COMPARAÇÃO ENTRE AS METAHEURÍSTICAS *GRASP* E *AG* NO PLANEJAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE GÁS EM UMA REDE COMPLEXA

Edson K. Iamashita
PETROBRAS, Av. Elias Agostinho 665, sala G-206**,** 27913-350, Imbetiba, Macaé-RJ
edsonkenji@petrobras.com.br

Frederico Galaxe
Instituto Federal Fluminense – IFF
Av. Souza Mota, 350, Pq. Fundão, 28060–010, Campos dos Goytacazes - RJ
fpaes@iff.edu.br

José Arica
Universidade Estadual do Norte Fluminense/CCT – Laboratório de Engenharia de Produção, Av. Alberto Lamego, 2000, 28013-600, Campos dos Goytacazes-RJ
arica@uenf.br

RESUMO

O desenvolvimento desta pesquisa tem por objetivo solucionar o problema do planejamento da movimentação de gás natural em estado estacionário. Para uma dada rede contendo um grande número de plataformas com sistema de compressão, e uma malha complexa de gasodutos, 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. O problema é formulado como sendo não linear, misto–inteiro, além de ser não convexo e não diferenciável. Devido a sua complexidade, alguns algoritmos heurísticos são propostos para resolvê-lo. Neste artigo, é comparado o desempenho entre as metaheurísticas GRASP*(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)* e AG (Algoritmo Genético).

Palavras-chave: Gás natural; gasodutos; metaheurísticas.

ABSTRACT

The development of this research aims to solve the problem of planning the movement of natural gas in steady-state. For a given network containing a large number of platforms with compression system, and a complex mesh of pipelines, the problem in decision making is to determine the best configuration to operate the compressors and the network, with the aim of obtaining the greatest possible profits drive integrated gas. The problem is formulated as non-linear, mixed-integer, and is not differentiable and not convex. Due to its complexity, some heuristic algorithms are proposed to solve it. In this article, the performance is compared between the metaheuristics GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) and GA (Genetic Algorithm).

Keywords: Natural gas; pipeline; metaheuristics.

1. Introdução

O planejamento da movimentação e utilização de gás natural associado e gás natural não associado ao óleo produzido por plataformas, que têm um sistema de escoamento integrado por gasodutos comuns é complexo, envolvendo um grande número de variáveis operacionais e restrições, tais como: paradas de compressores, limitações de gasodutos e equipamentos, necessidade de gás *lift*, demanda de gás, preços de venda de óleo e gás, custos, etc. Tais variáveis e restrições podem gerar várias opções para os seguintes destinos do gás de cada plataforma: gás disponibilizado para venda, gás injetado ou produzido de reservatórios de armazenamento, gás injetado para recuperação secundária, gás *lift*, gás consumido na plataforma, gás transferido entre plataformas e gás queimado.

As restrições no curto prazo são geralmente ocasionadas por: aumento de produção não previsto, aumento da necessidade de gás *lift*, falhas ou acidentes em compressores e gasodutos e demanda restringida de gás. Já para o médio e longo prazos, a partir da previsão de produção de gás, da necessidade de gás *lift*, além dos estudos 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 essas limitações, com obras e projetos, evitando com isto a queima de gás; isto é, formula-se como objetivo do planejamento a minimização da queima, de forma que o volume disponibilizado para venda seja maximizado.

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

Quando o gás flui através de uma rede de gasodutos, ocorre uma perda de energia e pressão devido à fricção que existe entre o gás e as paredes internas do gasoduto e a transferência de calor que existe entre o gás e o meio ambiente. Para que o gás possa ser transportado das plataformas até os centros de distribuição e consumo é necessário que seja comprimido a altas pressões. O problema em questão consiste em determinar a melhor configuração de operação de compressores e gasodutos (fluxos transportados e pressões geradas) com o objetivo de comprimir e transportar o gás produzido com o maior lucro possível.

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 (Wolf, 2003) e NP-completo (Bemporad, Mignone e Morari, 1999; Rios-Mercado et al., 2004), i.e., neste caso, o tempo utilizado para solucionar o problema cresce exponencialmente com o tamanho do problema. Para contornar o problema da complexidade, alguns algoritmos heurísticos são propostos para resolvê-lo. Neste artigo, é comparado o desempenho entre as metaheurísticas GRASP*(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)* e AG (Algoritmo Genético).

2. A Definição do Problema e a Descrição do Modelo de Estado Estacionário

Em um sistema de produção de óleo e gás natural *offshore*, antes de disponibilizar o gás na rede de gasodutos para ser transportado das plataformas aos centros de demanda é necessário separar o gás do óleo e consumi-lo como combustível para diversos fins de processamento. Assume-se que o excesso de gás deve ser injetado em reservatórios de armazenamento ou queimado e que nenhum custo associado à transmissão de gás existe.

Na plataforma, o gás associado (gás extraído da jazida junto ao óleo) com o gás *lift* (volume de gás a alta pressão injetado na coluna de produção de petróleo para diminuir o gradiente de pressão na secção vertical do poço e estimular a produção) é separado do óleo e da água através dos separadores de produção. O óleo com gás em solução, quando sai dos separadores de produção, é direcionado para o separador atmosférico (*surge tank*). Ali, o gás remanescente no óleo é separado em pressão próxima da atmosférica.

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. Os compressores são os equipamentos responsáveis pelo aumento de pressão para que o gás possa ser utilizado no consumo em alta pressão, injeção para gás *lift*, injeção de recuperação secundária, 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. Por outro lado, pode existir interligação em baixa e média pressão entre duas ou mais plataformas, de forma que o gás excedente em alguma plataforma possa ser comprimido em outra plataforma com capacidade de compressão disponível.

São várias as causas que podem levar à queima de gás: instabilidade do sistema de produção (principalmente quando é causada por golfadas severas de poços), problemas de instrumentação e automação (quedas de energia elétrica, alarmes indevidos, etc.), restrições na capacidade dos compressores, problemas e limitação de gasodutos e demanda de gás restringida.

O gás natural excedente nas plataformas (i.e., a sobra depois de armazenagem, consumo, injeção e queima) é escoado através de uma rede de gasodutos, até o ponto final de distribuição e venda, onde alguns gasodutos podem ter sentidos duplos. Assim, para cada plataforma *i* pode ser definida a seguinte relação:

$$s_i = comp_i - glc_i - inj_i - cstg_i - \sum_{j=1}^{cAi}(KccA_j * xcA_j), \forall i, nófonte \tag{1}$$

onde:

glc_i: volume de gás *lift* calculado injetado na coluna de produção de óleo;

inj_i: volume de gás injetado em poços de armazenamento ou recuