mais possível a sua produção diretamente para o vaso de alta pressão para exportação, será necessário direcionar este poço para o vaso de baixa pressão, para que se possa aproveitá-lo através das facilidades de compressão da plataforma.

O gás proveniente do separador atmosférico é comprimido através de uma bateria de motocompressores até uma pressão suficiente para que seja possível a sua sucção pelos turbocompressores, juntamente com o gás proveniente dos separadores de produção (ver Figura 5).

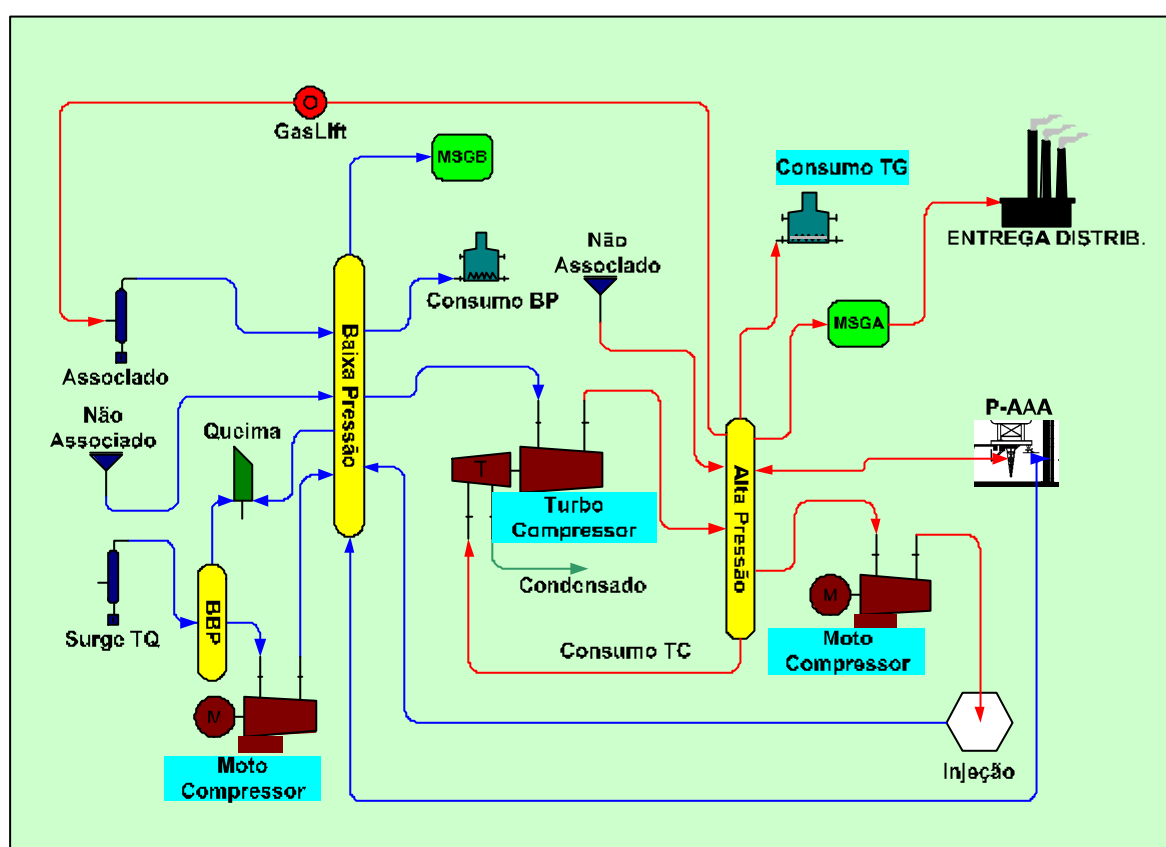


FIGURA 5: Esquema do sistema de compressão de gás de uma plataforma.

Os compressores são os equipamentos responsáveis pelo aumento de pressão para que o gás possa ser utilizado no consumo em alta pressão, injeção para *gas lift*, injeção (para recuperação secundária ou de armazenamento), ou transferido para venda através dos gasodutos. Os compressores que estarão

operacionais no período poderão consumir gás em alta pressão, ou diesel para efetuar o trabalho de elevação de pressão do gás. Alguns compressores também poderão ter acionamento elétrico de seus motores. O número ótimo de compressores operacionais para cada plataforma irá depender do volume de gás disponível para compressão e também da capacidade de compressão individual. Cada plataforma tem uma pressão máxima de descarga da bateria de compressores associada à sua capacidade.

Também é comum a utilização de compressores adicionais, para elevar a pressão do gás, de forma a poder ser injetado em reservatórios de armazenamento. Este mesmo sistema de compressão poderá ser utilizado para compressão do gás injetado, produzido quando a demanda de gás para venda for grande.

A eficiência do sistema de compressão depende muito da existência ou não de compressores reserva. Outro fator importante é ter um bom índice de disponibilidade destes equipamentos. Assim, as previsões de manutenção programada, manutenções corretivas e o histórico de eficiência dos compressores deverão ser considerados para corrigir a limitação da capacidade de compressão do sistema. A figura 6 mostra o esquema de uma bateria de compressores.

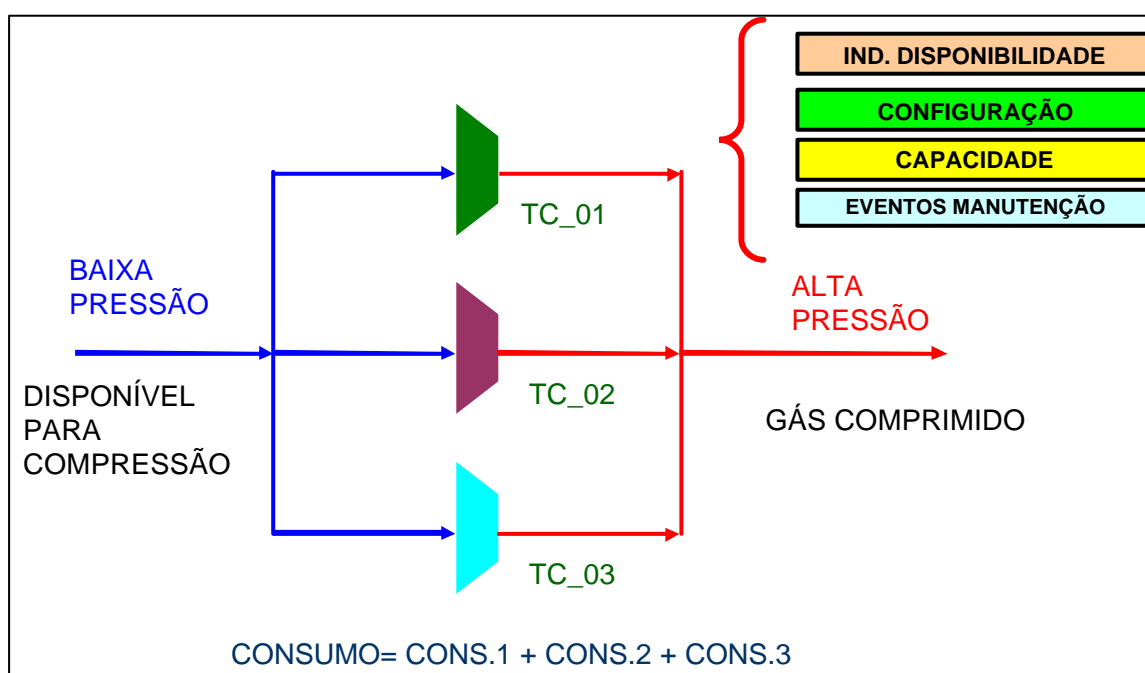


FIGURA 6: Bateria de compressores de uma plataforma.

Pode-se, também, ter interligação em baixa e média pressão entre duas ou mais plataformas, para o gás excedente ser comprimido em outra plataforma que tenha capacidade de compressão disponível.

Também o gás em solução (calculado a partir da Razão de solubilidade - R_s na pressão de separação multiplicado pela vazão de óleo produzida), que poderá ser escoado para outra plataforma, à jusante. Este gás residual poderá ser separado do óleo e comprimido nesta plataforma.

Em algumas plataformas existe o sistema de bombeamento multifásico, que compreende o bombeamento do óleo em fluxo multifásico (isto é, juntamente com o gás e água), para ser transferido para uma outra plataforma. Assim, também poderemos ter o processo de transferência de gás e óleo em fluxo multifásico através de alguns gasodutos. O objetivo principal, neste caso, é a transferência deste gás para uma outra plataforma, com capacidade de compressão adicional, para possibilitar a sua compressão e, conseqüentemente, o seu aproveitamento.

Algumas plataformas poderão produzir gás ácido, contendo H_2S (ácido sulfídrico). Este necessita receber tratamento adicional, para evitar corrosão de equipamentos e gasodutos. Para este tratamento, utiliza-se a unidade de *MEA* (*monoetanolamina*) ou seqüestrante de H_2S , que acarretam um maior custo agregado a este tipo de gás.

Outro tipo de tratamento que o gás natural deve receber é a eliminação da umidade, para evitar a formação de hidratos, principalmente em plataformas posicionadas em locais de elevada profundidade de água, em função da baixa temperatura da água nestas profundidades.

A infra-estrutura de estocagem de gás natural tem como objetivo possuir um mecanismo, capaz de atuar como ferramenta reguladora do mercado. Isto é, quando se tem uma oferta de gás maior que a demanda, o gás será injetado nestes reservatórios. Quando a demanda de gás for maior que a oferta, este gás injetado poderá ser produzido para atendimento do mercado consumidor.

Nos sistemas com grande número de plataformas que produzem gás associado ao óleo, não existe correlação entre a produção de óleo e o mercado consumidor de gás. Ou seja, não é comum se postergar um projeto de produção de óleo, em virtude de não haver demanda para o gás associado produzido. A solução, neste caso, é a injeção de gás para armazenamento e em última hipótese a queima. A instabilidade da planta de processo também pode ser um motivo de queima elevada na plataforma, principalmente quando é causada por golfadas severas de poços.

As plataformas com sistema de injeção de gás, ou que produzem pouco gás, com consumo elevado, geralmente estão interligados com a malha para recebimento de gás de outras plataformas, para o atendimento das suas necessidades.

Os problemas de instrumentação e automação também podem causar perdas de gás, através de quedas e falhas do sistema de geração de energia elétrica, alarmes indevidos e *ESDs (Emergency shut down)*, que é a queda do sistema de geração de energia da planta de processo por problemas de segurança.

Em resumo, os parâmetros da movimentação de gás nas plataformas são:

- Produção de gás associado e necessidade de *gas lift*;
- Volume adicional de óleo produzido;
- Capacidade, número de compressores de gás e pressão de descarga;
- Variáveis inteiras (0-1) que definem a operação de máquinas nas baterias de moto e turbo compressores;
- Consumo de gás;
- Queima de gás;
- Características do gás produzido: densidade e poder calorífico;
- Características dos reservatórios de injeção para armazenamento e para recuperação secundária;
- Características de produção dos poços de gás não associado.

Dentre outros motivos de queima de gás, podemos destacar problemas em gasodutos, formação de hidratos, vazamentos, etc.

2.1.2. A movimentação de gás através da rede de gasodutos

Em relação à movimentação de gás através da rede de gasodutos, deve entender-se que é o gás natural excedente nas plataformas escoado através desta rede, até o ponto final de venda. Nesta fase é analisada a rede integrada de gasodutos:

(a) Parâmetros:

- Conjunto de nós (N), dividido por sua vez em três subconjuntos: nós fonte (N_f) (são as plataformas que alimentam de gás a rede de gasodutos), nós demanda (N_d) (centros de entrega de gás) e nós de passagem (N_p).
- Conjunto de arcos na rede (A), composto pelos dutos direcionados (A_p) (arcos por onde se transporta o gás).
- Limites de pressão em cada nó. Pressão máxima no nó i (p_i).
- Vetor fonte $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_n)^T$. Quantidade de oferta dos nós de alimentação ($s_i > 0$) e quantidade de fluxo que se entrega nos nós de demanda ($s_i < 0$). Para os nós de passagem ($s_i = 0$).
- Propriedades físicas de cada duto: constante de duto $c_k = \frac{1}{k_{wk}^2}$, sendo o k_{wk} fator que depende dos seguintes parâmetros: de fricção (f), comprimento do duto (L), diâmetro interno do duto (D), temperatura do duto (T) e características do gás.

(b) Variáveis: As variáveis que são consideradas nesta análise são s_i (fonte do nó i), f_k que é o fluxo de gás no duto k localizado entre os nós (i, j) ; e p_i é a pressão do gás no nó i ;

(c) Restrições do problema: As limitações que se impõem aos valores que podem tomar as variáveis de decisão:

- Balanço de fluxo de massa em cada nó da rede. Em cada nó, a diferença entre a quantidade que sai e a que entra é igual ao fluxo nodal líquido dado por s_i . Um valor positivo (negativo, zero) de s_i indica que o nó i é fonte (demanda, passagem). Se supõe que é uma rede balanceada: $\sum s_i = 0$, isto

é, o valor alimentado deve ser igual ao valor retirado do sistema nas condições padrão.

- Capacidade de fluxo de gás em cada duto. Fluxo máximo que pode passar por cada duto.
- Fluxo de gás através de cada duto. Restrição de igualdade não linear e não convexa que representa a relação entre a perda de carga e o fluxo através do gasoduto. Esta restrição neste nosso sistema está representada pela equação de Weymouth (De Wolf, 1996).
- Variação de pressão permissível. Estes limites de pressão são definidos pelo projeto, mas no nosso estudo consideramos que para podermos escoar o gás disponível até o seu destino final, a pressão nos nós de alimentação não deverá ultrapassar a pressão de descarga dos compressores.

Alguns gasodutos podem ter sentidos duplos. Em alguns períodos, podem ter fluxo de gás em uma direção, e em outros períodos, poderão ter fluxo em outra direção, dependendo da distribuição das cargas no sistema.

Para as redes cíclicas, o balanço de fluxos e pressões é realizado utilizando o método de Newton-Raphson. Para este caso, este balanço permite o cálculo da distribuição equilibrada de fluxos de gás através dos gasodutos de tal forma que ao percorrer qualquer caminho possível entre dois nós que pertencem a este ciclo, a perda de carga tenha sempre o mesmo valor.

No Método de Newton-Raphson a cada iteração determina-se o hiperplano tangente ao politopo determinado pelos sistemas de equações no ponto inicial. O processo é semelhante ao caso escalar e utiliza a expansão em Série de Taylor vetorial no ponto $\mathbf{x}^{(0)}$.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{F}'(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}) + \dots + \frac{1}{n!} \mathbf{F}^{(n)}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)})^n + \mathbf{O}(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}\|^{n+1}) \quad (1)$$

Igualando-se a zero, e considerando aproximação de primeira ordem somente, e considerando:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{F}'(\mathbf{x}^{(0)}), \quad (2)$$

chega-se ao processo iterativo para sistemas de equações não-lineares:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

que de forma genérica torna-se um processo iterativo:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - [\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4)$$

Observe que se tem um sistema de equações lineares. Em cada iteração do Método de Newton-Raphson para sistemas de equações, resolve-se um sistema de equações lineares.

Entre os primeiros trabalhos desenvolvidos sobre algoritmos de otimização, para a minimização do custo de combustível em estado estacionário está o trabalho de Wong e Larson (1968), para transmissão de gás em redes de linha reta, usando técnicas de Programação Dinâmica (DP, do inglês *Dynamic Programming*). Na Figura 7, podemos ver um exemplo de rede de linha reta.

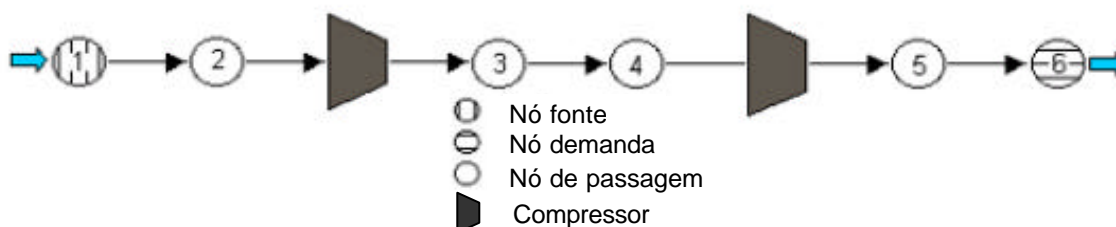


FIGURA 7: Exemplo de Rede de linha reta. Fonte: (Zaleta, 2003)

Depois, Lall e Percell (1990) apresentaram um algoritmo de DP que podia resolver problemas com diversos ramais ou topologia de árvore (ver Figura 8), e incorporaram ao modelo a variável de decisão para representar o número de unidades que seriam operadas.

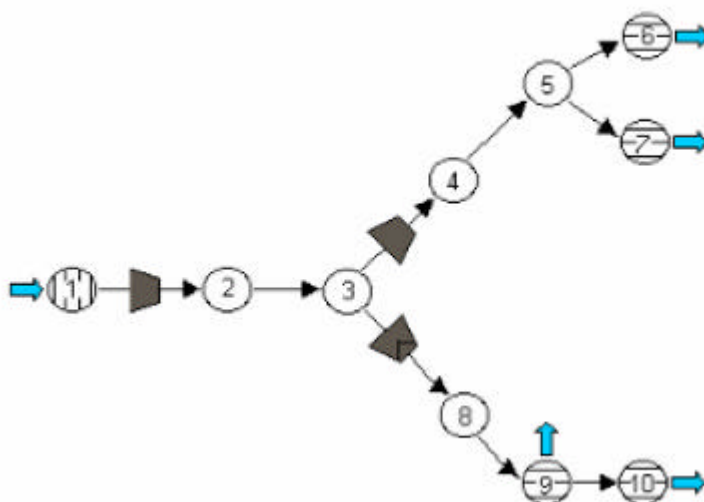


FIGURA 8: Exemplo de Rede tipo Árvore. Fonte: (Zaleta, 2003)

Mais recentemente, foi desenvolvido um algoritmo de DP não seqüencial para manejar redes com ciclos (Carter, 1998) (ver Figura 9), quando as variáveis de taxa de fluxo estavam fixas.

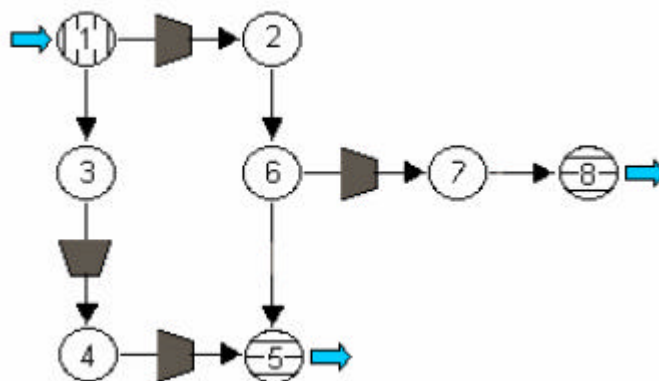


FIGURA 9: Exemplo de Rede com Ciclos. Fonte: (Zaleta, 2003)

Uma das vantagens de DP é a busca do ótimo global, e é de fácil manejo da não convexidade. As desvantagens de usar DP são que sua aplicação está praticamente limitada a estruturas de redes simples, tais como estruturas de linha reta e árvore, e que o esforço computacional se incrementa exponencialmente segundo as dimensões do problema (Zaleta, 2003).

Kim et al. (2000) estenderam o trabalho de Carter (1998) propondo um algoritmo que iterativamente ajustava a variável fluxo de forma heurística, para resolver o problema em topologias com ciclo, baseado em um procedimento iterativo de duas etapas. Na primeira etapa, as variáveis de fluxo de gás estão fixas e as variáveis de pressão ótimas são encontradas usando DP. Na etapa posterior, as variáveis de pressão são fixadas e se tenta encontrar um conjunto de variáveis de fluxo que melhoram o valor da Função Objetivo, explorando a estrutura fundamental da rede.

Percell e Ryan (1987) atacaram o problema usando o método do gradiente reduzido generalizado (GRG por suas siglas em inglês *Generalized Reduced Gradient*) para a otimização não linear. O método GRG diminui o problema de dimensionalidade e pode ser aplicado a redes com ciclos. Como o método GRG é baseado em um método de busca por gradiente, não é garantido que se encontrará o ótimo global, especialmente na presença de variáveis discretas de decisão e pode resultar em um ótimo local.

Flores-Villarreal e Rios-Mercado (2003 e 2003a) ampliaram este estudo mediante uma extensa avaliação computacional do GRG em uma diversa base de dados do problema.

Wu et al. (1996) apresentaram um modelo matemático para a minimização do custo de combustível em uma estação compressora com uma única unidade. Wu et al. (1998), estudaram o mesmo problema, mais ampliado para manejar as estações compressoras com múltiplas unidades em cada estação compressora.

Por outro lado, muitas simulações numéricas de redes de gasodutos têm sido desenvolvidas desde o século passado e os resultados agora são mais exatos com ajuda do aumento da velocidade do processamento dos computadores (Osiadacz, 1987).

Em estudos mais recentes, Ríos-Mercado et al. (2002) fazem uso dos resultados de teorias de grafos e análise funcional, baseando-se na pesquisa sobre a minimização do consumo de combustível de Wu et al. (1998). Demonstra-se a

existência da solução única para um sistema de equações algébricas não lineares que surgem dos fluxos de uma rede de transporte, concluindo com um método de decomposição da rede. Este método apresenta como característica relevante a diminuição do tamanho da rede, sem alterar sua estrutura matemática.

Alguns conceitos relacionados à teoria de grafos ajudam a tornar mais conveniente a formulação do modelo (Rios-Mercado et al., 2000). Um grafo é um conjunto de pontos, chamados de vértices (ou nós), conectados por linhas, chamadas de arestas (ou arcos). Um **grafo orientado** é um grafo G com um conjunto N de vértices (nós) e um conjunto D de arcos podendo ser indicado por $G = (N, D)$. Cada um dos arcos está associado a um par ordenado de vértices sendo o primeiro a extremidade inicial do arco e o outro a sua extremidade final. Um **grafo não orientado** é o grafo em que a ligação entre quaisquer dois de seus vértices não tem orientação.

Para a solução do sistema de balanço da malha é necessário lembrar do conceito de *matriz de incidência* de uma rede. Considere uma malha com n nós e l dutos (trechos). Esta malha pode ser descrita por um grafo orientado (direcionado) $G = (N, D)$. A cada duto $k \in D$ com vértices (i, j) associa-se uma direção, do nó i ao nó j (que poderá ou não coincidir com a direção do fluxo de gás através do mesmo). A matriz de incidência \mathbf{A} do grafo G é uma matriz de dimensão $n \times l$ cujos elementos são dados por:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o duto } j \text{ sai do nó } i; \\ -1, & \text{se o duto } j \text{ entra no nó } i; \\ 0, & \text{em outro caso.} \end{cases} \quad (5)$$

Para ilustrar os conceitos acima e resultados, vamos mostrar um exemplo de um grafo direcionado $G = (N, D)$, mostrada na figura 10.

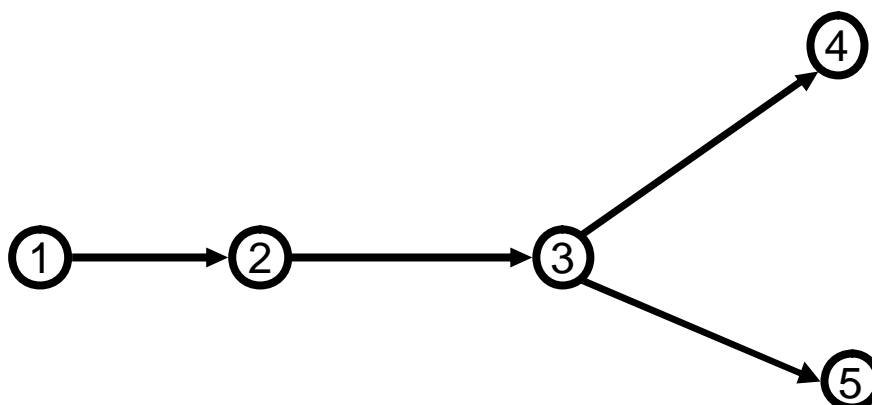


FIGURA 10: Exemplo de um grafo direcionado.

A matriz de incidência de G é dada por:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Considerando o grafo não orientado G' subjacente ao grafo G (i.e., o grafo que resulta da eliminação da direção dos arcos de G , em cujo caso os arcos denominam-se *arestas*), tem-se as seguintes definições: um *passeio* em G' é uma seqüência finita alternante de nós e arestas, que começa e termina em nós, de forma que cada aresta é incidente com os dois nós imediatamente precedente e seguinte da seqüência. Se um passeio é tal que cada nó aparece só uma vez, é chamado de *trajetória*. Uma trajetória que inicia e termina no mesmo nó é chamada de *ciclo*. O grafo G' se diz *conectado* (ou *conexo*), se existe ao menos uma trajetória entre cada par de nós do grafo. Uma *árvore* é um grafo conexo sem ciclos. Uma *árvore geradora* T do grafo G' é uma árvore que contem todos os nós de G . Dada uma árvore geradora T do grafo G' , todas as arestas de G' que não estão em T se denominam *cordas*. Sabe-se que quando se adiciona uma corda a uma árvore geradora T , o grafo resultante deixa de ser acíclico. O ciclo assim formado se chama *ciclo fundamental*. Neste trabalho, quando se faz referência a um ciclo no grafo

orientado G , deverá entender-se que se faz referência a um ciclo no grafo não orientado associado G' (Rios-Mercado et al, 2000).

Por outro lado, cada ciclo em G , depois de associar-lhe arbitrariamente uma orientação (horária ou anti-horária), pode ser visto como um ciclo “orientado” e representado por um vetor de componentes 1 , -1 ou 0 de acordo com a orientação de cada arco em G em relação ao ciclo. Isto pode ser representado pela *matriz de ciclos* \mathbf{B} , onde cada linha (coluna) corresponde a um vetor ciclo (arco) definido por:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o ciclo } i \text{ contém o arco } j \text{ e as orientações coincidem;} \\ -1, & \text{se o ciclo } i \text{ contém o arco } j \text{ e as orientações não coincidem;} \\ 0, & \text{se o ciclo } i \text{ não contém o arco } j. \end{cases} \quad (7)$$

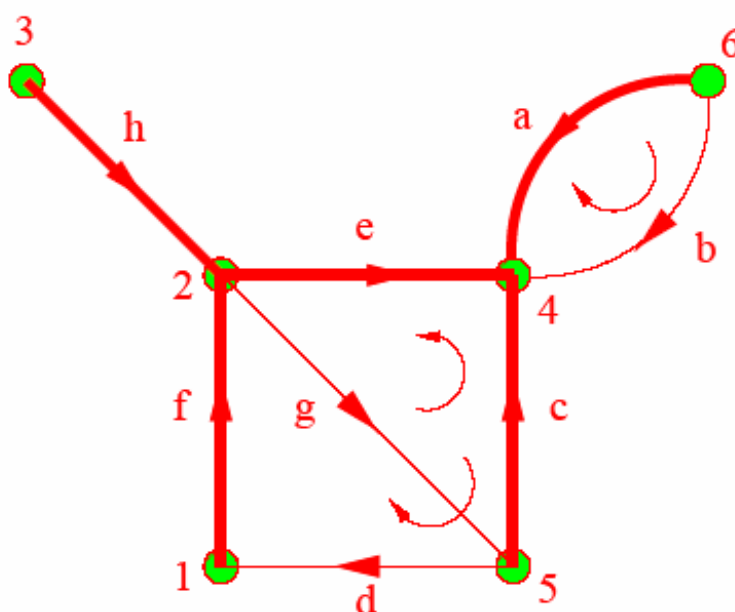


FIGURA 11: Os ciclos fundamentais de uma rede (Rios-Mercado et al., 2000).

Se considerarmos G' (a versão não orientada de G), nós podemos ver arestas $\{a, c, e, f, h\}$ formando uma árvore geradora T , que é indicada na figura 11 por uma linha mais espessa. Arestas $\{b, d, g\}$ são as cordas correspondentes a T . O número de ciclos fundamentais é $l-n+1 = 3$. Por exemplo, adicionando o arco b , forma-se o

ciclo $\{a, b\}$, adicionando a corda d forma o ciclo $\{c, d, f, e\}$, e adicionando a corda g forma o ciclo $\{c, e, g\}$. Para cada ciclo fundamental corresponde a uma corda. A correspondente Matriz de ciclos fundamentais reduzidos é dada por:

$$\mathbf{B}_f = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Vários aspectos do problema de transmissão de gás foram considerados por De Wolf (2003) sobre as propriedades matemáticas das formulações (que conta com a relação de fluxo de pressão não linear). De Wolf (2003) demonstra que o sistema de equações de fluxos e pressões através dos gasodutos é não linear e não convexa (De Wolf, 2003).

O problema de minimização de consumo de combustível por estações recompressoras em estado estacionário é grande, tanto em número de variáveis de decisão como no número de restrições, e muito complexo devido à presença de não linearidade e não convexidade no conjunto de equações de perda de carga através dos gasodutos. Estes problemas são denominados de grande porte (Rios-Mercado et al., 2000).

Os algoritmos de otimização para redes de gasodutos de topologia não cíclica estão em estágios bem desenvolvidos. Entretanto, algoritmos efetivos para topologias cíclicas são praticamente inexistentes. Embora seja verdade que a maioria dos sistemas de gasodutos pelo mundo tem estruturas não cíclicas, existem sistemas cíclicos importantes (Rios-Mercado, 2004).

É importante ressaltar que praticamente todas estas referências sobre otimização de redes complexas de gás não podem ser aplicadas diretamente em nosso problema. Estas pesquisas geralmente abordam problemas de otimização de redes com estações recompressoras, o que difere da proposta deste estudo em função da etapa preliminar de análise do sistema de compressão nas plataformas de origem, com diversas particularidades. Entre elas podemos destacar a utilização de

variáveis inteiras de acionamento dos compressores envolvidos, sendo este um problema de otimização misto inteiro não linear. Outras variáveis e sistemas de equações são utilizados para esta etapa, como por exemplo, o *gas lift*, injeção de gás para armazenamento e recuperação secundária, índice de disponibilidade de compressores, transferência de gás em baixa pressão, recuperador de vapor, etc.

2.2. Histórico do PLANGAS

Até o ano de 1998, a PETROBRAS utilizava planilhas para o cálculo da previsão de movimentação de gás. Este procedimento não permitia a otimização do sistema integrado, além de ficar sujeito a erros de manipulação de dados.

Com o desenvolvimento da Bacia de Campos cujo diagrama esquemático do sistema de produção e escoamento está mostrado na Figura 12, e conseqüente aumento do número de plataformas, a malha de escoamento de gás foi se tornando cada vez mais complexa, tornando a análise integrada da malha mais difícil e trabalhosa. Somado a isso, ocorreu uma cobrança crescente dos órgãos ambientais e governamentais para um melhor aproveitamento dos recursos naturais. Desse modo, houve necessidade de um planejamento mais detalhado, com análises mais sofisticadas, mais rápidas e de fácil detecção de possíveis erros.

A quebra do monopólio de petróleo, a criação da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o surgimento das parcerias com outras empresas, a negociação de ações na Bolsa de Valores de Nova Iorque e o aumento considerável do número de plataformas transformou este planejamento da movimentação de gás em um sistema complexo, com aumento significativo de informações e variáveis que necessitam se compor adequadamente, tanto para informações internas quanto externas.

A responsabilidade da precisão destas informações se tornou prioritária para melhorar as oportunidades de aumentar as receitas ou, no mínimo, evitar prejuízos provenientes de falhas no planejamento da movimentação de gás.

Assim, uma equipe de engenheiros, técnicos, programadores e analistas da PETROBRAS desenvolveu o PLANGAS (Sistema de planejamento operacional de médio e longo prazo do escoamento de gás), baseado em pesquisa operacional. Este sistema se encontra em utilização desde julho de 1999. O PLANGAS tem como finalidade alcançar uma melhoria do planejamento da previsão de movimentação de gás, buscando otimizar a eficiência do sistema de compressão e movimentação deste como um todo, além de minimizar os conflitos de interesses entre as plataformas com relação à movimentação de gás (Castro et al., 2000). Ver o equacionamento do modelo matemático do PLANGAS no apêndice B.

Atualmente, o PLANGAS está sendo utilizado como base para todo o planejamento anual e plurianual da movimentação de gás da Bacia de Campos, destacando-se entre eles, os Planos Anuais de Produção (PAP) e Planos de Desenvolvimento de Campos para a ANP, Valoração de Reservas para as Bolsas de Valores, e muitas outras utilizações.

Em 2002, foram realizados os testes do módulo otimizador do sistema PLANGAS (Iamashita, 2002). A metodologia utilizada para esta etapa incluiu o teste de performance de diversos softwares de otimização, entre eles: *What's The Best*, *LINDO*, *CPLEX*, *OSL*, *XPRESSMP/INTEGER* e *GLPK*. Foram analisadas situações de previsão de produção hipotéticas e dados reais da Bacia de Campos para teste. O otimizador que teve o melhor desempenho nestes testes foi o *CPLEX*.

E em 2003, a partir dos resultados e recomendações da Tese de Mestrado concluída na UENF/LENEP (Iamashita, 2002), o otimizador com melhor performance foi incorporado ao Sistema PLANGAS. Esta substituição trouxe melhorias significativas para o sistema, sendo as principais: maior estabilidade do processo, maior velocidade de otimização e conseqüentemente maior segurança na tomada de decisões com relação ao Planejamento da Movimentação de gás (Iamashita, 2003).

O cálculo da perda de carga através dos gasodutos é realizado através da linearização da equação de perda de carga de Weymouth (De Wolf, 1996; Chaves, 1999), ver detalhes no Apêndice C:

$$f_k = k_{mont} \cdot p_m - k_{jus} \cdot p_j + k_{ind}, \quad (9)$$

onde:

$f_k [10^3 \text{ m}^3/\text{d}]$ é o fluxo de gás através do gasoduto k ;

$k_{mont} [10^3 \text{ m}^3/\text{d} / (\text{kgf}/\text{cm}^2)]$ é a constante de linearização da pressão à montante;

$k_{jus} [10^3 \text{ m}^3/\text{d} / (\text{kgf}/\text{cm}^2)]$ é a constante de linearização da pressão à jusante;

$k_{ind} [10^3 \text{ m}^3/\text{d}]$ é a constante de linearização independente;

O banco de dados do sistema PLANGAS é alimentado com informações de equipamentos de compressão de gás, tais como: número de compressores, capacidade mínima, capacidade máxima, consumo, pressões de entrada e saída, razão gás líquido de injeção (RGLI), razão de solubilidade (RS), previsões de produção de gás, óleo e água. Também são alimentados todos os dados de gasodutos e pressões (França et al., 1999).

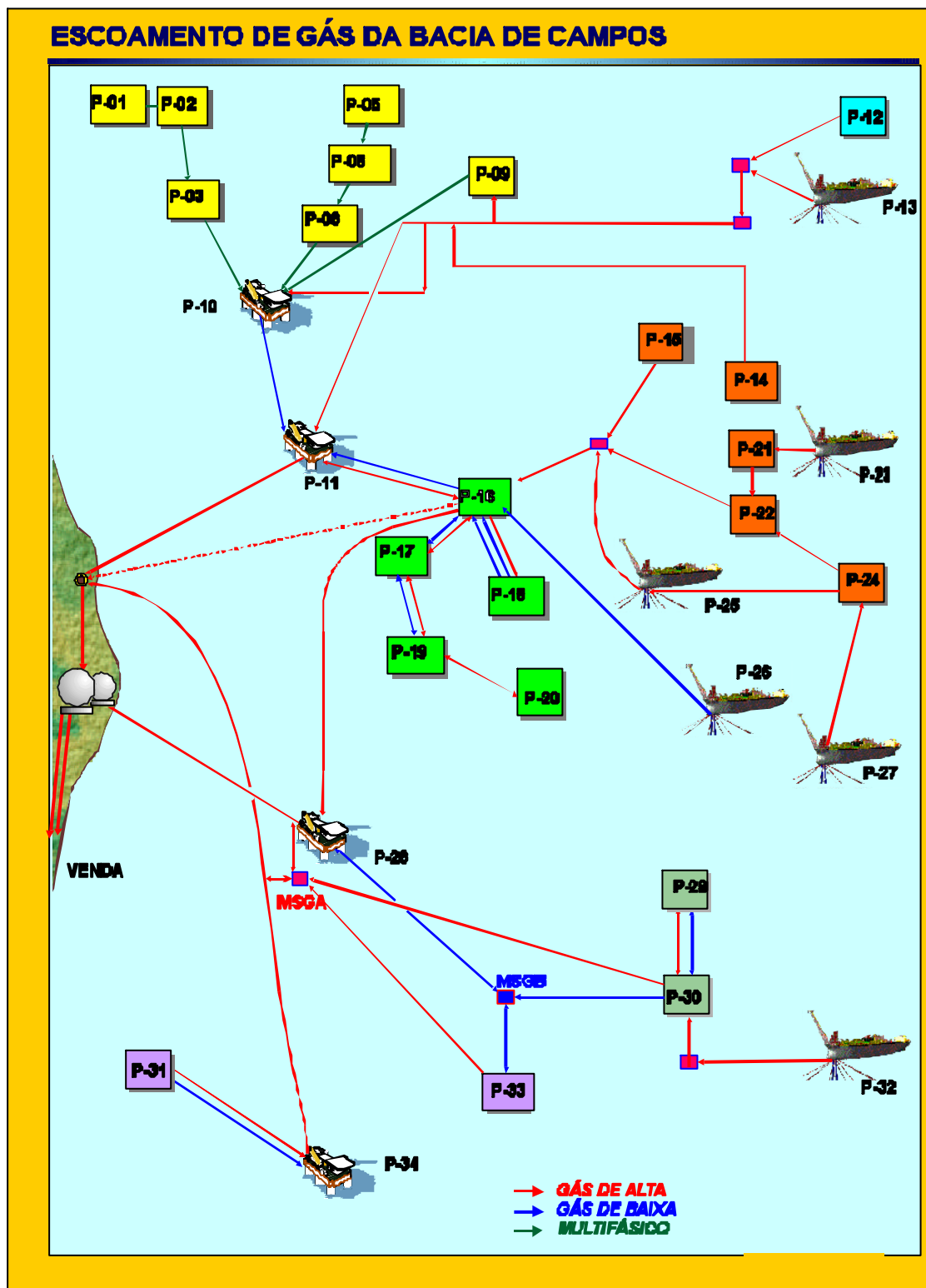


FIGURA 12: Diagrama esquemático simplificado do escoamento de gás da Bacia de Campos.

CAPÍTULO 3 – INTRODUÇÃO ÀS HEURÍSTICAS E METAHEURÍSTICAS

3.1. Heurísticas

Existe um tipo de algoritmo chamado de heurísticas (do grego *heuriskein*, que significa “encontrar”) cuja finalidade é encontrar soluções satisfatórias em um tempo razoável. Uma definição rápida dos métodos heurísticos é a seguinte: procedimentos simples, que oferecem uma boa solução (não necessariamente ótima) a problemas difíceis de um modo fácil e rápido (Zanakis & Evans, 1981).

O escasso rigor matemático com que foram originalmente qualificadas (ambos, término satisfatório e razoável, pertencem à ordem do subjetivo), foi superado por suas implicações práticas como ferramentas úteis para dar solução a problemas tradicionalmente complexos (Romenus, 2004).

Recentemente o interesse pelos métodos heurísticos vem aumentando consideravelmente, em virtude da necessidade de dar resposta a situações para as quais é preciso oferecer algum tipo de solução. Estas soluções, ao serem modeladas matematicamente são extremamente difíceis de resolver, ou, praticamente impossíveis de resolver. Os métodos heurísticos oferecem uma via para encontrar soluções de qualidade aceitável a estas situações.

Os problemas de decisão que normalmente se apresentam à comunidade empresarial, onde em geral existem recursos escassos, e requisitos mínimos a cumprir, exemplificam situações onde é necessário encontrar uma solução ótima ao problema apresentado. Este tipo de problema denomina-se problema de otimização.

Existe um tipo particular de problemas de otimização que são de grande interesse para os métodos heurísticos: os chamados problemas de otimização combinatória. Nestes problemas, as variáveis são inteiras e em geral o espaço de soluções está formado por ordenamentos ou subconjuntos de números naturais (daí o seu nome) (Diaz, 1996). Neste tipo de problema, cuja complexidade cresce exponencialmente com o número de variáveis, os métodos heurísticos buscam uma solução aceitável em um tempo razoável.

Uma heurística pode ser aplicada em diferentes circunstâncias, entre as mais apropriadas (Romenus, 2004):

- Não existe um método exato de solução;
- Não se requer a solução ótima;
- Os dados são pouco confiáveis, ou se faz uso de um modelo demasiado simplificado da realidade;
- Existem limitações de tempo e espaço;
- Como um passo intermediário para outras aplicações.

Existem vários tipos de heurísticas, segundo o modo em que se buscam e constroem as soluções (Romenus, 2004). Uma possível classificação é a seguinte:

- Baseados em métodos construtivos. Aquelas que paulatinamente adicionam elementos individuais à solução que vai formando até que se obtém uma solução viável. O mais popular destes métodos é o método *greedy* (guloso ou voraz) o qual a solução é construída passo a passo, buscando o máximo de benefício em cada passo.
- Baseados em métodos de decomposição. Aquelas que subdividem o problema em subproblemas menores, utilizando a saída de um como a entrada de outro, de forma que ao resolvê-los tenhamos uma solução para o problema global.
- Baseados em métodos de redução. Tratam de identificar alguma característica que deva possuir a solução ótima e deste modo simplificar o problema. Como exemplo deste caso se identificam valores que devem ter certas variáveis, ou identificar variáveis correlacionadas.
- Baseadas em uma manipulação do modelo. Modificam a estrutura do modelo a fim de fazê-lo mais simples de resolver, deduzindo a partir de sua solução, a solução do problema original.
- Baseados em métodos de busca local. Dentro desta última classificação se enquadram as maiorias das heurísticas que se aplicam atualmente. Estes métodos partem de uma solução viável inicial, e mediante alterações, vão passando a outras soluções viáveis na sua vizinhança, armazenando a melhor das soluções encontradas até o momento.

3.2. Metaheurísticas

As metaheurísticas em sua definição são métodos de solução que organizam uma interação entre procedimentos de melhora local e estratégias de mais alto nível para criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e executar uma busca mais completa do espaço de soluções (Glover et al., 2003). Classificam-se por sua vez em metaheurísticas com memória e sem memória. A diferença entre elas é que as metaheurísticas com memória possuem estruturas que retêm informações sobre decisões tomadas anteriormente permitindo certa forma de aprendizado.

Apresentamos neste capítulo os algoritmos genético e GRASP.

3.2.1. O algoritmo genético

Os algoritmos genéticos são sistemas computacionais baseados em processos evolutivos, que incorporam métodos genéticos como *crossover* (cruzamento), mutação e seleção natural de Darwin. São úteis em diversos tipos de aplicações, principalmente na otimização de problemas. Para efetuar suas principais operações os Algoritmos Genéticos necessitam de operadores genéticos, que então trabalham a população inicial com a Função Objetivo e a classificam com uma função de avaliação.

O algoritmo genético é uma técnica de otimização relativamente nova, só foi introduzida por Holland na década de 1970 nos Estados Unidos (Souza, 2002) e, pouco a pouco, com a crescente melhora na eficiência, performance e confiabilidade dos computadores, tem se mostrada mais atrativa cientificamente e comercialmente.

O indivíduo e a população inicial

As partes que relacionam o algoritmo genético com o problema são a codificação de uma solução, na forma de cromossomo, e a função de avaliação.

Cada cromossomo representa uma solução do problema. A população inicial do problema é formada por um conjunto de cromossomos.

Função Objetivo e função de avaliação

No processo de avaliação de um algoritmo genético, após a definição aleatória da população inicial, começa a aplicação de dois tipos de funções que irão auxiliar na escolha dos melhores cromossomos, e estes irão avançar no processo genético, transmitindo assim os seus respectivos genes. A primeira delas é a Função Objetivo, também chamada de função de avaliação, justamente porque avalia, a partir de parâmetros pré-determinados, o desempenho de cada cromossomo separadamente, e a partir daí a criação de uma população intermediária.

Operadores genéticos

Operadores genéticos são métodos de seleção e reprodução que tornam possíveis a maximização ou minimização do número de soluções, bem como o avanço dos melhores indivíduos para as gerações subseqüentes.

O principal operador genético é o *crossover* (permutação) que, conforme sugere o nome, divide um par de indivíduos em seções pré-definidas (*crossover point*) e recombina seus materiais genéticos formando um ou dois novos indivíduos, que novamente são avaliados e recebem um novo valor de adaptabilidade (*fitness*) individual (ver figura 13). O *crossover* é especial porque torna mais ampla a variedade de cromossomos e respectivamente o espaço de pesquisa de um algoritmo genético.

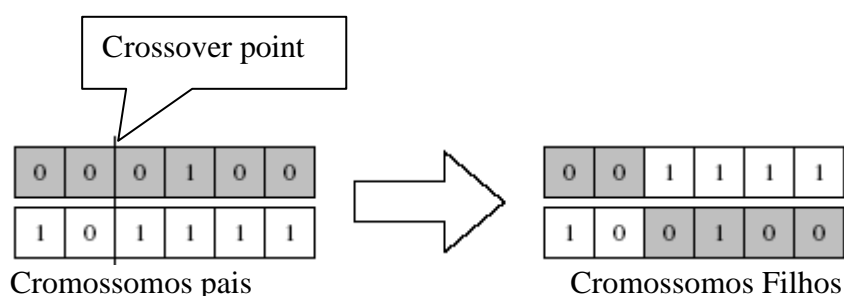


FIGURA 13: Exemplo do método de crossover.

Há também o operador de *mutação*, mostrado na Figura 14, que consiste simplesmente na inversão do valor de um gene (*string*) e possui uma probabilidade muito pequena de ocorrência.

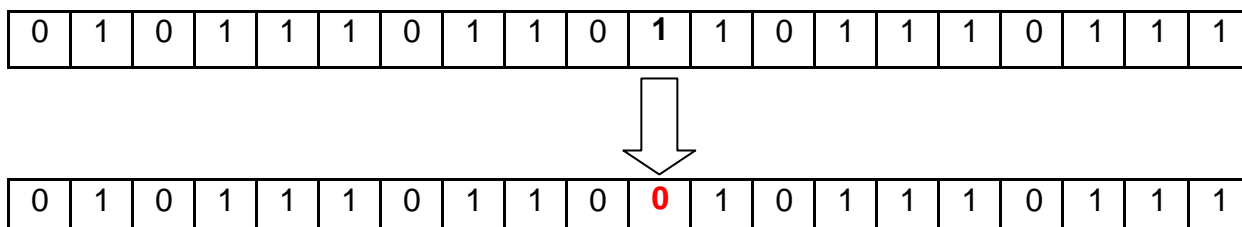


FIGURA 14: Exemplo da ocorrência de mutação.

Processo de aplicação

Um algoritmo genético é considerado um instrumento muito simples de busca e seleção e, por isso seu processo de busca não acompanha barreiras intransponíveis.

Após a seleção de indivíduos proporcionalmente à sua adaptabilidade, começa a atuação dos operadores genéticos que são os responsáveis pela permutação de material genético, garantindo assim a diversidade de indivíduos.

Ao final do ciclo ocorre a formação de uma nova população de indivíduos diferente da anterior, mas que não deixa de se identificar com a mesma. Então, ocorre uma nova avaliação dos *cromossomos* que passarão pelo mesmo processo.

Suponha que queremos maximizar uma Função Objetivo $F(x)$ em um conjunto X . Então, temos que seguir os seguintes passos:

- Escolhe-se um número inteiro que é chamado de tamanho da população, e então escolhe-se n elementos $x_i^{(1)}$ de X . Estes elementos são chamados de indivíduos da geração 0.
- Para cada indivíduo $x_i^{(k)}$ (a variável k é chamada geração, inicialmente $k = 0$), nós computamos um valor $F(x_i^{(k)})$ chamada função de aptidão.

- Então, para cada um dos indivíduos $x_i^{(k)}$, determina-se a probabilidade de sobrevivência $p_i^{(k)}$ como:

$$p_i^{(k)} = \frac{F(x_i^{(k)})}{\sum_{j=1}^n F(x_j^{(k)})}, \quad (10)$$

e então programar um gerador individual randômico que gera para cada indivíduo $x_i^{(k)}$ uma probabilidade $p_i^{(k)}$.

- Agora, estamos prontos para gerar um a um n indivíduos $x_i^{(k+1)}$ da próxima geração. Para gerar novos indivíduos, nós processamos o gerador individual randômico duas vezes, conseguimos os indivíduos $x_j^{(k)}$ e $x_l^{(k)}$ e combina-se estes dois indivíduos de acordo com as regras de combinações. Nesta etapa outros métodos de seleção também poderão ser utilizados.
- Repetem-se os passos acima, com os indivíduos da nova geração.

O código do algoritmo genético utilizado neste trabalho, o *Simple Genetic Algorithm* (SGA) em C++ foi adaptado do código original em Pascal SGA apresentado por Goldberg (1989).

Foram utilizados os seguintes arquivos do programa SGA:

Sga.h: que contém as declarações das variáveis globais e estruturas.

Main.C: que contém o programa principal SGA.

Generate.c: contém a rotina de geração e avaliação da nova população GA.

Initialize(): é a rotina de inicialização .

Initpop(): é a rotina que gera randomicamente uma população.

operators.c contém as rotinas para os operadores genéticos:

- crossover() executa o single-point crossover em dois pais produzindo dois filhos.
- mutation() executa a operação de mutação.

report.c contém rotinas usadas para imprimir relatórios de cada ciclo do SGA.

3.2.2. O Sistema GRASP

O algoritmo GRASP é um procedimento de busca aleatória e adaptiva (Souza, 2002). É uma metaheurística para encontrar soluções aproximadas (isto é, sub-ótimas de boa qualidade) a problemas de otimização. Baseia-se na premissa de que soluções iniciais diversas e de boa qualidade têm um papel importante no êxito de métodos locais de busca.

Seguindo o procedimento de Resende (1998), podemos formular o problema da seguinte forma: consideremos um conjunto de soluções X e uma função $f : X \rightarrow \mathfrak{R}$, buscamos uma solução $x^* \in X$ com $f(x^*) \geq f(x), \forall x \in X$. Para encontrar a solução ótima em um problema de otimização combinatória é teoricamente possível enumerar as soluções e avaliar cada uma através do seu objetivo específico. Aquele que apresentar o resultado mais favorável será considerado ótimo. Entretanto do ponto de vista prático, pode se tornar impossível seguir tal estratégia para completar a enumeração porque as combinações freqüentemente crescem exponencialmente com o tamanho do problema.

Um GRASP é um método que consiste de dois estágios, na qual cada iteração GRASP consiste:

- na construção de uma solução aleatória onde uma solução viável é construída 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 (*maxitr*) e a melhor solução encontrada sobre todas as iterações GRASP se devolve como a solução aproximada.

Todos os mecanismos de construção considerados constroem uma solução incorporando um elemento de cada vez. Em cada passo do processo de construção, tem-se em mãos uma solução parcial. Um elemento que se pode selecionar como parte de uma solução parcial se chama elemento candidato.

Para determinar qual elemento candidato deverá ser selecionado para ser incluído na solução, geralmente fazemos uso de uma lista C de candidatos,

seguindo um critério de ordenação pré-determinado. Esse processo de ordenação é baseado em uma função adaptiva gulosa $g : C \rightarrow \mathfrak{R}$, que estima o benefício da seleção de cada um dos elementos. A heurística é adaptativa porque os benefícios associados com a escolha de cada elemento são atualizados a cada iteração da fase de construção para refletir as mudanças oriundas da seleção do elemento anterior. A componente probabilística do procedimento reside no fato de que cada configuração (elemento) é selecionada de forma aleatória a partir de um subconjunto restrito formado pelos melhores elementos que compõem a lista de candidatos. Este subconjunto recebe o nome de lista de candidatos restrita (LCR). Esta técnica de escolha permite que diferentes soluções sejam geradas em cada iteração GRASP. Seja $a \in [0,1]$ um dado parâmetro.

$$\begin{aligned} LCR &= \{s \in C / g(s) \geq s_{m\acute{a}x} - a(s_{m\acute{a}x} - s_{m\acute{i}n})\} \\ s_{m\acute{i}n} &= \min\{g(t) \mid t \in C\}; \\ s_{m\acute{a}x} &= \mbox{m\acute{a}x}\{g(t) \mid t \in C\}. \end{aligned} \tag{11}$$

Observamos que o parâmetro a controla o nível de gula e aleatoriedade do procedimento Construção. Um valor $a = 0$ faz gerar soluções puramente gulosas, enquanto $a = 1$ faz produzir soluções totalmente aleatórias.

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

As técnicas de busca local em problemas de otimização constituem uma família de técnicas baseadas na noção de vizinhança. Ele termina quando nenhuma outra solução melhor é encontrada na vizinhança. A função N , a qual depende a estrutura do problema tratado, associa a cada solução viável $s \in S$, com a sua vizinhança $N(S) \subseteq S$.

A eficiência da busca local depende da qualidade da solução construída. O procedimento de construção tem, então, um papel importante na busca local, uma

vez que as soluções construídas constituem bons pontos de partida para a busca local, permitindo assim acelerá-la.

O parâmetro a , que determina o tamanho da lista de candidatos restrita, é basicamente o único parâmetro a ser ajustado na implementação de um procedimento GRASP.

Feo e Resende (1995) discutem o efeito do valor de a na qualidade da solução e na diversidade das soluções geradas durante a fase de construção. Valores de a que levam a uma lista de candidatos restrita de tamanho muito limitado (ou seja, valor de a próximo da escolha gulosa) implicam em soluções finais de qualidade muito próxima àquela obtida de forma puramente gulosa, obtidas com um baixo esforço computacional. Em contrapartida, provocam uma baixa diversidade de soluções construídas. Já uma escolha de a próxima da seleção puramente aleatória leva a uma grande diversidade de soluções construídas, mas, por outro lado, muitas das soluções construídas são de qualidade inferior, tornando mais lento o processo de busca local.

O procedimento GRASP procura, portanto, conjugar bons aspectos dos algoritmos puramente gulosos, com aqueles dos procedimentos aleatórios de construção de soluções.

Procedimentos GRASP mais sofisticados incluem estratégias adaptativas para o parâmetro a . O ajuste desse parâmetro ao longo das iterações GRASP, por critérios que levam em consideração os resultados obtidos nas iterações anteriores, produz soluções melhores do que aquelas obtidas considerando-o fixo.

Em linhas gerais, a busca local começa da solução inicial s_0 gerada pela fase de construção, navega pelo espaço de pesquisa, passando iterativamente, de uma solução para outra que seja sua vizinha.

Este procedimento geral do algoritmo GRASP foi adaptado para o nosso caso.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

4.1. Hipóteses simplificadoras

A operação real de sistemas de transporte de gás natural é complexa. Devido a isto, é necessário fazer algumas considerações que permitem estudar o problema. As premissas que se consideram para o nosso estudo são as seguintes:

- S1. Sistema em estado estacionário. Consideramos que os valores característicos de fluxo de gás no sistema são independentes do tempo. Neste caso, o sistema de restrições, particularmente aquelas que descrevem o fluxo de gás através dos dutos podem ser descritas usando equações algébricas não lineares.
- S2. A rede é dirigida. Consideramos que o sentido do fluxo em cada duto é conhecido com antecedência. Atribui-se um sentido de fluxo positivo aos dutos (i.e., fluxos negativos serão aqueles fluindo em sentido oposto ao arbitrado).
- S3. Temperatura ambiente constante. Considera-se um processo isotérmico, isto é, que a temperatura no sistema se mantém constante em cada duto.
- S4. Os cálculos de fluxos de gás nas ligações dentro de uma mesma plataforma não consideram perda de carga.

Foi necessário adotar algumas simplificações complementares para poder utilizar o algoritmo exato neste tipo de problema.

- S5. Valor mínimo (do *take or pay*) abaixo da oferta total de gás do sistema, garantindo assim a diferenciabilidade da Função Objetivo.
- S6. Os valores de vazão de gás liberados no *surge tank*, abaixo da capacidade operacional do compressor de recuperação de vapor, para garantir a diferenciabilidade da equação de restrição neste equipamento.

OBSERVAÇÃO: As simplificações complementares S5 e S6, foram adotadas somente para poder comparar as metaheurísticas algoritmo genético e GRASP com o algoritmo exato. Para a resolução de problemas utilizando metaheurísticas estas simplificações complementares não são necessárias.

4.2. Balanço Volumétrico

4.2.1. Na plataforma

Numa plataforma de produção de óleo e gás natural associado, o balanço volumétrico nas condições padrão obedece à seguinte condição: o gás associado produzido, adicionado do volume recebido de outra plataforma em baixa pressão, subtraído do volume de gás consumido, transferido para outra plataforma em baixa pressão, injetado e queimado, será o gás disponibilizado para venda. Isto é:

$$q_{gT_i} + \text{receb}_{bp_i} - \text{cons}_i - \text{transf}_{bp_i} - q_{inj_i} - \text{quei}_i = \text{disp}_i, \quad (12)$$

$$q_{gT_i} = q_{ga_i} + q_{gna_i} + q_{garm_i}, \quad (13)$$

Como se trabalha com as hipóteses assumidas, o volume de gás natural que entra num equipamento, por exemplo, *manifold* (equipamento composto por um conjunto de válvulas e conectores que permitem a unificação ou bifurcação de dutos) ou gasoduto é igual ao volume que sai deste ponto.

Uma parte do gás produzido permanecerá associada ao óleo após este passar pelo separador de produção, numa pressão próxima de $10 \text{ Kgf} / \text{cm}^2$. Esta parcela do gás será separada do óleo no recuperador de vapor (ou *surge tank*) que trabalha numa pressão próxima da atmosférica. Sendo: q_{gst_i} , o volume de gás separado no *surge tank* e caprecvap_i a capacidade do compressor de recuperação do vapor, a queima de gás do *surge tank* (quei_{st_i}) da plataforma i será dada pela seguinte condição:

$$\text{quei}_{st_i} = \begin{cases} 0, & \text{se } q_{gst_i} \leq \text{caprecvap}_i \\ q_{gst_i} - \text{caprecvap}_i, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (14)$$

Na plataforma, o gás associado ao óleo é produzido juntamente com o *gas lift*. Assim, o gás disponível para compressão será o volume de gás total produzido em baixa pressão, mais o *gas lift*, mais o volume de gás recebido em baixa pressão, reduzido o volume de gás consumido em baixa pressão. Isto é:

$$dispcomp_i = q_{gT_i} + q_{gl_i} + receb_{bp_i} - transf_{bp_i} - cons_{bp_i} \quad (15)$$

O sistema de compressão conta com um número de compressores disponíveis para cada período. A capacidade de compressão será proporcional ao número de compressores operacionais, multiplicado pela capacidade média unitária.

A limitação do sistema de compressão da plataforma também poderá ser proveniente da planta de processo, ou do sistema de tratamento de gás. Neste caso, teremos que comparar os valores entre a capacidade da bateria de compressores e a capacidade do sistema de compressão. A limitação adotada será o menor valor deles.

Para o cálculo da capacidade de compressão de uma determinada configuração de uma bateria de compressores, deve-se levar em consideração o seu índice de disponibilidade, que é o percentual do tempo em que se prevê que o mesmo estará disponível. Para este cálculo consideram-se todas as configurações possíveis e a probabilidade de ocorrência de cada uma delas. As configurações são os arranjos possíveis de operação dos compressores. Sendo n o número de compressores, o número de configurações possíveis é 2^n .

Quando o gás disponível para compressão ultrapassar a capacidade de compressão da plataforma, temos duas alternativas:

- Se existir interligação em baixa pressão desta plataforma com outra, com capacidade de compressão adicional, o gás excedente será transferido para compressão nesta plataforma;
- Se a plataforma não tiver interligação em baixa pressão com outras plataformas:
 - a. o excedente será queimado se a prioridade for o *gas lift*;

- b. o *gas lift* será reduzido se o custo da queima for maior que o ganho com o *gas lift*.

Quando for necessária a redução do volume de *gas lift* proposto para a otimização da análise econômica integrada, deverão ser corrigidas também a produção de óleo e a produção de gás associado.

O sistema de injeção de gás para armazenamento deverá levar em consideração alguns aspectos como: estoque inicial, estoque final, potencial de produção, potencial de injeção, etc. Para cada período analisado no planejamento (que pode ser diário, mensal, anual), deve-se recalculá-lo o estoque final, sendo que este valor será considerado como o valor inicial para o período subsequente.

$$\textit{Estoque Final} = \textit{Estoque Inicial} + \textit{Injetado} - \textit{Produzido} \quad (16)$$

Se o gás a ser movimentado, em cada ponto da malha, for superior à capacidade desta, o programa deverá definir a melhor movimentação de gás de modo a maximizar o lucro, utilizando todas as alternativas possíveis de injeção, *gas lift*, compressão de gás em outra plataforma, queima de gás com menor preço, etc.

O gás não associado (GNA), produzido em alta pressão, ou seja, com pressão suficiente para ser enviado até o ponto final de entrega, não deverá ser queimado. Quando houver alguma restrição que impeça que algum volume de GNA produzido não alcance o seu ponto final de entrega ou consumo, o mesmo não poderá ser produzido.

Todo o balanço volumétrico será realizado em condições padrão, no caso, Pressão de 1 atm e Temperatura de 20° C.

Assim, para maximizar o retorno ou o lucro da previsão integrada da movimentação de gás, será utilizado um sistema de equações e inequações misto inteiro não linear para representar o balanço volumétrico e as restrições existentes no sistema de compressão e escoamento de gás.

4.2.2. Nos gasodutos

O gás natural excedente nas plataformas (*i.e.*, a sobra depois de armazenagem, consumo, injeção e queima nas plataformas) é escoado através de uma rede de gasodutos, até o ponto final de distribuição e venda, onde alguns gasodutos podem ter sentidos duplos.

Existem, naturalmente, relações entre os fluxos de gás e as pressões dos extremos de cada trecho do gasoduto. Assim, se considerarmos que o gasoduto pode ser representado por uma rede composta pelo conjunto de n vértices $N=\{1, \dots, n\}$ e trechos direcionados (i, j) (onde $i, j \in N$), uma primeira relação, chamada de balanço de fluxos, para cada vértice t é:

$$\sum_{j \in N} a_{ij} f_j = s_t, \quad (17)$$

onde f_j é o fluxo que circula no duto j ; e, $s_t \geq 0$ se o nó t é gerador de fluxo, $s_t < 0$ se o nó t é consumidor de fluxo e $s_t = 0$ em outro caso. O vetor $\mathbf{s} = (s_1, \dots, s_n)^T$, chamado de vetor de fluxos líquidos, deve também satisfazer a relação:

$$\sum_{k \in N} s_k = 0. \quad (18)$$

Uma outra relação a considerar é o balanço de pressões, entre o fluxo f_k , circulando no trecho k com vértices (i, j) , do gasoduto, e as pressões $p_i [kgf / cm^2]$ e $p_j [kgf / cm^2]$ nos respectivos extremos do trecho (Wolf, 2003; Chaves, 1999):

$$p_i^2 - p_j^2 = c_k |f_k| f_k, \quad (19)$$

onde $c_k > 0$ é o coeficiente de resistência do duto, que depende das características físicas do trecho. É importante indicar que no problema aqui tratado existe um único nó consumidor de fluxo, digamos o nó n , que as pressões devem satisfazer $p_n = \bar{p}_n$ e

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{p}^l \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}^s, \quad (20)$$

onde $\mathbf{p} = (p_1', \dots, p_n')^T$ é um vetor de pressões; $\mathbf{p}' = (p_1', \dots, p_n')^T$ é um vetor de pressões mínimas e $\mathbf{p}^s = (p_1^s, \dots, p_n^s)^T$ é um vetor de pressões máximas.

As equações de balanço de fluxo são lineares, enquanto que as de balanço de pressões são quadráticas. Além disso, são incorporadas variáveis binárias para controlar o funcionamento dos compressores nas plataformas (como será visto mais adiante).

4.3. Formulação do problema

Considere o problema de transporte de gás associado *offshore* de várias plataformas integradas a uma rede de gasodutos para escoar o excedente de gás para o continente.

O problema pode ser considerado em diferentes níveis de agregação. O mais alto nível é olhar para o gerenciamento da função lucro da movimentação global do sistema integrado. Temos também contratos de oferta x demanda de gás com algumas empresas. Outros níveis são o volume de gás queimado, o volume de gás consumido, gerenciamento dos reservatórios de injeção, etc.

As variáveis de decisão são as variáveis de operação dos compressores que são binárias e irão representar se o compressor está ligado ou desligado. Para os gasodutos, são os fluxos e os níveis de pressão em cada nó. A Função Objetivo é a função lucro da movimentação integrada.

Nas plataformas encontram-se equipamentos que irão regular os fluxos de saída (isto é, as variáveis s_i de cada plataforma - nó fonte - i), como: compressores, geradores, queimadores, etc. Assim, para cada plataforma i pode ser definida a seguinte relação:

$$s_i = comp_i - q_{glci} - q_{inji} - cons_{tgi} - \sum_{j=1}^{cAi} (KccA_{ij} \cdot xcA_{ij}), \forall i \text{ nó fonte} \quad (21)$$

As restrições de balanço volumétrico, nas condições padrão consideradas, para cada nó plataforma i são:

$$0 \leq q_{inj_i} \leq q_{inj_{max_i}}, \forall i, \quad (22)$$

$$dispcomp_i = q_{ga_i} + q_{gl_i} + receb_{bpi} - quei_i - transf_{bpi}, \forall i, \quad (23)$$

$$capacomp_i = \sum_{j=1}^{cAi} (Kca_{ij} \cdot xcA_{ij}), \forall i, \quad (24)$$

$$comp_i + quei_i - q_{glc_i} = q_{ga_i}, \forall i, \quad (25)$$

$$comp_i - \sum_{j=1}^{cAi} KcA_{ij} \cdot xcA_{ij} \leq 0, \forall i \quad (26)$$

$$comp_i - dispcomp_i \leq 0, \forall i, \quad (27)$$

$$comp_i \geq 0, \forall i, \quad (28)$$

$$cons_{tci} - \sum_{j=1}^{cAi} KccA_{ij} \cdot xcA_{ij} = 0, \forall i, \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^n s_i \leq demand, \forall i, \quad (30)$$

$$0 \leq q_{glc_i} \leq q_{gl_i}, \quad (31)$$

$$0 \leq quei_i \leq q_{ga_i}. \quad (32)$$

A equação (22) faz com que a vazão de injeção de gás para armazenamento seja sempre um número positivo e menor que um valor limite determinado pelas limitações de reservatórios ou capacidade de equipamentos.

A equação (23) indica que o volume de gás disponível para compressão em uma determinada plataforma será o gás produzido somado ao gás lift e o volume de gás em baixa pressão recebido de outras plataformas subtraído da queima e transferido em baixa pressão para outras plataformas para compressão.

A capacidade de compressão de uma determinada plataforma será calculada pela equação (24) pelo somatório das capacidades unitárias dos compressores multiplicados pelas variáveis que indicam o seu estado de operação.

A equação (25) garante que o volume de gás em baixa pressão que não for aproveitado na plataforma terá um destino que é a queima.

A vazão de gás comprimida será o menor valor entre a capacidade de compressão e o disponível para compressão. As equações (26) e (27) garantem que esta restrição será atendida.

A equação (28) é a restrição para que o volume de gás comprimido pelas plataformas não assuma valores negativos.

A equação (29) calcula o consumo de gás dos compressores de cada plataforma sendo variável de acordo com o número de compressores operacionais no período.

A equação (30) limita a oferta global de gás do sistema integrado para que o mesmo não ultrapasse o valor de demanda.

As equações (31) e (32) são as restrições operacionais para o volume de gás lift calculado e queima de gás da plataforma, respectivamente.

A rede de escoamento de gás consiste de vários nós de alimentação (plataformas) onde o gás é direcionado para dentro do sistema, temos alguns pontos de demanda para onde o gás flui para fora do sistema e outros intermediários que são simplesmente nós de passagem. Os gasodutos são representados por arcos conectando os nós. Para cada nó i (da rede de gasodutos), é associada uma variável p_i que representa a pressão do gás neste nó. Distinguimos três tipos de nós: o conjunto de nós de demanda, denotados por N_d , o conjunto de nós de oferta, denotados por N_s , e o conjunto de nós de conexão. A oferta de gás no nó n que é o nó de entrega é denotada por s_n (com $s_n < 0$).

Assim, ao considerar o conjunto de relações (21) - (32) para cada plataforma i , junto ao sistema de equações (17) - (19), tem-se o modelo de funcionamento do sistema: geração de fluxo (vetor \mathbf{s}), de vazões em cada trecho do gasoduto (vetor \mathbf{f}) e pressões em cada nó (vetor \mathbf{p}).

Diz-se que a plataforma i tem uma dada configuração de compressão, quando se considera um certo conjunto de valores $0-1$ para as variáveis binárias x_{CA_j} (funcionamento do compressor j na plataforma i). Portanto, as possíveis configurações de compressão do sistema (conjunto de plataformas) estão constituídas de conjuntos de arranjos de 0 's e 1 's com o tamanho do arranjo correspondente ao número total de compressores da rede para o algoritmo genético. Para efeito de considerar essas possíveis configurações na proposta algorítmica aqui apresentada, cada arranjo possível será chamado de *cromossomo* e cada 0 ou 1 , do cromossomo, será chamado de *gene*, representando um estado de operação (desligado ou ligado) do correspondente compressor na respectiva plataforma.

Para o algoritmo GRASP trabalha-se com o conjunto de configurações de operação dos compressores de cada plataforma. Cada solução é construída individualmente e cada configuração é escolhida a partir de uma lista de candidatos pré-determinada, denominada Lista Restrita de Candidatos (LCR). Cada plataforma terá um número de configurações possíveis determinada por 2^n , sendo n o número de compressores instalados. Para cada configuração de operação dos compressores teremos associado um valor de Função Objetivo lucro potencial. Na fase de construção, a solução é construída plataforma por plataforma, de tal forma que o elemento candidato é selecionado aleatoriamente dentro desta lista restrita de candidatos para ser incluída na solução geral, seguindo o critério de ordenação formado pelos melhores elementos que compõem a lista de candidatos de acordo com o valor do Lucro potencial.

Nos algoritmos apresentados, operam-se segundo a seguinte estratégia: dada uma malha de gasodutos, uma certa configuração de operação do sistema e um certo nível de queima de gás em cada plataforma, a viabilidade de escoamento do gás (*i.é.*, dos fluxos s_i para cada plataforma i) é determinada pela solução do sistema de balanço (solução do sistema (17)-(19): determinação dos valores das variáveis de vazão f_j para os trechos do gasoduto e pressão p_k nos nós). Se algum valor de p_i não satisfizer (20) considera-se \mathbf{s} não viável e, mantendo a configuração, aumenta-se convenientemente a queima, passando novamente à solução do sistema de balanço até conseguir a viabilidade de escoamento do gás.

Sendo p_i a pressão no nó i , considera-se, também, o vetor de fontes \mathbf{s} , como em (17). Lembrar que s_i pode ser positivo, negativo ou zero, dependendo se o nó i é gerador (origem de fluxo), consumidor (destino de fluxo) ou se é nó de transição. Lembrar, também, que o vetor de fontes deve satisfazer a relação:

$$\sum_{i \in N} s_i = 0. \quad (33)$$

Assim, o *balanço de fluxos e pressões* da malha de gasodutos pode agora ser escrito como:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{f} &= \mathbf{s}, \\ \mathbf{A}^T \mathbf{p}^2 &= \mathbf{b}(\mathbf{f}), \end{aligned} \quad (34)$$

onde $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_l)^T$ é o vetor de fluxos (com f_k sendo o fluxo no duto k), $\mathbf{p}^2 = (p_1^2, \dots, p_n^2)^T$, $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n)$ e $b_k(\mathbf{f}) = c_k |f_k| / f_k$, onde $c_k = \frac{1}{k_{wk}^2}$ é uma constante positiva que depende do duto $k \in \{1, \dots, l\}$. Desde que o posto da matriz \mathbf{A} é $n-1$, considerando a matriz reduzida \mathbf{A}_R como a própria matriz \mathbf{A} sem a última linha e o vetor \mathbf{s}_R como o vetor \mathbf{s} sem a última componente, tem-se que o sistema $\mathbf{A}\mathbf{f} = \mathbf{s}$, em (34), é equivalente ao sistema $\mathbf{A}_R \mathbf{f} = \mathbf{s}_R$. Conseqüentemente, ao invés de considerar o sistema (34) como balanço de fluxos e pressões considera-se o sistema:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_R \mathbf{f} &= \mathbf{s}_R, \\ \mathbf{A}^T \mathbf{p}^2 &= \mathbf{b}(\mathbf{f}). \end{aligned} \quad (34')$$

Assim, o sistema de balanços pode ser expresso pela relação (34'), junto à restrição (20).

É conveniente notar que o conjunto de soluções viáveis para as equações de balanço de pressões, a segunda equação em (34'), é não convexo, e não diferenciável, o que aumenta a dificuldade para resolver o problema.

Portanto, considerando a Função Objetivo:

$$F(\mathbf{xcA}) = \sum_{i=1}^I P_{fi}^T s_i + \sum_{i=1}^I P_{glc_i}^T \cdot q_{glc_i} + \sum_{i=1}^I P_{inj_i}^T \cdot q_{inj_i} - Dif_{Torp}^T \cdot multa \quad (35)$$

onde P_{f_i} , P_{glc_i} e P_{inj_i} denotam as receitas unitárias do gás disponibilizado (s_i), do *gas lift* (q_{glc_i}) e do gás injetado nos reservatórios (q_{inj_i}), Dif_{Torp} denota o volume de gás abaixo do *take or pay* entregue no período e *multa* é a penalização por unidade de volume entregue abaixo do *take or pay*.

Na forma geral, o problema considerado pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\text{Maximizar} \quad F(\mathbf{xcA}) \quad (35')$$

Sujeito a:

$$\mathbf{Af} = \mathbf{s}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{p}^2 = \mathbf{b}(\mathbf{f})$$

e as restrições definidas pelas fórmulas: (12)-(16) e (21)-(33).

Que corresponde a um problema quadrático misto-inteiro de grande porte (tipicamente NP-completo), com \mathbf{f} (vetor de fluxos que circulam no gasoduto), \mathbf{s} (vetor que representa fluxo de gás alimentado pelas plataformas e/ou retirados do gasoduto), \mathbf{p} (vetor de pressões nos vértices de cada duto), \mathbf{xcA} (vetor binário representando operação de compressores de gás nas plataformas); onde $F(\mathbf{xcA})$ é a função lucro (linear).

O seguinte resultado é conhecido:

Teorema 1 (Teorema 1, Rios-Mercado et al, 2000)

Seja o grafo G , com n nós e l dutos, e T uma árvore geradora do grafo G' .

Então

- O número de arestas na árvore geradora T é $n-1$ e o número de cordas correspondentes à árvore T é $l-n+1$.

- O número de ciclos fundamentais correspondentes à árvore geradora T é $l-n+1$. Qualquer outro ciclo em G é uma combinação linear dos ciclos fundamentais.

De acordo com o Teorema 1, só $l-n+1$ vetores ciclo fundamentais relativos a uma árvore geradora são independentes. Uma matriz de ciclos que consiste destes $l-n+1$ vetores ciclo fundamentais é chamada *matriz de ciclos reduzida*, é denotada por \mathbf{B}_R e tem dimensão $(l-n+1) \times l$.

As matrizes \mathbf{A}_R e \mathbf{B}_R estão relacionadas pela seguinte proposição:

Teorema 2 (Teorema 2, Rios-Mercado et al, 2000)

Seja o grafo G com \mathbf{A}_R e \mathbf{B}_R suas matrizes de incidência e de ciclos reduzida, respectivamente. Então:

$$\mathbf{A}_R \mathbf{B}_R^T = \mathbf{B}_R \mathbf{A}_R^T = \mathbf{0} \quad (36)$$

Assim, da relação (35') e do Teorema 2, considerando a variável $\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p}^2$ podemos escrever o sistema de balanço de fluxos e pressões como:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_R \mathbf{f} &= \mathbf{s}_R, \\ \mathbf{B}_R \mathbf{b}(\mathbf{f}) &= \mathbf{0}, \\ \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{p}} &= \mathbf{b}(\mathbf{f}). \end{aligned} \quad (37)$$

A vantagem do sistema (37) é que os dois primeiros conjuntos de equações ($\mathbf{A}_R \mathbf{f} = \mathbf{s}_R$ e $\mathbf{B}_R \mathbf{b}(\mathbf{f}) = \mathbf{0}$) têm solução única (Corolário 2, Rios-Mercado et al, 2000). De forma que, encontrada a solução \mathbf{f} dessas equações, pode ser calculado o vetor $\mathbf{b}(\mathbf{f})$ e, logo, encontrada a solução $\tilde{\mathbf{p}}$ da equação $\mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{b}(\mathbf{f})$, determinando assim, uma solução para o sistema de balanços (34). Os conjuntos de equações descritos são solucionados neste trabalho pelo método de Newton-Raphson, que dada às características do sistema (37) é muito bem comportado.

4.3.1. O Método de Newton-Raphson

Os dois primeiros conjuntos de equações não lineares de (37) podem ser escritos da seguinte forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{f}) \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{A}_R \mathbf{f} - \mathbf{s}_R \\ \mathbf{B}_R \mathbf{b}(\mathbf{f}) \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (38)$$

O Jacobiano do sistema (38) será:

$$\mathbf{J}[\mathbf{M}(\mathbf{f})] = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_R \\ \mathbf{B}_R \mathbf{b}'(\mathbf{f}) \end{pmatrix}, \quad (39)$$

$$\mathbf{b}'(\mathbf{f}) = 2(\text{sign}(f_1)c_1f_1, \dots, \text{sign}(f_n)c_nf_n)^T \quad (40)$$

onde:

$$\text{sign}(f_k) = \begin{cases} +1, & \text{se } f_k > 0 \\ -1, & \text{se } f_k < 0 \end{cases} \quad (41)$$

Assim, resolvemos o processo iterativo, a partir de uma aproximação inicial $\mathbf{f}^{(0)}$:

$$\mathbf{f}^{(k+1)} = \mathbf{f}^{(k)} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{f}^{(k)})\mathbf{M}(\mathbf{f}^{(k)}), \quad (42)$$

A equação (42) pode ser solucionada pela decomposição LU.

O código Newton-Raphson utilizado neste trabalho foi obtido e adaptado de Press (1992), sendo utilizadas as seguintes rotinas:

```
void usrfun(float *x,int n, float *fvec, float **fjac);
void mnewt(int ntrial, float x[], int n, float tolx, float tolf);
void lubksb(float **a, int n, int *indx, float b[]); (soluciona sistema de equações
lineares utilizando decomposição LU);
void ludcmp(float **a, int n, int *indx, float *d).
```

4.3.2. O Balanço em Baixa Pressão

Considere aqui, que se tem uma rede de baixa pressão $BP = \{W, M\}$, onde o conjunto de vértices W está formado por um subconjunto de plataformas conectadas por gasodutos de baixa pressão (conjunto de dutos M). Considere também que nessa rede o gás circula sem necessidade de compressão nas plataformas e que relativamente pequenas variações de pressão são possíveis de forma a induzir fluxos de gás através dos dutos em um ou outro sentido.

O problema do balanço de gás nas plataformas em baixa pressão (bp) na rede BP consiste em dada uma certa configuração do sistema (isto é, estabelecido quais compressores estão em funcionamento), distribuir nesta rede os volumes de gás disponível para compressão nas plataformas com capacidade insuficiente de compressão, visando aproveitar eventual capacidade ociosa em outras plataformas da rede. Este balanço deve ser realizado antes do processo de compressão de gás e que eventuais excessos (gás sem possibilidade de compressão) sejam injetados ou enviados para os queimadores.

Assim, considerando $n_{BP} = |W|$ o número de vértices, $m_{BP} = |M|$ o número de dutos e A_{BP} a matriz de incidência da rede de baixa pressão, o problema pode ser modelado pelo seguinte sistema:

$$A_{BP} f_{BP} = s_{BP}, \quad (43)$$

onde f_{BP} é o vetor de fluxos da rede BP , e s_{BP} é o vetor fonte da rede de gasodutos de baixa pressão e pode ser escrito como:

$$s_{BP} = d - quei_{BP} \quad (44)$$

onde d é o vetor *deficit* do sistema de compressão. Se $d_i > 0$, indica que a plataforma i tem capacidade de compressão menor que o volume de gás disponível em baixa pressão. Se $d_i < 0$, indica que a plataforma i possui capacidade reserva de compressão. $quei_{BP}$ é o vetor de queimas nas plataformas em baixa pressão,

com $quei_{BP_i} \geq 0$ se $s_{BP_i} > 0$ (isto é, se a plataforma i dispuser de gás BP acima da sua capacidade de compressão) e $quei_{BP_i} = 0$ se $s_{BP_i} \leq 0$ (isto é, se o disponível para compressão na plataforma i for abaixo da sua capacidade de compressão).

Para efeito de conservação de fluxos na rede BP , deve-se satisfazer ainda a seguinte equação de balanço de fluxos nas condições padrão:

$$\sum quei_{BP_i} \leq \sum_{s_{BP_i} > 0} s_{BP_i}, \quad (45)$$

Além disso, deve também ser considerada a condição:

$$\sum_{s_{BP_i} > 0} |s_{BP_i}| = \sum_{s_{BP_j} < 0} |s_{BP_j}|, \quad (46)$$

caso $\sum_{s_{BP_i} > 0} |s_{BP_i}| < \sum_{s_{BP_j} < 0} |s_{BP_j}|$, as componentes $s_{BP_j} < 0$ deverão ser diminuídas de forma a satisfazer a condição (46); e se $\sum_{s_{BP_i} > 0} |s_{BP_i}| > \sum_{s_{BP_j} < 0} |s_{BP_j}|$, as componentes $s_{BP_i} > 0$ deverão ser diminuídas aumentando convenientemente o valor de $quei_{BP_i}$ de forma a satisfazer a condição (46).

Portanto, o problema do balanço de gás de plataformas em baixa pressão (bp), quando consideramos redes do tipo linha ou árvore está determinada pelo sistema linear (43) – (44), onde a condição (45) é satisfeita. Caso se tenham redes BP com ciclos, a resolução deste sistema será do tipo não linear e deverá ser tratado da mesma forma que o problema de redes de alta pressão.

Nesta rede de gasodutos BP deverá ser atendida a seguinte condição:

$$p_{BP_{min}} \leq p_i \leq p_{BP_{max}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (47)$$

A plataforma i da rede BP , com o menor valor de $d_i < 0$ (com o maior valor de disponibilidade de compressão), deverá se adequar à condição de P_{BPmin} para poder receber o gás de outras plataformas.

Portanto, tem-se que o problema do balanço de gás de plataformas bp na rede BP está determinado pelo sistema linear (43), que pode ser solucionado por qualquer método de solução de sistemas lineares. Estas redes são tipicamente de pequeno porte.

O cálculo de pressões para a rede BP é determinado através do sistema:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{BP}^T \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \mathbf{p}^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{b}(f) \\ \mathbf{p}_{BPmin}^2 \end{bmatrix}, \quad (48)$$

O vetor \mathbf{u} é o vetor de 0 e 1, onde o i -ésimo componente que representa a plataforma i com o menor valor de d_i , é igual a 1.

Caso alguma plataforma ou nó da rede BP não tenha atendido a condição (47), aumentar convenientemente a queima $quei_{BP}$ da plataforma com o maior valor de pressão e recalculer os fluxos e pressões da rede BP até que a condição (47) seja totalmente atendida.

4.4. Análise Econômica

A Função Objetivo do sistema de planejamento da movimentação de gás é a função lucro da movimentação de gás integrada. A seguir serão detalhados os componentes desta função lucro, que são as receitas e os custos operacionais.

4.4.1.Receitas

Receita da venda de gás

O volume de gás disponibilizado para venda em cada plataforma multiplicado pelo seu preço de venda origina a receita da venda do gás.

Receita do *gas lift*

O volume de óleo adicional do poço produzido em função do *gas lift*, multiplicado pelo preço de venda do óleo, corresponde à receita da injeção de *gas lift*. Como poderá haver limitações no sistema de compressão, pode-se não atender ao volume de *gas lift* requerido, em função de análise econômica desfavorável para a empresa. Neste caso, o sistema deverá calcular o volume de *gas lift* otimizado.

Assim, calculamos a receita unitária do *gas lift* (*RUGL*) da seguinte forma:

$$RUGL = \frac{q_{\text{óleo}} \cdot PR_{\text{óleo}} \cdot FCBBL \cdot FC}{q_{glc}}, \quad (49)$$

onde:

$RUGL[\frac{R\$}{\text{mil } m^3/d}]$ é a receita unitária do *gas lift*,

$q_{\text{óleo}}[m^3/d]$ é vazão adicional de óleo com a utilização do *gas lift*;

$PR_{\text{óleo}}[\text{US\$}]$ é o preço médio do barril de petróleo;

$FCBBL[\text{bbl}/\text{m}^3]$ é o fator de conversão de m^3 para bbl ;

$FC[\text{R\$/US\$}]$ é o fator de conversão de $\text{US\$}$ para $\text{R\$}$;

$q_{\text{glc}}[\text{mil m}^3/\text{d}]$ é a vazão diária de *gas lift* necessária.

Receita unitária da injeção para recuperação secundária

Corresponde ao valor do volume adicional de óleo recuperado em função da injeção de gás.

4.4.2. Custos operacionais

A) Multa unitária por entrega de volume de gás abaixo do mínimo acordado:

Take or Pay;

B) Custo unitário do gás queimado: neste caso, como o objetivo é a otimização do lucro, deveria-se queimar prioritariamente o gás que teria, a princípio, menor preço de venda. Como o preço de venda do gás é definido em função do seu poder calorífico, deveremos calcular o custo de queima do gás de cada unidade, em função do seu poder calorífico da seguinte forma:

$$\text{Custo queima do gás} = PCS \cdot \frac{PGPCR}{PCR} \quad (50)$$

Também poderá ser considerada a possibilidade de pagamento de multa, caso se queime um volume de gás acima do volume liberado pela Agência Reguladora.

$$QUEIMATOTAL \leq LIMITE + DESVIO \quad (51)$$

$$MULTA = DESVIO \cdot VALOR \quad (52)$$

4.4.3 Lucro Final e Função Objetivo

O lucro final será calculado da seguinte forma:

$$LUCROFINAL = \sum RECEITAS - \sum CUSTOS \quad (53)$$

Esta função também é a Função Objetivo do otimizador, que será maximizada, levando-se em consideração as restrições e limitações da malha.

4.5. Metodologia

4.5.1. Aplicando o algoritmo genético ao processo de planejamento da movimentação de gás

As Hipóteses assumidas para a modelagem do problema são:

- Sistema estável.
- Rede dirigida: assume-se a direção do fluxo positivo em cada duto.
- Temperatura ambiente constante: considera-se um processo isotérmico. A temperatura em cada gasoduto é constante.
- Número de compressores em cada plataforma conhecido: O número e as características de cada compressor em cada plataforma são parâmetros conhecidos.

Durante a implementação do problema de Previsão de movimentação de gás, foram consideradas as seguintes representações para modelar o sistema genético híbrido:

- O indivíduo (compressores) e a população inicial.

- A função de avaliação dos indivíduos (função lucro da movimentação de gás) e o processo seletivo.

Assim, as configurações possíveis para o sistema de compressão são representadas por cromossomos. Cada gene do cromossomo representa um compressor de uma plataforma.

O algoritmo genético utilizado neste sistema funciona da seguinte forma:

- a) Determinar o tamanho e gerar uma população inicial de cromossomos.
- b) Avaliar cada indivíduo da população através do cálculo de sua aptidão, utilizando a função de avaliação.
- c) Selecionar os cromossomos que produzirão descendentes para a próxima geração, em função dos seus desempenhos apurados no passo anterior (etapa de seleção).
- d) Gerar descendentes através da aplicação das operações de cruzamento, *crossover* e mutação sobre os cromossomos selecionados no passo anterior, criando a próxima geração (etapa de reprodução).
- e) Enquanto o critério de parada não ser satisfeito, voltar ao passo b. Caso contrário, parar, retornando o melhor cromossomo gerado até o momento.

O cromossomo representa uma configuração geral para a condição de operação do sistema de compressão. Os genes deste cromossomo podem receber os valores de 0 e 1, identificando se cada compressor do sistema estará operando ou não naquele período.

A idéia básica é representar geneticamente o cromossomo como um vetor de condição operacional onde cada condição (genoma) representa uma máquina. As condições, que correspondem à ordem em que as operações se encontram em uma máquina do problema de previsão de movimentação de gás, foram representadas por cadeias de estruturas. Cada estrutura (gene), ou operação, foi representada por valores inteiros únicos (genótipo) que pudessem identificar a operação no problema (esquema de codificação da estrutura).

Exemplo :

Número de plataformas = 3

Número de compressores: 03 por plataforma

Solução: 110 001 010

O cromossomo neste exemplo representa a configuração de operação dos compressores sendo que cada gene define a condição de operação do compressor no período considerado. Os três primeiros genes representam a configuração de operação dos compressores da primeira plataforma, do quarto ao sexto gene da segunda plataforma e do sétimo ao nono gene da terceira plataforma.

A seguir descreveremos o funcionamento do algoritmo genético (representado na Figura 15):

- 1) **Leitura de parâmetros:** Produção de gás, *gas lift*, dados dos compressores e gasodutos, matriz de incidência da rede (**A**), matriz de ciclos (**B**), pressão de entrega, fator de paradas programadas, demanda de gás, preços do gás, receitas unitárias do *gas lift*, etc.
- 2) **Geração de população inicial de indivíduos** (cromossomos) que irão representar as possíveis soluções para a configuração operacional dos compressores (a população inicial é gerada randomicamente ou é definida a partir de um critério pré-estabelecido, formando o cromossomo a partir de genes 0-1). Cada gene representará o estado de operação de um determinado compressor, ou seja a variável x_{ij} .
- 3) **Viabilização de condições de pressão e avaliação da população:**
 - Calcular, para cada cromossomo, as componentes s_i (do vetor de fontes **s**) através da equação (21), considerando as relações (22)-(32), considerando as variáveis x_{ij} .
 - Resolver o sistema (37) de balanço de fluxos e pressões (método de Newton-Raphson). Neste ponto, teremos calculado os valores de fluxo de

equilíbrio f_i de cada duto e também as pressões p_i em cada um dos nós da rede integrada.

- Verificar se as condições de pressão estão sendo satisfeitas para cada plataforma ou nó, isto é, se a pressão de descarga máxima dos compressores é maior ou igual que a pressão requerida para transportar o gás até o seu destino final.

Caso estas condições não sejam satisfeitas:

- Aumentar a injeção de gás para armazenamento até que as condições de pressão sejam atendidas, ou até que se alcance o limite máximo de injeção.
- Aumentar a queima de gás nas plataformas até que as condições de pressão sejam atendidas.

Recalcular os valores de s_i (menores que os iniciais em função dos ajustes na injeção e/ou queima) e calcular o valor da Função Objetivo F (função de aptidão).

4) **Condições de parada (enquanto critérios de parada não estiverem satisfeitos):**

- Gerar população nova a partir de $P(t-1)$ (população anterior). Para a seleção dos cromossomos que irão gerar descendentes escolhem-se os melhores indivíduos da população dividida por subgrupos ou através da equação da probabilidade de sobrevivência (10). Utiliza-se nesta etapa de processos de *crossover* e *mutação*.
- Re-avaliar $P(t)$ (população atual) e retornar ao Passo 3.

5) **Refinamento da solução:** procurar o cromossomo que maximiza a função de aptidão. Nesta etapa, busca-se o aumento na precisão do resultado através de um refinamento maior no procedimento de cálculo da Função Objetivo.

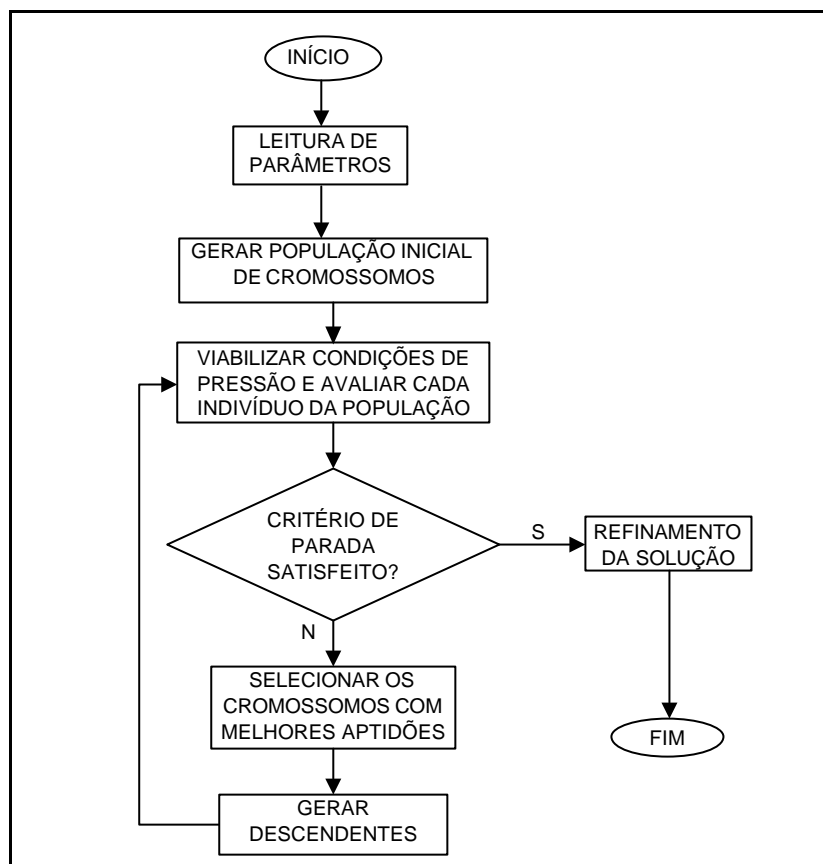


FIGURA 15: Fluxograma do algoritmo genético híbrido

4.5.2. Aplicando o algoritmo GRASP ao processo de planejamento da movimentação de gás

Considere para o sistema de planejamento de movimentação de gás, uma matriz X com componentes x_{ij} de 0 (zero) e 1 (um), constituída de todas as configurações possíveis do sistema de compressão de gás de uma determinada plataforma. Para cada configuração de operação de compressores j de uma plataforma i , a função lucro é calculada. A solução que se quer determinar é aquela que contém o conjunto J de configurações que irá resultar no maior lucro total para o sistema integrado. Neste problema consideramos este lucro como sendo a soma das parcelas de receitas menos os custos operacionais. Uma solução parcial é um conjunto de configurações de operação de compressores das plataformas consideradas, sendo que o escoamento de gás resultante desta configuração calculada a partir da equação (21) poderá ou não ser viável, assim, em outra etapa será necessário viabilizar este escoamento do gás através da malha. O conjunto de

solução J se constrói incorporando um elemento de cada vez até que o conjunto J seja uma solução viável do conjunto.

Para cada plataforma, consideramos todas as possibilidades de configuração de operação dos compressores. Sendo n o número de compressores, o número de configurações será 2^n .

A lista restrita de candidatos (LCR) será constituída por configurações possíveis que atenderem a seguinte condição:

$$LCR \geq LUCRO_{max} - a (LUCRO_{max} - LUCRO_{min}). \quad (54)$$

Assim, as melhores configurações de operação de compressores de uma determinada plataforma serão aquelas com maiores valores de LUCRO e serão incluídos na LCR.

Em cada iteração, na fase de construção, uma configuração de operação dos compressores será escolhida aleatoriamente dentro da LCR para cada plataforma formando a solução parcial do sistema, conforme mostrado na tabela 1.

Plataforma	Configuração de operação de compressores
A	001
B	010
C	100

Tabela 1: Configuração de operação de compressores

Como para cada configuração de operação de compressores de uma plataforma está associado um valor da Função Objetivo e teremos um valor da Função Objetivo global da solução que será corrigida após a realização do processo de balanço de pressões e fluxos do gasoduto. Este balanço é realizado pelo método de Newton-Raphson.

No processo de busca local, para cada solução construída, substitui-se a configuração atual de cada plataforma pela configuração que possui valor da Função Objetivo máxima.

Após cada substituição de uma configuração em uma determinada plataforma deve-se recalcular o balanço de fluxo e pressões da malha de gasodutos pelo método de Newton-Raphson e também o valor da Função Objetivo.

O maior valor da Função Objetivo após cada passo, deve ser armazenado como Lucro Máximo.

Repete-se a operação para o número de iterações definidas e a solução será a Função Objetivo máxima.

A seguir será descrito o procedimento do método GRASP para o planejamento da movimentação de gás (representado na Figura 16):

a) Leitura de parâmetros:

Produção de gás, *gas lift*, dados dos compressores e gasodutos, matriz de incidência da rede (**A**), matriz de ciclos (**B**), pressão de entrega, fator de paradas programadas, demanda de gás, preços do gás, receitas unitárias do *gas lift*, conjunto de configurações operacionais dos compressores para cada plataforma, *a*, *max iter*, etc.

b) Balanço volumétrico individual:

Para cada plataforma calcular:

- Os valores de s_i para cada configuração operacional possível através da equação (21), levando-se em consideração as restrições (22) a (32);
- A função lucro g_{ij} de cada plataforma i para cada configuração possível j . Como estamos considerando as plataformas individualmente, a análise de pressão através dos gasodutos não será realizada nesta etapa.

c) Fase de construção:

- Definir a lista restrita de candidatos LCR para cada plataforma utilizando a equação (11) através da configuração $\mathbf{x}_{i\min}$ (configuração de operação de compressores da plataforma i que resulta em menor valor de lucro g_{ij}) e $\mathbf{x}_{i\max}$ (configuração de operação de compressores da plataforma i que resulta em maior valor de lucro g_{ij});
- Selecionar \mathbf{x}_i aleatoriamente da LCR para cada uma das plataformas.
- Resolver o sistema (39) de balanço de fluxos e pressões (método de Newton-Raphson). Neste ponto, teremos calculado os valores de fluxo de equilíbrio f_k de cada duto k e também as pressões p_i em cada um dos nós da rede integrada.
- Verificar se as condições de pressão estão sendo satisfeitas para cada plataforma ou nó, isto é, se a pressão de descarga máxima dos compressores é maior ou igual que a pressão requerida para transportar o gás até o seu destino final.
- Caso estas condições não sejam satisfeitas:
 - Aumentar a injeção de gás para armazenamento até que as condições de pressão sejam atendidas, ou até que se alcance o limite máximo de injeção.
 - Aumentar a queima de gás nas plataformas até que as condições de pressão sejam atendidas.

Recalcular os valores de s_i (menores que os iniciais em função dos ajustes na injeção e/ou queima) e calcular o valor da função lucro F (Função Objetivo).

d) Fase de busca local:

- Para a solução gerada na Fase de construção, para cada plataforma, pesquisar a vizinhança desta, substituindo a configuração atual pela configuração que possui valores da Função Objetivo máxima.

- Após cada substituição de uma configuração de uma determinada plataforma, deve-se resolver novamente o sistema de equações (39), viabilizar as condições de pressões dos nós e recalcular o valor da Função Objetivo lucro do sistema integrado.
- O maior valor da Função Objetivo após cada passo deve ser armazenado como Lucro máximo.
- Este procedimento é repetido até que todas as plataformas tenham as suas vizinhanças analisadas.

e) Repetem-se as etapas **c** e **d** para o número máximo de iterações definidas *max iter* e a solução será a configuração de operação dos compressores do sistema integrado que dá o Lucro máximo.

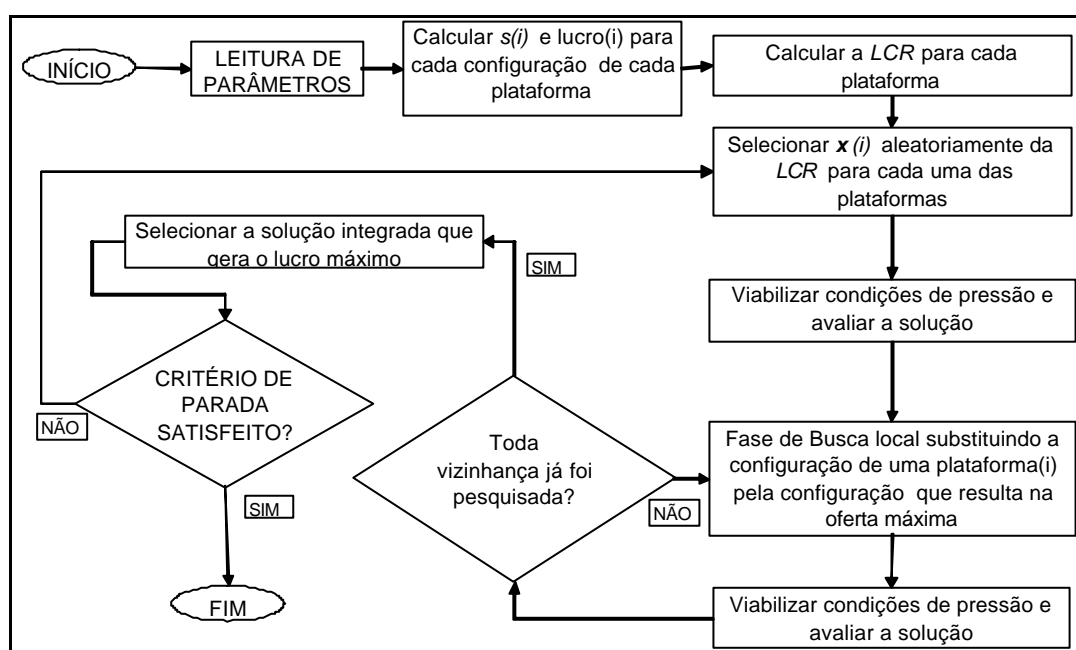


FIGURA 16: Fluxograma do algoritmo GRASP híbrido

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

5.1. Avaliação computacional

Descreveremos aqui as simulações realizadas. Primeiramente se descrevem a base de dados, posteriormente as simulações realizadas:

- Avaliação do algoritmo genético híbrido.
- Avaliação do algoritmo GRASP híbrido.
- Comparação destes algoritmos com os resultados utilizando um método exato.

Os testes dos sistemas foram realizados em um computador Pentium 2.3 GHz, 197Mb de RAM. Foram testadas as metaheurísticas: GRASP e Algoritmo Genético, e comparados com um software que utiliza um algoritmo exato, o LINGO.

Para cada simulação, se coletaram os seguintes valores de Função Objetivo e tempo de CPU.

5.1.1. Descrição da Base de Dados

Um total de 33 redes diferentes foi utilizado para testar os sistemas.

O propósito de desenhar e configurar uma base de dados com instâncias de problemas tem os seguintes objetivos:

- Testar a precisão dos algoritmos propostos.
- Criar um ponto de referência para verificar qual algoritmo é mais confiável e eficiente nas condições de teste.

Os dados iniciais dos problemas são:

- Número de dutos, número de nós, número de plataformas interligadas em baixa pressão.
- Dados de equipamentos da plataforma:
 - a. $q_{ga}[i], q_{gl}[i], ntc[i], Kca[i], Kcb[i], Kcc[i], Kcd[i], Kce[i], Kcf[i], cons_{tg}[i], q_{gst}[i], caprecvap}[i]$.
 - b. $cons_{tc}[i][j], indispon[i][j], fmpp[i][j]$.

- c. $Preço[i]$
 - d. $Config\ TC\ xtc2[i][j], xtc3[i][j], xtc4[i][j], xtc6[i][j]$.
 - e. $cons_{tc}[i][j]$.
- Dados da rede de gasodutos:
 - a. matriz de incidência \mathbf{A} ;
 - b. matriz dos ciclos \mathbf{B} ;
 - c. constante dos dutos c_k .

REDE 01

Para a rede 01, foram considerados as seguintes malhas com ciclos:

- a) com 20 nós, 26 dutos, 10 plataformas, 7 ciclos e 30 compressores.
- b) com 21 nós, 27 dutos, 11 plataformas, 7 ciclos.
- c) com 22 nós, 28 dutos, 12 plataformas, 7 ciclos.
- d) com 23 nós, 29 dutos, 13 plataformas, 7 ciclos.

Para cada malha, foram analisados subproblemas com 1, 2 e 3 compressores por plataforma.

REDE 02

Para a rede 02, foram consideradas as seguintes malhas do tipo árvore:

- a) com 20 nós, 19 dutos, 10 plataformas.
- b) com 21 nós, 20 dutos, 11 plataformas.
- c) com 22 nós, 21 dutos, 12 plataformas.
- d) com 23 nós, 22 dutos, 13 plataformas.

Para cada malha, foram analisados subproblemas com 1, 2 e 3 compressores por plataforma.

REDE 03

Para a rede 03, foram consideradas as seguintes malhas com ciclos:

- a) com 22 nós, 29 dutos, 10 plataformas, 7 ciclos.
- b) com 23 nós, 30 dutos, 11 plataformas, 7 ciclos.

c) com 24 nós, 31 dutos, 12 plataformas, 7 ciclos.

Para cada malha, foram analisados subproblemas com 1, 2 e 3 compressores por plataforma.

REDE 60 NÓS

Foram também realizados testes com redes de 60 nós, 37 plataformas, 102 compressores e foram considerados problemas com 59 dutos (tipo árvore), 64 dutos, 70, 75 e 80 dutos.

REDE 70 NÓS

As redes de 70 nós, foram analisadas com 45 plataformas, 118 compressores e foram considerados problemas com 69 dutos (tipo árvore), 74 dutos, 79, 84 e 89 dutos.

REDE 80 NÓS

As redes de 80 nós, foram analisadas com 49 plataformas, 137 compressores e foram considerados problemas com 79 dutos (tipo árvore), 84 dutos, 89, 94 e 99 dutos.

REDE 100 NÓS

As redes de 100 nós, foram analisadas com 64 plataformas, 177 compressores e foram considerados problemas com 99 dutos (tipo árvore), 104 dutos, 109, 114 e 118 dutos.

5.1.2. Tabelas de resultados

Nas Tabelas 2 a 8 estão listados os resultados da otimização das redes testadas. Estas tabelas nos mostram os valores da Função Objetivo e o tempo de otimização em segundos para os sistemas: LINGO, Algoritmo Genético e GRASP.

OBSERVAÇÃO: O tempo de processamento do LINGO refere-se somente ao tempo da simulação final após a reorientação da rede. Não foi computado o tempo requerido para efetuar esta reorientação.

REDE 01	compressores	LINGO		A.G		GRASP	
		FO	t(seg)	FO	t(seg)	FO	t(seg)
10 PLAT	10	712500	1	712500	1,52	712500	0,32
	20	743000	<1	743000	1,47	743000	0,29
	30	743000	1	743000	1,51	743000	0,421
11 PLAT	10	780000	<1	780000	1,282	780000	0,401
	20	814000	<1	814000	1,082	814000	0,33
	30	814000	<1	814000	1,152	814000	0,521
12 PLAT	10	847500	1	847500	1,493	847500	1,012
	20	885000	1	885000	1,392	885000	0,42
	30	885000	<1	885000	1,392	885000	0,501
13 PLAT	10	915000	1	915000	1,322	915000	0,481
	20	956000	1	956000	1,322	956000	0,45
	30	956000	<1	956000	1,262	956000	0,551

Tabela 2. Resultados da Rede 01

REDE 02	compressores	LINGO		A.G		GRASP	
		FO	t(seg)	FO	t(seg)	FO	t(seg)
10 PLAT	10	712500	<1	712500	0,83	712500	0,15
	20	743000	<1	743000	0,84	743000	0,17
	30	743000	<1	743000	0,79	743000	0,19
11 PLAT	10	780000	<1	780000	0,36	780000	0,311
	20	814000	<1	814000	0,39	814000	0,311
	30	814000	<1	814000	0,401	814000	0,341
12 PLAT	10	847500	1	847500	0,63	847500	0,351
	20	885000	1	885000	0,42	885000	0,38
	30	885000	<1	885000	0,42	885000	0,401
13 PLAT	10	915000	1	915000	0,411	915000	0,321
	20	956000	1	956000	0,401	956000	0,34
	30	956000	<1	956000	0,661	956000	0,391

Tabela 3. Resultados da Rede 02

REDE 03	compressores	LINGO		A.G		GRASP	
		FO	t(seg)	FO	t(seg)	FO	t(seg)
10 PLAT	10	712500	<1	712500	2,11	712500	0,661
	20	743000	<1	743000	2,36	743000	0,711
	30	743000	<1	743000	2,53	743000	0,6
11 PLAT	10	780000	1	780000	1,662	780000	0,271
	20	814000	1	814000	1,382	814000	0,34
	30	814000	1	814000	1,842	814000	0,33
12 PLAT	10	847500	1	847500	1,402	847500	0,331
	20	885000	1	885000	1,452	885000	0,37
	30	885000	<1	885000	1,823	885000	0,331

Tabela 4. Resultados da Rede 03

	LINGO		A.G		GRASP	
	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)
60 nós e 59dutos	4,68E+07	8	4,71E+07	302	4,73E+07	312,1
60 nós e 64dutos	4,88E+07	10	4,84E+07	101	4,87E+07	20,3
60 nós e 70dutos	4,92E+07	14	4,88E+07	25,5	4,92E+07	5,3
60 nós e 75dutos	4,92E+07	16	4,88E+07	21,7	4,93E+07	5,7
60 nós e 80dutos	4,93E+07	17	4,88E+07	30,6	4,93E+07	6,5

Tabela 5. Resultados das Redes com 60 nós

	LINGO		A.G		GRASP	
	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)
70 nós e 69dutos	6,05E+07	2	6,05E+07	7,5	6,06E+07	6,3
70 nós e 74dutos	6,06E+07	8	6,05E+07	22,3	6,06E+07	12,23
70 nós e 79dutos	6,08E+07	10	6,06E+07	24,7	6,06E+07	9,2
70 nós e 84dutos	6,07E+07	9	6,06E+07	35	6,06E+07	11,1
70 nós e 89dutos	6,04E+07	2	6,06E+07	44,4	6,06E+07	10,8

Tabela 6. Resultados das Redes com 70 nós

	LINGO		A.G		GRASP	
	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)
80 nós e 79dutos	7,34E+07	9	7,32E+07	529	7,33E+07	89
80 nós e 84dutos	7,61E+07	10	7,58E+07	61,9	7,59E+07	19,55
80 nós e 89dutos	7,62E+07	20	7,59E+07	34,5	7,59E+07	11,106
80 nós e 94dutos	7,62E+07	13	7,59E+07	41,3	7,59E+07	15,2
80 nós e 99dutos	7,62E+07	26	7,59E+07	64,5	7,59E+07	17,845

Tabela 7. Resultados das Redes com 80 nós

	LINGO MALHA ORIGINAL		LINGO		A.G		GRASP	
	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)	FO	tempo(seg)
100 nós e 99dutos	7,91E+07	19	7,91E+07	19	8,07E+07	607	8,07E+07	600
100 nós e 104dutos	7,72E+07	9	8,33E+07	4	8,32E+07	42	8,30E+07	25
100 nós e 109dutos	7,72E+07	5,1	8,33E+07	4	8,32E+07	48	8,30E+07	26
100 nós e 114dutos	inviável	-	8,34E+07	4	8,32E+07	50	8,30E+07	32
100 nós e 119dutos	inviável	-	8,34E+07	4	8,32E+07	93	8,30E+07	44

Tabela 8. Resultados das Redes com 100 nós

5.2. Análise dos resultados

Os testes realizados procuraram abranger uma grande variedade de redes desde as mais simples, com pequeno número de plataformas e sem ciclos, até redes complexas com grande número de plataformas e vários ciclos.

Nos testes realizados utilizando o sistema LINGO, as primeiras soluções encontradas da Função Objetivo foram sempre piores que os das metaheurísticas algoritmo genético e GRASP. Foi verificado que o problema estava no cálculo dos fluxos dos gasodutos em que o sentido do fluxo ótimo era o oposto do definido inicialmente, e com o redirecionamento dos fluxos utilizando como base os resultados dos métodos GRASP e algoritmo genético, chegou-se a valores ótimos muito próximos entre os métodos. Este problema do algoritmo exato reside no fato

de que a equação de perda de carga nos gasodutos (19) é **não diferenciável** e a condição necessária para utilização dos métodos clássicos de otimização é que tanto a Função Objetivo quanto as restrições sejam diferenciáveis para assegurar a busca do valor ótimo global. Outro problema verificado no sistema exato é que a parcela referente à multa por não atendimento ao mínimo negociado (*take or pay*) entre as partes compradora e vendedora também é não diferenciável. Este problema foi contornado nos testes fazendo com que este valor mínimo (do *take or pay*) nunca fosse atingido, garantindo assim a diferenciabilidade da Função Objetivo. Para as metaheurísticas testadas estas condições foram programadas sem dificuldades e não representam problemas para o sistema de planejamento da movimentação de gás.

Para sistemas com pequeno número de plataformas, verifica-se que as metaheurísticas algoritmo genético e GRASP têm bom comportamento. Praticamente em todas as redes chegam-se aos mesmos valores da Função Objetivo do LINGO com a rede dirigida e fluxos redirecionados de tal forma que os fluxos tenham valores positivos. Os tempos de otimização são semelhantes, sendo que entre as metaheurísticas o Sistema GRASP tem se mostrado mais rápido que o algoritmo genético.

Para as metaheurísticas testadas, o sistema GRASP tem uma eficiência melhor que o algoritmo genético.

Utilizando a rede original, em muitos casos não se conseguiu a solução para o algoritmo exato (LINGO), sendo que o programa era interrompido por inviabilidade, devido a problemas de convergência no cálculo de fluxos e pressões dos gasodutos. Estes resultados podem ser verificados na tabela 8, resultados da rede de 100 nós. Nos demais casos, a solução encontrada era um ótimo local. Assim, para o LINGO, a rede deve ser necessariamente redirecionada de forma que todos os fluxos tenham valores positivos conseguindo assim valores ótimos locais comparáveis aos valores heurísticos obtidos. Para os testes de pequeno porte, essas modificações foram rápidas. Já no caso dos testes de grande porte, muitas modificações foram necessárias para que o algoritmo exato encontrasse ótimos locais comparáveis às soluções heurísticas. Isto é, o algoritmo exato, sem conhecimento das soluções

heurísticas sempre se comportou muito pior que os dois algoritmos heurísticos testados (em termos das soluções locais encontradas) e sua performance não poderia ser melhorada se não se contasse com as soluções heurísticas. O tempo de processamento do LINGO registrado nos resultados de testes refere-se somente ao tempo de otimização da última simulação.

Para o caso de redes com muita restrição ao escoamento como as redes de 60 nós e 59 dutos, 80 nós e 79 dutos, 100 nós e 99 dutos, o tempo de processamento das metaheurísticas algoritmo genético e LINGO crescem em função da etapa de viabilização das condições de fluxo e pressões.

Verifica-se a partir dos resultados dos testes que as metaheurísticas algoritmo genético e GRASP tiveram ótimo desempenho na solução dos diversos tipos de redes em termos de estabilidade, de precisão e também em tempo de processamento. As hipóteses simplificadoras complementares que foram utilizadas nos testes para que se pudesse utilizar o LINGO, não são necessárias para o caso das metaheurísticas. Assim, as metaheurísticas desenvolvidas neste trabalho, podem ser aplicadas para qualquer tipo de rede e utilizando todas as equações na sua formulação original mesmo que sejam não diferenciáveis.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

- O algoritmo genético híbrido e o sistema GRASP híbrido apresentaram excelentes resultados para resolver o problema da movimentação de gás.
- O algoritmo exato (LINGO) só pode ser utilizado após o redirecionamento da rede para que todos os fluxos fossem positivos e também fazendo com que os níveis mínimos de demanda (*take or pay*) sempre fossem alcançados. Desta forma, o problema transformou-se em um sistema diferenciável podendo-se assim, utilizar os métodos clássicos de otimização.
- Os resultados comprovam uma maior robustez dos métodos heurísticos para o sistema em análise em relação ao cálculo de fluxo e pressões da malha de gasodutos e conseqüentemente da análise integrada do sistema de compressão e escoamento.
- Os testes realizados propiciaram um melhor entendimento da área de movimentação de gás e também da pesquisa operacional.
- As informações coletadas durante o desenvolvimento da tese serão de grande utilidade para os novos projetos de melhorias do sistema de planejamento de movimentação e compressão de gás das empresas de produção e distribuição de gás natural.
- Testes efetuados com o sistema proposto, baseado em um modelo misto-inteiro quadrático, que utiliza um algoritmo híbrido de algoritmo genético para geração de populações, outro que utiliza o algoritmo GRASP e um algoritmo exato para o balanço de fluxos e pressões (o método de Newton-Raphson), têm mostrado excelentes resultados, tanto em termos de precisão dos resultados, como em tempo total de processamento.

- A metodologia desenvolvida neste trabalho proporciona condições de análise mais detalhada dos resultados, principalmente para o cálculo de fluxo e perda de carga através dos gasodutos.
- Estes algoritmos desenvolvidos permitem uma completa visibilidade dos fluxos e pressões através da rede de gasodutos e sistema de compressão. Assim, poderão ser utilizados para suportar tomada de decisão encontrando o nível ótimo de operação do sistema integrado.
- Estes sistemas tornam as companhias de produção de gás associado ao óleo, aptas a melhorar o processo de compressão e escoamento de gás calculando o máximo volume de gás através da rede de gasodutos em tempo real, encontrando melhores soluções através de capacidades disponíveis não utilizadas, aumentando receitas sem investimento adicional em facilidades.
- Este sistema proporciona condições de obter o máximo aproveitamento do gás associado produzido sem violar as limitações de operação tanto do sistema de compressão quanto de escoamento de gás.
- Este modelo desenvolvido poderá também ser utilizado em outras unidades de produção de gás inclusive em redes complexas de gasodutos com estações recompressoras. A precisão e rapidez dos resultados também poderão tornar o modelo apto para utilização *on-line* de operação dos gasodutos e inclusive para dimensionamento destas redes.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aprofundar estudos para resolução do problema através de algoritmos exatos.
- Estudar a aplicação destas técnicas ao caso de transporte de gás em terra, onde a determinado trecho de gasodutos existem estações de recompressão.
- Estudar a inclusão de variáveis em estado transiente para possibilitar a utilização deste sistema para utilização em planejamento *on-line* de redes de gasodutos.
- Desenvolver estudos de um sistema que utiliza rede adaptativa para dimensionar uma malha futura de gasodutos. Neste caso, o programa irá definir a melhor malha de gasodutos para escoar o gás disponível.
- Desenvolver uma interface gráfica para tornar o sistema amigável e facilitar a visualização de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAZARAA, M. S., SHERALI, H. D., SHETTY, C. M. (1993) *Nonlinear Programming, Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- BEMPORAD, A.; MIGNONE, D.; MORARI, M. (1999) *An Efficient Branch and Bound Algorithm for State Estimation and Control of Hybrid Systems*. European Control Conference (<http://citeseer.ist.psu.edu/bemporad99efficient.html>).
- BRONSON, R. (1985) *Pesquisa Operacional*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 318p.
- CARTER, R. G. (1998) *Pipeline optimization: Dynamic programming after 30 years*. In: Proceedings of the 30th PSIG Annual Meeting, paper number PSIG - 9803, Denver, EUA (www.psig.org/papers/1990/9803.pdf).
- CASTRO, A. O. de S., FRANÇA, M. A., DA SILVA, N. M., IAMASHITA, E.K., DIAS, A. L. C. (2000) *Integração de Modelos Matemáticos com Base de Dados Corporativas: O Planejamento da Movimentação e Utilização do Gás Natural*. XXXII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Viçosa-MG. p. 122-128.
- CHAVES, J. R. da C. (1999) *Linearização da Equação de WEYMOUTH*, PETROBRAS, Rio de Janeiro.
- CRUZ, H. V. da. (1992) *Programação Linear – Introdução*. Petrobrás SERINF/SEQUAL, Rio de Janeiro, 44p.
- DE WOLF, D., SMEERS, Y. (1996) *Optimal Dimensioning of Pipe Networks With Application to Gás Transmission Networks*. Université Catholique de Louvain, Belgium.

- DE WOLF, D. (2003) *Mathematical Properties of Formulations of the Gas Transmission Problem*, Université de Lille 3, B.P. 149, 59 653 Villeneuve D'ascq Cedex, France. (dewolf@univ-lille3.fr).
- DIAZ, A. (1996) *Optimización Heurística y Redes Neuronales*. Editorial Paraninfo. Madrid, Espana , p. 312.
- FEO, T. A., RESENDE, M. G. C. (1995) Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6: p.109-133.
- FLORES-VILLARREAL H. J., RÍOS-MERCADO, R. Z. (2003) *Computational experience with a GRG method for minimizing fuel consumption on cyclic natural gas networks*. In: N. E. Mastorakis, I. A. Stathopoulos, C. Manikopoulos, G. E. Antoniou, V. M. Mladenov y I. F. Gonos, editores, *Computational Methods in Circuits and Systems Applications* WSEAS Press, Atenas, Grecia, p. 90–94.
- FLORES-VILLARREAL H. J., RÍOS-MERCADO, R. Z. (2003a) *Efficient operation of natural gas pipeline networks: Computational finding of high quality solutions*. In: *Proceedings of the International Applied Business Research Conference*, Acapulco, MX. p. 2323-2351.
- FRANÇA, M. A., DA SILVA, N. M., CHAVES, J. R., IACHAN, R. (1999) *Equacionamento do Modelo Matemático do Sistema PLANGAS*. – PETROBRAS, TI/PS/PESOP, Rio de Janeiro.
- GLOVER, F., LAGUNA, M., MART, R. (2003) *Scatter Search and Path Relinking: Advances and Applications*. In: Glover, F. and Kochenberger, G. (editors), *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer, Boston, EUA. p. 1-35.
- IACHAN, R., IAMASHITA, E. K., FRANÇA, M. A., DA SILVA, N. M., CHAVES, J. R. (2001) *A Decision Support System for Natural Gas Operational Planning in a Gas Pipeline Network in Brazilian Campos Basin*. PETROBRAS/TI/PS/PESOP e PETROBRAS/UNBC/PM/PLC, Rio de Janeiro.

- IAMASHITA, E.K. (2002) *Teste do Módulo Econômico do Sistema Otimizador da Movimentação de Gás*. Tese de Mestrado, Laboratório de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo. Universidade Estadual do norte Fluminense, Macaé-RJ.
- IAMASHITA, E.K., DIAS, A . L. C., FRANÇA, M. A, DA SILVA, N. M., CHAVES, J. R., IACHAN, R. (2003) A Nova Versão do Sistema de Previsão da Movimentação de Gás da Bacia de Campos. I SPCADE – I SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO, CONTROLE E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EMPRESARIAL DO E&P – 2003, PETROBRAS. SALVADOR, BA., p. 191-194.
- IAMASHITA, E. K., GALAXE, F., ARICA, J., JUSTINIANO, L. R. S., IACHAN, R. (2005 a) *UM ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO PARA O PLANEJAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DE GÁS DA BACIA DE CAMPOS*. XXXVII SBPO- Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Gramado, RS, p. 99-102.
- IAMASHITA, E. K., GALAXE, F., ARICA, J., (2005 b) *A New Integrated Planning Model for Gas Compression and Transmission Through a Complex Pipeline Network*. RIO PIPELINE CONFERENCE & Exposition. Rio de Janeiro, IBP1145_05.
- KELLEY, C. T. (1999) *Iterative Methods for Optimization, Frontiers in Applied Mathematics*, SIAM, Philadelphia, Penn, p. 180.
- KIM, S., RIOS-MERCADO R. Z., BOYD, E. A. (2000) *Heuristics for minimum cost steady-state gas transmission networks*. In: M. Laguna y J. L. González-Velarde, editores, Computing Tools for Modeling, Optimization, and Simulation, capítulo 11, Kluwer, Boston, EUA. p. 203–213.
- LALL, H. S., PERCELL, P. B. (1990) *A dynamic programming based gas pipeline optimizer*. In: A. Bensoussan y J. L. Lions, editores, Analysis and Optimization of Systems, vol. 144, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin, Alemanha, p. 123–132.

- MORALES, Y. V. (2002) *Pre-procesamiento de un Problema de Optimización de Redes de Gas Natural*. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica División de Estudios de Posgrado. San Nicolás de Los Garza, N. L. MX.
- PERCELL, P. B., RYAN, M. J.(1987) *Steady-state optimization of gas pipeline network operation*. In: Proceedings of the 19th PSIG Annual Meeting, paper number PSIG-8703, Tulsa, EUA.
- PETROBRAS (1998) *Gás Natural – O Combustível do Século XXI garantido pela PETROBRAS desde hoje*. PETROBRAS/ABASTECIMENTO – Superintendência de Marketing e Comercialização – GEGAS: Gerência de Gás. Rio de Janeiro.
- RESENDE, M. G. C. (1998) *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP)*. AT&T Labs Research Technical Report, Floram Park, NJ, USA, (E-mail: mgrs@research.att.com).
- RIOS-MERCADO, R. Z., WU, S., SCOTT, R.L., BOYD, A. (2000) *Preprocessing on Natural Gás Transmission Networks*. Universidad Autónoma de Nuevo Leon, AP 111 – F, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, NL 66450, México, (e-mail: roger@uanl.mx).
- RÍOS-MERCADO, R. Z., Wu, S., Scout, L. R., Boyd, E. A. (2002) *A reduction technique for natural gas transmission network optimization problems*. *Annals of Operations Research*, 117(1-4), p. 217-234.
- ROMENUS, K. A. (2004) *Un Procedimiento Heurístico Para un Problema de Diseño de Redes Multiproducto con Capacidad Finita y Cargos Fijos*. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica División de Estudios de Posgrado. San Nicolás de Los Garza, N. L. MX.

- ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J. A. D. (2006) *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*, Capítulo 1, p. 1-90, Capítulo 5, p. 315-321, Capítulo 14, p. 561-676, Editora Interciência, RJ.
- SILVA NETO, A. B. (2001) *Introdução aos Algoritmos Genéticos*. Grupo de Pesquisa em Inteligência Artificial, Escola de Informática, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas, RS.
- SIMÕES, J. A. (1995) *Curso de Pesquisa Operacional Aplicada*. Petrobrás SERPLAN/SENOR, Salvador, BA.
- SOUZA, M. J. F. (2002) *Inteligência Computacional para Otimização*. DECOM/ICEB/UFOP.
- WEATHERFORD (2006) Ver site: http://www.weatherford.com/weatherford/groups/public/documents/production/gl_applications.hcsp
- WONG, P. J., LARSON, R. E. (1968) *Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming*. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-13(5): p. 475–481.
- WRIGHT, S. J. (2000) *Algorithms and Software for Linear and Nonlinear Programming*. Mathematics and Computer Science Division – Argonne National Laboratory. Argonne, IL.
- WU, S., BOYD E. A., SCOTT, L. R. (1996) *Minimizing fuel consumption at gas compressor stations*. In: J. J.-W. Chen y A. Mital, editores, *Advances in Industrial Engineering Applications and Practice I*, p. 972–977, Cincinnati, EUA.
- WU, S. (1998) *Steady-State Simulation and Fuel Cost Minimization of Gas Pipeline Networks*. PhD. Thesis, University of Houston, Houston, EUA.
- ZALETA, D. C. (2003) *Modelos de Optimización Entera Mixta No Lineal En Sistemas de Transporte de Gas Natural*. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León,

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica División de Estudios de Posgrado.
San Nicolás de Los Garza, N. L. MX.

ZANAKIS, S. H., EVANS, J.R. (1981) Heuristic Optimization: Why, When, and How to Use It. Interfaces, Vol.11, N. 5, p. 84-91.

APÊNDICES

APÊNDICES

APÊNDICE A - DEFINIÇÕES

Barriletes: representa o processo de união de fluxos. Pode ser uma tubulação coletora, um vaso ou um conjunto de instalações.

Bombeamento Multifásico: bombeamento do gás em baixa pressão, juntamente com o óleo e /ou água através de bombas especiais, projetadas especificamente para este tipo de condição.

Campo de Petróleo ou de Gás Natural: área produtora de petróleo ou gás natural, a partir de um reservatório contínuo ou de mais de um reservatório, a profundidades variáveis, abrangendo instalações e equipamentos destinados à produção.

Comercialização do gás natural – ato ligado à transferência de titularidade de um volume de gás natural para uma determinada utilização ou aplicação.

Consumo de Gás: volume de gás utilizado na plataforma, com objetivo de gerar energia elétrica, combustível para operar turbo e motocompressores, gás combustível em baixa pressão para fornos, fornalhas, *gas stripper*, etc.

Distribuição: atividade de comercialização por atacado com a rede varejista ou com grandes consumidoras de combustíveis, lubrificantes, asfaltos e gás liquefeito envasado, exercida por empresas especializadas, na forma das leis e regulamentos aplicáveis.

Estocagem de Gás Natural: armazenamento de gás natural em reservatórios próprios, formações naturais ou artificiais com o objetivo de garantir o equilíbrio entre a oferta e demanda de gás.

Fluxo Multifásico: quando ocorre o fluxo no mesmo duto ou equipamento de mais de uma fase, ou seja, no caso, trata-se de escoamento de óleo, gás e água no mesmo duto.

Função Objetivo: função que pretendemos minimizar ou maximizar. Por exemplo, no nosso estudo estamos interessados em maximizar o lucro e minimizar os custos. A maioria dos problemas tem somente uma Função Objetivo.

Gás associado: gás natural produzido de jazida onde é encontrado dissolvido no petróleo ou em contato com o petróleo subjacente saturado de gás. Este gás pode ter preços diferenciados de venda em função do seu poder calorífico.

Gás de Alta: Gás em alta pressão, após ser comprimido por moto ou turbocompressores, com pressão suficiente para ser transferido para o ponto final de escoamento através de gasodutos, consumido em alta pressão ou utilização para *gas lift*.

Gás de Baixa: é o gás antes de ser comprimido pelos motocompressores ou turbocompressores com pressão insuficiente para ser transferido para o ponto final de escoamento através de gasodutos, ou utilização em alta pressão.

Gás Disponível para venda: parcela do volume de gás produzido e comprimido em alta pressão, que for enviado para o ponto final de venda ou distribuição.

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

Gás não associado: gás natural que é produzido de jazida de gás seco ou de jazida de gás e condensado. É aquele que, no reservatório, está livre ou tem quantidades muito pequenas de óleo.

Gás não utilizado ou queimado: parcela do volume de gás associado produzido que não for utilizado para consumo, injeção ou disponibilizado para venda. Este destino do gás é o mais indesejável de todos para o sistema, excluindo a parcela do volume de gás queimado para a manutenção do piloto do *flare* aceso, que deve ser

mantido na plataforma por motivo de segurança operacional. A queima de gás contribui para a diminuição da quantidade de gás disponibilizada para venda e, conseqüentemente, a sua receita. A queima é geralmente proveniente de restrições do sistema de compressão, malha de escoamento e falta de demanda.

Gás Natural: mistura de hidrocarbonetos leves que permanece no estado gasoso, sendo encontrado em rochas porosas no subsolo, freqüentemente acompanhado de petróleo. A composição do gás natural pode variar bastante. Basicamente, ele é composto de metano, etano, propano e, em menores proporções de outros hidrocarbonetos de maior peso molecular. Normalmente, apresenta baixos teores de contaminantes, como nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre. Por existir no estado gasoso, não precisa ser atomizado para queimar, proporcionando uma combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico. Depois de tratado e processado, o gás natural é largamente utilizado em residências, indústrias e veículos.

Gasodutos: dutos que permitem o transporte de gás natural de um ponto a outro.

Índice de Confiabilidade de Compressores: percentual do tempo em que o compressor efetivamente esteve em operação normal, acrescido do tempo de manutenção programada durante o período de tempo analisado.

Índice de Disponibilidade de Compressores: índice que mede o percentual do tempo que o compressor esteve em operação normal, em relação ao período total analisado.

Indústria do Petróleo: conjunto de atividades econômicas relacionadas com a exploração, desenvolvimento, produção, refino, processamento, transporte, importação e exportação de petróleo, gás natural, outros hidrocarbonetos fluidos e seus derivados.

Injeção de Gás: dependendo do sistema de injeção de gás, poderemos ter dois tipos diferentes. O primeiro para armazenamento, com o objetivo de injetar o gás excedente, em função de alguma limitação do sistema de compressão ou

escoamento de gás, como por exemplo, limitação da capacidade de compressão, capacidade dos gasodutos, demanda de gás, etc. Quando houver demanda de gás acima do volume disponibilizado para venda, o gás acumulado injetado poderá ser produzido, de forma a maximizar a receita e lucro do gás movimentado. O outro sistema de injeção refere-se ao sistema de injeção de gás para recuperação secundária, que consiste na injeção de gás na capa para manutenção da pressão do reservatório, com o objetivo de maximizar a recuperação final de óleo do reservatório. Neste caso, o ganho econômico, em função da recuperação adicional de óleo, deverá ser estimado.

Motocompressores: equipamentos responsáveis por elevar a pressão do gás, principalmente para o de baixa pressão para permitir a sua sucção através dos turbocompressores.

Otimização: processo de encontrar variáveis que minimizam ou maximizam a Função Objetivo de variáveis de decisão numéricas, sujeitas a restrições nos valores das variáveis.

Pesquisa Operacional: método que consiste na aplicação de uma modelagem científica a problemas que dizem respeito ao controle de sistemas organizados, com a finalidade de obter as soluções que melhor atendam aos objetivos da organização como um todo.

Petróleo: todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru e do condensado;

Planejamento da movimentação de gás: processo de análise da curva de produção de gás associado, gás não associado, *gas lift*, malha de escoamento de gás e características do sistema de compressão para antever o destino deste gás em cada ponto da malha, bem como o seu destino final, com o objetivo de verificar futuros pontos de ineficiência de escoamento e compressão do gás produzido. Outro objetivo é o de maximizar o lucro final da movimentação de gás em cada período analisado. Temos que analisar a previsão integrada de movimentação de gás das plataformas, muitas vezes, até o fim de sua produção, para detectar

previsões de queimas elevadas futuramente, e desenvolver projetos e ações em tempo hábil para minimizá-las ou eliminá-las. Outra utilidade deste planejamento é para valoração de ações da empresa nas Bolsas de Valores, cujo objetivo é de se calcular o volume de gás aproveitado durante toda a vida do campo de produção, o que contribuirá para aumentar a receita.

Poder Calorífico: medida da quantidade de energia que pode ser obtida pela combustão completa do gás e indica a conveniência de uso de um gás puro ou uma mistura como combustível. O poder calorífico é dito superior (PCS) quando considera que toda a água formada na reação é condensada em líquido; e inferior (PCI) quando considera que a água formada permanece no estado de vapor.

a) Inferior



b) Superior



Para uso como combustível, gases de fontes e composições diferentes podem ser comparados com base no seu poder calorífico, que, portanto, é usado como parâmetro na determinação do preço do gás.

Precisão: regra heurística de parada de busca durante a execução do método de *Branch-and-Bound*. Sendo FO^* a Função Objetivo da melhor solução dos nós de espera e FO a Função Objetivo da melhor solução inteira obtida, o critério de parada será calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\left| \frac{FO - FO^*}{FO^*} \right| \leq \epsilon, \text{ sendo o } \epsilon, \text{ a precisão da solução.}$$

Quando isto acontecer, a busca é interrompida e a melhor solução inteira obtida é considerada solução ótima dentro da precisão especificada.

Produção: conjunto de operações coordenadas de extração de petróleo ou gás natural de uma jazida e de preparo para sua movimentação;

Programação Linear: problema que pode ser expresso na forma canônica:

$$\text{minimize } \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

$$\text{subject to: } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \text{ com } \mathbf{x} \in \mathbf{R}^2$$

onde \mathbf{x} é o vetor de variáveis para ser solucionado, \mathbf{A} é uma matriz com coeficientes conhecidos, \mathbf{c} e \mathbf{b} são vetores de coeficientes conhecidos. A expressão “ $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ ” é chamada de Função Objetivo, e as equações “ $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$ ” são chamadas de restrições. A palavra programação é usada aqui no sentido de planejamento, a relação necessária para programação computacional foi casual na escolha do nome.

Simple transformações podem ser aplicadas para algum problema com uma Função Objetivo linear e restrições lineares (igualdades e desigualdades) para obter esta forma padrão.

Programação Linear Inteira: o modelo de programação linear inteira é aquele na qual as variáveis são restritas a terem valores inteiros ou como oposto de números fracionários.

Os problemas de programação linear inteira têm a forma geral:

$$\text{Min } (\mathbf{c}^T \mathbf{x} : \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{x} \in \mathbf{Z}^n)$$

Onde \mathbf{Z}^n é o conjunto de vetores inteiros de dimensão n . Em programação linear inteira mista, alguns componentes de \mathbf{x} são permitidos serem reais.

Os modelos de programação linear inteira são conhecidos por uma variedade de nomes e abreviações, de acordo com a generalidade das restrições em suas variáveis. Problemas de Programação Linear Mista Inteira (MILP ou MIP) requerem que somente algumas variáveis tomem valores inteiros, enquanto que os problemas de programação puramente inteiros (ILP ou IP), requerem que todas as variáveis sejam inteiras.

Queima histórica: volume de queima de gás natural ou ventilado para o meio ambiente, em função de motivos associados à característica do sistema de compressão, na qual terá uma grande probabilidade de realização, mesmo que não

haja falhas ou paradas de compressores. Este volume é determinado em função de análise do histórico de queima da plataforma.

Reservatório ou Depósito: configuração geológica dotada de propriedades específicas, armazenadora de petróleo ou gás, associados ou não.

Restrições: características que permitem que as variáveis e incógnitas possam assumir determinados valores mas excluem outros.

Softwares de otimização: inclui *solvers* ou códigos para encontrar o ótimo (ou no mínimo muito bom) para valores de variáveis de decisão, assim como os sistemas de modelagem que auxiliam na preparação de problemas para *solvers* e para relacionar as soluções que os *solvers* retornam.

Os *solvers* são especializados para muitos tipos diferentes de problemas matemáticos, e os sistemas de modelagem são desenhados para certa categoria de problemas.

Solução: conjunto de valores das variáveis que satisfazem o sistema de equações; se os valores destas variáveis satisfazem a condição de não negatividade, ou seja, se satisfazem as restrições técnicas e lógicas, então a solução diz-se solução viável.

Take or pay: menor volume de gás que deverá ser entregue para venda, definida em contrato entre as partes vendedoras e consumidoras. Caso este volume não seja atendido, haverá uma penalização sobre este não atendimento para a empresa responsável pela oferta do gás.

Teor de gás sulfídrico e dióxido de carbono: a presença de H_2S e CO_2 num gás natural desprovido de umidade não representa riscos de corrosão no sistema. Todavia na presença de umidade, teores elevados de H_2S e CO_2 podem provocar corrosão, em caso de condensação aquosa. O limite máximo do teor de H_2S usualmente aceito para escoamento de gasodutos de alta pressão é de 20 ppm em volume, (para evitar a corrosão sob tensão por H_2S em pressões de até 105 kgf/cm^2 absoluta), e para o CO_2 é de 2% em volume. Para comercialização no país, o teor de

enxofre total (H_2S + mercaptans) é especificado em 80 mg/m^3 ; o de H_2S de 20 mg/m^3 (equivalente a 14 ppm); e, o CO_2 de 2% em volume. Neste limite para o teor de H_2S não ocorrem problemas de toxidez para o gás natural ou para os produtos de sua combustão. Existem vários processos disponíveis para remoção de H_2S e CO_2 do gás natural. No entanto, os processos que utilizam soluções de aminas são os mais empregados. Nesses processos, é utilizada, normalmente, a monoetanolamina - MEA ou a dietanolamina – DEA.

Tratamento ou Processamento de Gás Natural: conjunto de operações destinadas a permitir o seu transporte, distribuição e utilização.

Turbocompressores: equipamentos responsáveis por elevar a pressão do gás para permitir a injeção, transporte através de gasodutos, *gas lift* e consumo de gás em alta pressão.

Utilização do gás natural: é qualquer uso do gás natural nas atividades industrial, comercial, institucional, residencial ou automotiva. Na indústria, é utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de energia elétrica e de força motriz, como matéria-prima nos setores químicos, petroquímicos e de fertilizantes, e como redutor siderúrgico na fabricação do aço. Na área de transportes, substitui o óleo diesel, a gasolina e o álcool em ônibus e automóveis. No futuro, terá uma utilização bem maior no setor elétrico brasileiro, que espera um substancial crescimento da geração termelétrica, parcialmente atendida com o gás natural. Há ainda a expectativa de que, com o avanço da tecnologia de compressão para uso automotivo e com a aplicação da tecnologia de liquefação, transporte e regaseificação, surjam novas oportunidades para o gás natural, que deve ter uma participação cada vez maior na matriz energética brasileira.

Variáveis: parâmetros que afetarão o valor da Função Objetivo.

APÊNDICE B - EQUACIONAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE PLANEJAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE GÁS DA PETROBRAS

A) VARIÁVEIS

As variáveis de carga/vazão utilizadas nos elementos são:

- Carga de gás no elemento;
- Vazão do gasoduto;
- Carga de injeção de gás no elemento armazenamento;
- Carga de produção de gás no elemento armazenamento.

Variáveis de desvio em relação a limites estabelecidos:

- Desvio negativo em relação ao mínimo mensal contratual (*take or pay*).

Variáveis de produção de condensado nos moto e turbo compressores.

Variáveis de carga de compressão por máquina nas baterias de moto e turbo compressores.

Variáveis inteiras (0-1) que definem a operação de máquinas nas baterias de moto e turbo compressores.

Variáveis de pressão:

- Pressão de entrada de elemento;
- Pressão de saída do elemento;
- Pressão de sucção de turbo e moto compressores;
- Pressão de descarga de turbo e moto compressores;
- Pressão à montante do gasoduto;
- Pressão à jusante do gasoduto.

B) ELEMENTOS DO SISTEMA DE GÁS.

• VENDAS

Entrada de fluxo: totaliza na variável, os fluxos de gás que chegam ao ponto de venda.

Limitação da carga de transferência: determina o valor máximo e mínimo admitido para a entrega de gás no ponto de venda, em função dos valores máximo e mínimo contratuais e dos desvios admitidos.

Pressão de entrega.

Função Objetivo: Receita da Venda do gás - Multa Take or pay.

• CONSUMO FIXO

Entrada de fluxo: totaliza na variável, os fluxos de gás que chegam ao ponto de consumo, a partir dos elementos.

Limitação de carga: fixa o consumo em um valor pré-definido.

Pressão do consumo: limite.

Função Objetivo: - penalização de desvio.

• QUEIMA

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao ponto de queima.

Queima mínima por plataforma: envolve piloto do *flare* e queima devido à parada de compressores.

Pressão de chegada.

Custo da queima por plataforma: valor a ser calculado em função do poder calorífico do gás produzido na plataforma.

Função Objetivo: - *custo da queima por plataforma · carga*

• BARRILETES

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao barrilete (vaso ou entroncamento).

Saída de fluxo: distribui, a partir da variável, os fluxos de gás que saem do barrilete.

Equalização de pressões: pressão de entrada do barrilete = pressão de saída do barrilete.

Limitação de pressões.

- **MANIFOLDS E CONEXÕES**

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao *manifold* ou conexão, a partir dos gasodutos.

Saída de fluxo: distribui, a partir da variável, os fluxos de gás que saem do *manifold* ou conexão para o gasoduto.

Equalização de pressões: Pressão de entrada do *manifold* = pressão de saída do *manifold*.

Limitação de pressões

- **GASODUTOS**

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao gasoduto a partir dos elementos;

Saída de fluxo: distribui a partir da variável, os fluxos de gás que saem dos gasodutos para os elementos.

Limitação de carga: limita a vazão do gasoduto no período.

Carga dos gasodutos alternativos: Escolhe o modo de operação do gasoduto para o período em pauta. Esta operação vale para gasodutos de duplo sentido, bem como para gasodutos que podem processar gás doce ou gás ácido. Também utiliza variável inteira para definir o sentido do fluxo.

Equação de perda de carga: Determina a viabilidade de fluxo no gasoduto através de comparação entre a pressão à montante e a pressão à jusante.

Função Objetivo: -Custo de transporte.

- **MOTO COMPRESSORES**

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao moto compressor a partir dos elementos.

Saída de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que saem do moto compressor para os elementos.

Limitação da carga por máquina da bateria: limita a carga do motocompressor da bateria entre os valores máximo e mínimo de projeto.

Consumo de gás da bateria: Calculado a partir das variáveis inteiras binárias, que indicam se cada motocompressor está ou não ligado no período multiplicado pelo seu consumo unitário.

Carga de gás total da bateria.

Produção de condensado: somente para motocompressores de alta pressão.

Limitação da pressão de sucção (mínima).

Limitação da pressão de descarga (máxima).

• **TURBO COMPRESSORES**

Entrada de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que chegam ao turbo compressor a partir dos elementos.

Saída de fluxo: totaliza na variável os fluxos de gás que saem do turbo compressor para os elementos.

Limitação da carga por máquina da bateria: limita a carga do turbo compressor da bateria entre os valores máximo e mínimo de projeto.

Consumo de gás da bateria: Calculado a partir das variáveis inteiras binárias, que indicam se cada turbocompressor está ou não ligado no período multiplicado pelo seu consumo unitário.

Carga de gás total da bateria (limitação do sistema).

Produção de condensado: somente para turbo compressores de alta pressão.

Limitação da pressão de sucção (mínima).

Limitação da pressão de descarga (máxima).

• **GAS LIFT**

Entrada de fluxo: totaliza os fluxos de gás que chegam ao ponto de *gas lift*, a partir dos elementos.

Carga: Fixa a necessidade de *gas lift* no período.

Limitação de pressão no *gas lift*.

Função Objetivo: *receita unitária gas lift · carga*.

- **GÁS ASSOCIADO**

Saída de fluxo: distribui a produção de gás associado pelos fluxos de gás que vão para os separadores de produção e para o separador atmosférico.

Limitação de pressão do gás associado.

Carga: Fixa a produção do período.

Função Objetivo: $-\text{custo de produção} \cdot \text{carga}$.

- **GÁS NÃO ASSOCIADO**

Cada poço de gás não associado poderá ter duas condições de produção: uma em alta pressão e outra em baixa pressão. Cada poço poderá ter somente uma condição para cada período.

Saída de fluxo em alta pressão e baixa pressão: distribui a produção de gás não associado em alta pressão e baixa pressão, a partir da variável, pelos fluxos de gás que saem do ponto de produção, para os elementos.

Carga: Limita a produção do gás não associado superiormente. O potencial de produção de cada período deverá ser calculado, entre as otimizações de um período para outro, a partir das curvas de produção (*steps*) alimentados no cenário para cada poço.

Limitação de pressão do gás não associado.

Função Objetivo: $\text{Preço de venda} \cdot \text{carga} - \text{custo de produção}$.

- **INJEÇÃO EM RESERVATÓRIOS**

Entrada de fluxo: totaliza na variável, os fluxos de gás que chegam ao ponto de injeção a partir dos elementos.

Carga: fixa os valores máximo e mínimo de injeção de gás necessária para os períodos em operação.

Limitação de pressão na injeção.

Função Objetivo: $\sum \text{Receita unitária} \cdot \text{carga de injeção no período}$.

- **INJEÇÃO/PRODUÇÃO PARA ARMAZENAMENTO**

INJEÇÃO:

ENTRADA DE FLUXO: Totaliza, na variável, os fluxos de gás que chegam ao ponto de injeção para armazenamento a partir dos elementos.

Carga: limita superiormente o valor a ser injetado em cada período.

Limitação de pressão para injeção de armazenamento.

Função Objetivo: $-\sum \text{custo unitário de injeção} \cdot \text{carga}$.

Limitação do volume de gás possível de ser estocado no reservatório.

PRODUÇÃO:

Saída de fluxo: distribui a produção de gás do estoque, a partir da variável, pelos fluxos de gás que saem do ponto de produção do reservatório de armazenamento, para os elementos.

Carga de armazenamento: limita o volume de gás ao nível de gás estocado mais a quantidade injetada no período.

Estoque inicial: Define o volume de gás atualmente presente no reservatório para o início de um certo período.

Estoque final: Define o volume de gás presente no reservatório para o final de cada período. Este volume será o estoque inicial do período adjacente.

Carga de produção: limita a vazão máxima de produção.

O nível atual de gás armazenado em cada reservatório no fim de um certo mês deverá ser calculado, entre duas corridas com o modelo, levando-se em conta o gás armazenado no final do período anterior mais o que foi injetado e subtraindo o que foi produzido pelo modelo no período em pauta.

Dias do período injetando ou produzindo: Limita superiormente a soma de dias produzindo com o número de dias injetando ao número de dias disponíveis no período.

Limitação de pressão.

Função Objetivo: $\sum (\text{Receita da venda do gás} - \text{custos de injeção e produção})$.

• UNIDADES DE TRATAMENTO DE GÁS ÁCIDO

1) MEA – MONOETANOLAMINA: Sistema que remove a acidez do gás para evitar corrosão em equipamentos e gasodutos.

Entrada de fluxo: totaliza na variável, os fluxos de gás que chegam à unidade, a partir dos elementos.

Saída de fluxo: distribui o resultado do tratamento da unidade, a partir da variável, pelos fluxos de gás que saem da unidade para os elementos.

Eficiência operacional do sistema.

Carga: Limita a carga máxima do período.

Equalização de pressões.

Limitação de pressões.

Função Objetivo: $\text{custo operacional unitário} \cdot \text{carga}$.

2) SEQÜESTRANTE DE H₂S: Produto químico injetado na linha de *gas lift*, com objetivo de neutralizar a acidez do gás.

Entrada de fluxo: Totaliza na variável, os fluxos de gás a serem tratados pelo seqüestrante.

Saída de fluxo: distribui o gás tratado pelos fluxos de saída.

Carga: limita o total de gás a ser tratado pela soma da produção de gás ácido no período juntamente com o retorno de *gas lift*.

Equalização de pressões.

Função Objetivo: $-\sum \text{custo operacional unitário} \cdot \text{carga}$.

- **BOMBA MULTIFÁSICA**

Permite o bombeamento do gás em baixa pressão de uma plataforma para ser comprimido em outra plataforma juntamente com o óleo.

Entrada de fluxo: Totaliza na variável, os fluxos de gás que chegam à bomba multifásica, a partir dos elementos.

Saída de fluxo: Distribui a carga de gás da bomba multifásica para os elementos.

Carga: limita a carga no período da bomba multifásica ao produto da razão gás/líquido pela carga máxima diária e pelo número de dias de operação.

Equalização de pressões.

Limitação de pressão.

Função Objetivo: $-\sum \text{custo operacional unitário} \cdot \text{carga}$.

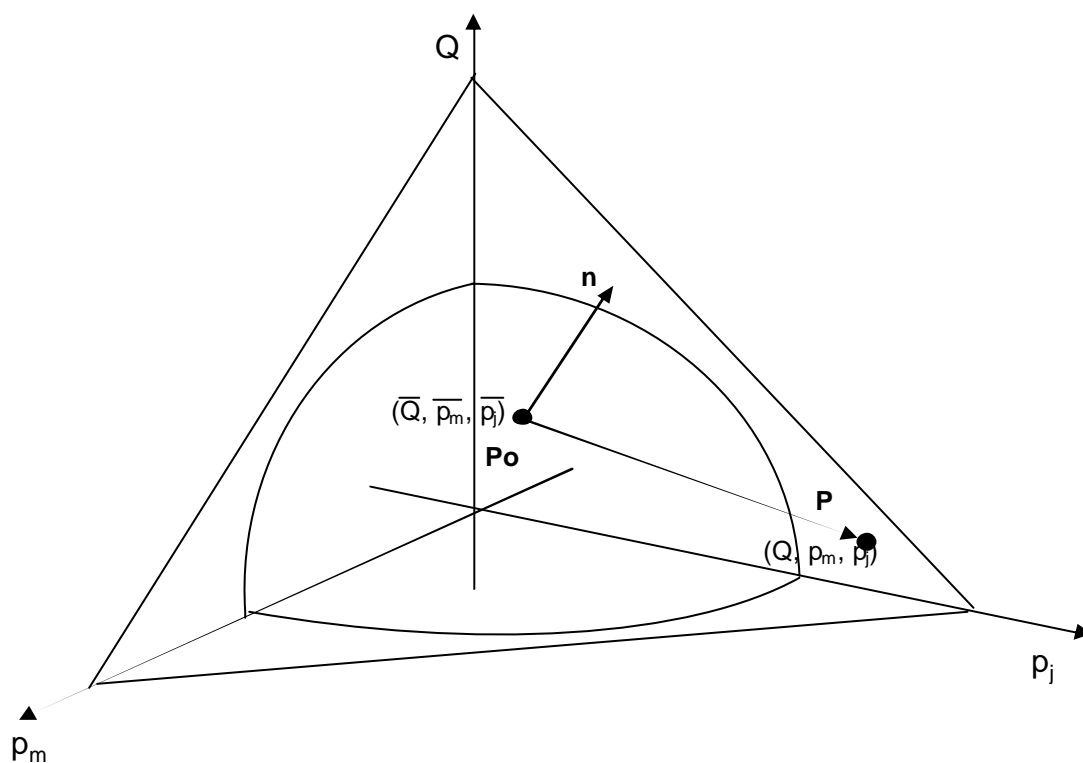
APÊNDICE C - LINEARIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PERDA DE CARGA

Para se analisar as restrições em função da perda de carga através de gasodutos, utilizando técnicas de programação linear, foi necessário efetuar uma aproximação linear da equação de WEYMOUTH.

A equação básica utilizada para o cálculo de perda de carga em gasodutos é a de WEYMOUTH, transcrita abaixo:

$$Q = k_w \cdot \sqrt{(p_m + 1)^2 - (p_j + 1)^2}$$

Linearização da Equação de WEYMOUTH



Equação:

$$Q = k_w \cdot \sqrt{(p_m + 1)^2 - (p_j + 1)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q - k_w \cdot \sqrt{(p_m + 1)^2 - (p_j + 1)^2} = 0$$

Para se linearizar esta equação, vamos aproximá-la pela equação de seu plano tangente, em um ponto típico de operação: $(\bar{Q}, \bar{p}_m, \bar{p}_j)$.

Esta equação pode ser representada vetorialmente por: $\mathbf{P}_o \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} = 0$, onde \mathbf{n} é vetor normal ao plano no ponto de tangência, ou seja o gradiente da função neste ponto.

Assim:

$$(Q - \bar{Q}, p_m - \bar{p}_m, p_j - \bar{p}_j) \cdot \left(1, -\frac{\partial Q}{\partial p_m}, -\frac{\partial Q}{\partial p_j} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q - \bar{Q} - \frac{\partial Q}{\partial p_m} (p_m - \bar{p}_m) - \frac{\partial Q}{\partial p_j} (p_j - \bar{p}_j) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = \bar{Q} + \frac{\partial Q}{\partial p_m} (p_m - \bar{p}_m) - \frac{\partial Q}{\partial p_j} (p_j - \bar{p}_j)$$

Derivadas Parciais:

$$\frac{\partial Q}{\partial p_m} = \frac{k_w \cdot (p_m + 1)}{\sqrt{(p_m + 1)^2 - (p_j + 1)^2}} \quad \text{e} \quad \frac{\partial Q}{\partial p_j} = -\frac{k_w \cdot (p_j + 1)}{\sqrt{(p_m + 1)^2 - (p_j + 1)^2}}$$

com isso a equação do plano fica:

$$Q = k_w \sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2} + \frac{k_w \cdot (\bar{p}_m + 1)}{\sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2}} (p_m - \bar{p}_m) - \frac{k_w \cdot (\bar{p}_j + 1)}{\sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2}} (p_j - \bar{p}_j)$$

$$Q \cdot \sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2} = k_w \left((\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2 \right) + k_w (\bar{p}_m + 1)(p_m + 1) - k_w (\bar{p}_m + 1)^2 -$$

$$- k_w (\bar{p}_j + 1)(p_j + 1) + k_w (\bar{p}_j + 1)^2$$

$$Q = \frac{k_w \cdot (\bar{p}_m + 1)}{\sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2}} \cdot p_m - \frac{k_w \cdot (\bar{p}_j + 1)}{\sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2}} \cdot p_j + \frac{k_w \cdot (\bar{p}_m - \bar{p}_j)}{\sqrt{(\bar{p}_m + 1)^2 - (\bar{p}_j + 1)^2}}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{k_{mont}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{k_{jus}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{k_{ind}}$

onde:

\bar{p}_m : é a pressão a montante (de saída) típica do gasoduto (em kg/cm²)

\bar{p}_j : é a pressão a jusante (de chegada) típica do gasoduto (em kg/cm²)

k_w : é a constante para a Fórmula de Weymouth para o gasoduto, dada por:

$$k_w = 5,927 \cdot E \cdot \sqrt{\frac{1}{d_g \cdot L \cdot T \cdot Z}} \cdot D^{8/3}$$

E: eficiência do gasoduto

d_g : densidade do gás

L: comprimento do gasoduto (em km)

T: temperatura de fluxo (em °K = °C + 273)

Z: fator de compressibilidade

D: diâmetro interno (em polegadas)

APÊNDICE D: PSEUDO-CÓDIGO DO ALGORITMO GENÉTICO

PSEUDO-CÓDIGO:

1) **DADOS INICIAIS:** *dimensão=?; n. Plataformas=?; Número de Gerações=?.*

2) **LEITURA DE DADOS:**

a. $q_{ga}[i], q_{gl}[i], ntc[i], Kca[i], Kcb[i], Kcc[i], Kcd[i], Kce[i], Kcf[i], cstg[i], q_{gst}[i], caprecvap[i], Cca[i], Ccb[i], Ccc[i], Ccd[i], Cce[i], Ccf[i].$

b. $indisp [i], fpp[i].$

c. $Preço[i]$

d. $Config TC xtdisp[i][j].$

3) **CÁLCULO QUEIMA RECUPERADOR VAPOR:** *queimarecvap*

```
for (int i=1; i<=nos; i++){
    if ( $q_{gst}[i] \leq caprecvap[i]$ )  $queist[i]=0$ ;
    else  $queist[i]=q_{gst}[i]-caprecvap[i]$ ;
}
```

4) **CÁLCULO DA QUEIMA DISPONIBILIDADE TC:**

a. Calcula a capacidade operacional do TC.

```
for (k=1; k<=nos; k++){
     $Kc[k][1]=Kca[k]$ ;
     $Kc[k][2]=Kcb[k]$ ;
     $Kc[k][3]=Kcc[k]$ ;
     $Kc[k][4]=Kcd[k]$ ;
     $Kc[k][5]=Kce[k]$ ;
     $Kc[k][6]=Kcf[k]$ ;
     $Dispcomp2[k]=q_{ga}[k]+q_{gl}[k]$ ;
     $Capaccomp2[k]=0$ ;
     $queima2[k]=0$ ;
    for (i=1; i<=64; i++){
         $dispmed[i]=1$ ;
         $Capaccomp2[i]=0$ ;
        for (j=1; j<=6; j++){
```

```

        if (xtdisp[i][j]==1) prob[j]=indisp[j];
        else prob[j]= 1-indisp[j];
        dispmed[i] *=prob[j];
        Capaccomp2[i] +=xtdisp[i][j]*prob[j]*Kc[k][j];
    }
    if (Capaccomp2[i]>= Dispcomp2[i]) Capaccomp2[i]= Dispcomp2[k];
    Capaccomptotal[k]+=dispmed[i]*Capaccomp2[i];
}
if (Dispcomp2[k]>=Capaccomptotal[k]) queima2[k]= Dispcomp2[k]-
Capaccomptotal[k];
else queima2[k]=0;
}
};

```

5) INICIALIZAÇÃO: inicializa os parâmetros do Algoritmo Genético.

Define as probabilidades de *crossover* e *mutação*.

Gera a população inicial de cromossomos.

6) Avaliação da população.

a. Cálculo da função de aptidão:

CalculoCapaccomp(chrom);

Calculoconsumo(chrom);

Cálculo do vetor **s**;

analisedemanda();

P= mnr.mnewt(F,f);//Cálculo de fluxos e pressões da malha utilizando método de Newton-Raphson.

oldpop[z].fitness = objfunc(oldpop[z].chrom);// Cálculo da função lucro da movimentação de gás.

Calcula os parâmetros estatísticos (*max, avg, min, sumfitness, newpop*)
runstatistics();

7) Enquanto os critérios de parada não estiverem satisfeitos:

faça:

t = t+1;

8) Gerar nova população $P(t)$ a partir de $P(t-1)$:

Cria uma nova geração aplicando seleção, crossover e mutação:

```

void ClassSGA::generation(){
//cria uma nova geração aplicando select, crossover e mutation

int j=0;
int n=0;
int m=popsize-10;
int mate1,mate2; //índice dos cromossomos pais escolhidos
int jcross; //local de crossover;

do{
    mate1 = select(sumfitness, oldpop, n);//escolha dos cromossomos pais na
população
        n+=1;
        mate2 = select(sumfitness, oldpop, m);
        m-=1;
//faz crossover
    crossover(oldpop[mate1].chrom,    oldpop[mate2].chrom,    newpop[j].chrom,
newpop[j+1].chrom, ncross, nmutation, jcross, pcross, pmutation);
//monta a estrutura dos elementos
    newpop[j].x = decode(newpop[j].chrom,lchrom);
    newpop[j].fitness = objfunc(newpop[j].chrom);
    newpop[j].parent1 = mate1;
    newpop[j].parent2 = mate2;
    newpop[j].xsite = jcross;

    newpop[j+1].x = decode(newpop[j+1].chrom,lchrom);
    newpop[j+1].fitness = objfunc(newpop[j+1].chrom);
    newpop[j+1].parent1 = mate1;
    newpop[j+1].parent2 = mate2;
    newpop[j+1].xsite = jcross;
}

```

```

    j += 2;
  }while (j < popsize);
};

```

10) Revalie a população.

b. Cálculo da função de aptidão:

```
CalculoCapaccomp(chrom);
```

```
Calculoconsumo(chrom);
```

Cálculo do vetor \mathbf{s} ;

```
analisedemanda();
```

$P = \text{mnr.mnewt}(F, f)$; //Cálculo de fluxos e pressões da malha utilizando método de Newton-Raphson.

$\text{oldpop}[z].\text{fitness} = \text{objfunc}(\text{oldpop}[z].\text{chrom})$; // Cálculo da função lucro da movimentação de gás.

Calcula os parâmetros estatísticos (max , avg , min , sumfitness , newpop)

```
runstatistics();
```

11) Defina a população sobrevivente;

12) Fim enquanto;

13) Fim AG.

Cálculo de Fluxos e pressões na malha de gasodutos:

Método de Newton-Raphson.

```
ClassMNR::ClassMNR(int DM,int NS): nosnr(NS), dimnr(DM) //definição do
construtor da classe MNR...
```

```
A= (float**)matrix(NS,DM);
```

```
fjac= (float**)matrix(DM,DM);
```

```
G= new MatrizG[DM+1];
```

```
Kw= new float[DM+1];
```

```
P= new float[DM+1];
```



```

p= new float[DM+1];
indx= new float[DM+1];
fvec= new float[DM+1];
B= (float**)matrix(DM-NS+1,DM);

```

```

void ClassMNR::usrfun(float *&f,float *&splat)

```

```

{
    //Preenche as matrizes Fvec e Fjac....

```

```

}

```

Soluciona o conjunto de equações encontrando os valores de fluxo em cada duto utilizando decomposição LU:

```

    ludcmp(&d);
    lubksb();

```

Com os valores de fluxo, a partir da pressão de entrega, calcula-se os valores de pressão em cada nó da malha.

STATISTICS:

Para cada plataforma calcula-se: *max*, *avg*, *min*, *sumfitness*, *newpop*

```

void ClassSGA::statistics(long& max, long& avg, long& min, long& sumfitness,
population& pop){

```

```

//calcula dados estatísticos sobre a função de aptidão

```

```

//inicialização dos valores

```

```

sumfitness = pop[0].fitness;

```

```

min = pop[0].fitness;

```

```

max = pop[0].fitness;

```

```

//cálculo do max, min e sum

```

```

for(int j = 1;j < popsize;j++){

```

```

    sumfitness += pop[j].fitness;

```

```
        if (pop[j].fitness > max)    max = pop[j].fitness;
        if (pop[j].fitness < min)    min = pop[j].fitness;
    }
    //cálculo da média
    avg = sumfitness / popsize;
};
```

APÊNDICE E: PSEUDO-CÓDIGO DO MÉTODO GRASP

Abaixo está descrito o pseudocódigo do procedimento GRASP básico para maximização (adaptado de Resende, 1998), ver também a seção 3.2.2.

Nestes problemas, é dado um conjunto finito de soluções X e uma função de valores reais $f : X \rightarrow \Re$, e busca-se uma solução $x^* \in X$ com $f(x^*) \geq f(x), \forall x \in X$.

Procedimento *GRASP*($f(\cdot), g(\cdot), maxitr, x^*$)

```

1    $x^* : f(x^*) < -N, N \gg 1;$ 
2   for  $k = 1, 2, \dots, maxitr$  do
3       construct ( $g(\cdot), a, x$ );
4       local ( $f(\cdot), x$ );
5       if ( $f(x) > f(x^*)$ ) do
6            $x^* = x;$ 
7       end if;
8   end for;
9   end GRASP;

```

O pseudocódigo representado abaixo descreve a fase de construção GRASP (Resende, 1998).

Procedimento *Construct*($g(\cdot), a, x$)

```

1    $x = f;$ 
2   Inicialize conjunto de candidatos  $C$ ;
3   while  $C \neq f$  do
4        $s_{min} = \min\{g(t) / t \in C\};$ 
5        $s_{max} = \max\{g(t) / t \in C\};$ 
6        $LCR = \{s \in C / g(x) \geq s_{max} - a(s_{max} - s_{min})\};$ 
7       Select  $s$ , aleatoriamente da LCR;
8        $x = x \cup \{s\};$ 
9   end while;
10  end construct;

```

Abaixo, segue o algoritmo do procedimento de busca local adaptado de Resende (1998).

Procedimento *local*($f(\cdot), N(\cdot), x$)

```

1    $H = \{y \in N(x) | f(y) > f(x)\}$ 
2   while  $H \neq f$  do
3       Select  $x \in H$ 
4        $H = \{y \in N(x) | f(y) > f(x)\}$ 
5   end while;
end local;

```

PSEUDO-CÓDIGO DO MÉTODO GRASP APLICADO AO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE GÁS:

1) **DADOS INICIAIS:** *dimensão= ?; n.Plataformas= ?; dimensão BP=?; alpha=?.*

2) **LEITURA DE DADOS:**

- a. $q_{ga}[i], q_{gl}[i], ntc[i], Kca[i], Kcb[i], Kcc[i], Kcd[i], Kce[i], Kcf[i], \omega_{stg}[i], q_{gst}[i], caprecvap}[i].$
- b. $Cons_{tc}[i][j], indispon[i][j], fmpp[i][j].$
- c. $Preço[i]$
- d. $Config\ TC\ xtc2[i][j], xtc3[i][j], xtc4[i][j], xtc6[i][j].$

3) **CÁLCULO QUEIMA RECUPERADOR VAPOR:**

queimarecvap

```
for (int i=1; i<=nos; i++){
  if ( $q_{gst}[i] \leq caprecvap[i]$ )  $queist[i]=0$ ;
  else  $queist[i]= q_{gst}[i]-caprecvap[i]$ ;
}
```

4) **QUEIMA DISPONIBILIDADE TC:**

a. *Calcula a capacidade operacional do TC.*

```
for (k=1; k<=nos; k++){
   $Kc[k][1]=Kca[k]$ ;
   $Kc[k][2]=Kcb[k]$ ;
   $Kc[k][3]=Kcc[k]$ ;
   $Kc[k][4]=Kcd[k]$ ;
   $Kc[k][5]=Kce[k]$ ;
   $Kc[k][6]=Kcf[k]$ ;
   $Dispcomp2[k]= q_{ga}[k]+ q_{gl}[k]$ ;
   $Capaccomptotal[k]= 0$ ;
   $queima2[k]=0$ ;
  for (i=1; i<=64; i++){
     $dispmed[i]=1$ ;
```

```

    Capacomp2[i]=0;
    for (j=1;j<=6;j++){
        if (xtdisp[i][j]==1) prob[j]=indisp[j];
        else prob[j]= 1 -indisp[j];
        dispmed[i] *=prob[j];
        Capacomp2[i] +=xtdisp[i][j]*prob[j]*Kc[k][j];
    }
    if (Capacomp2[i]>= Dispcomp2[i]) Capacomp2[i]= Dispcomp2[k];
    Capacomp2total[k]+=dispmed[i]*Capacomp2[i];

}
if (Dispcomp2[k]>=Capacomp2total[k]) queima2[k]= Dispcomp2[k]-
Capacomp2total[k];
else queima2[k]=0;
};

```

5) CONSTRUCT: Fase de construção da solução.

a. Calcular Disponível para compressão:

```

for (int i=1;i<=nos;i++){
    Dispcomp[i]= qga[i]+ qgl[i]-queist[i]-queima2[i];
    cont[i]= pow(2,ntc[i]);
    for (int j=1;j<=cont[i];j++){
        if (ntc[i]==2){
            Capacomp[i][j]=xtc2[j][1]*(1-fmpp[i][1])*Kca[i]+xtc2[j][2]*(1-
            fmpp[i][2])*Kcb[i];
            ConsumoTC[i][j]=xtc2[j][1]*(1-
            fmpp[i][1])*constc[i][1]+xtc2[j][2]*(1-fmpp[i][2])*constc[i][2];
        }
    }
}

```

6) MOVGASPLAT: Movimentação de gás na plataforma.

Para cada plataforma calcula-se:

Cálculo da função Lucro:

Dispcomp[i];

Capacomp[i][j];

Comp[i][j];

queicomp[i][j];

q_{glc}[i][j];

fcq[i][j];

f[i][j];

Cálculo do vetor **s**;

analisedemanda();

P= mnr.mnewt(F,f);//Cálculo de fluxos e pressões da malha utilizando método de Newton-Raphson.

*flucro[i][k]= (f[i][k]+q_{inj}[i]/2)*preco[i]+ q_{glc}[i][k]*1000;// Cálculo da função lucro da movimentação de gás.*

7) STATISTICS:

Para cada plataforma calcula-se: *flucromin[i]*, *flucromax[i]*, *configmin[i]* e *configmax[i]*

8) LCR2:

lcr[i]=flucromax[i]- alpha(flucromax[i]-flucromin[i]);*

Para $w=1$ até *niter* (número de iterações):

Construção: escolher randomicamente para cada plataforma configuração candidato[i] tal que: *flucro[i][candidato[i]]>lcr[i]*

G[i]= f[i][candidato[i]].

Testebp;

GRASP;

BUSCA LOCAL:

Para cada plataforma com *flucro[j][candidato[j]]<flucro[j][configmax[j]]* ajustar *candidato[j]=configmax[j]*; *g[j]=f[j][configmax[j]]*; efetuar teste**bp** e GRASP.

APÊNDICE F: PUBLICAÇÕES, PRÊMIOS E PROJETOS DESENVOLVIDOS

F.1. Congressos e Simpósios

O desenvolvimento desta Tese teve várias contribuições, dentre eles podemos citar as publicações em Congressos e Simpósios:

- 1) “Teste do Módulo Econômico do Sistema Otimizador da Movimentação de Gás”. Tese de Mestrado, Laboratório de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé-RJ, (2002).

- 2) “A Nova Versão do Sistema de Previsão da movimentação de Gás da Bacia de Campos”. I SPCADE SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO, CONTROLE E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EMPRESARIAL DO E&P – 2003, Salvador-BA, (2003).

- 3). “Desenvolvimento e Testes de Ferramentas para o Processo de Planejamento de Gás da Bacia de Campos. II SPCADE SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO, CONTROLE E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EMPRESARIAL DO E&P – 2005, Conservatória-RJ, 2005.

- 4) “Um Algoritmo Genético Híbrido Para o Planejamento de Movimentação de Gás da Bacia de Campos”. XXXVII SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. GRAMADO, RS. (2005).

- 5) “A New Integrated Planning Model for Gas Compression and Transmission Through a Complex Pipeline Network”. RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION. Rio de Janeiro (2005 b).

6) “Conclusão dos Testes de Ferramentas para o Sistema de Planejamento da Movimentação de Gás da Bacia de Campos”. III SEMINARIO DE PLANEJAMENTO, GESTÃO, CONTROLE E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EMPRESARIAL DO E&P. Mangaratiba - RJ (2006).

7) “A Planning Model for Offshore Natural Gas Transmission”. ISPM 2006. 19th International Symposium on Mathematical Programming. Rio de Janeiro (2006).

F.2. Publicação em Revista:

- “A New integrated planning model for gas compression and transmission”. PETROMIN PIPELINER, MAY 2006, Technical Paper Page 38-43. www.petromin-pipeliner.com.
- “A planning model for offshore natural gas transmission” Revista Pesquisa Operacional submetido em junho de 2006.

F.3. Prêmios e Reconhecimentos:

- Reconhecimento com **Menção Honrosa** pelo trabalho apresentado no **RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION. Rio de Janeiro (2005)**: “A New Integrated Planning Model for Gas Compression and Transmission Through a Complex Pipeline Network”.

F.4. Projetos Desenvolvidos:

- CNPq: Desenvolvimento e aplicação de um modelo para planejamento de movimentação de gás natural na Bacia de Campos;
- FAPERJ: Aprimoramento e aplicação de um modelo para planejamento de movimentação de gás natural na Bacia de Campos.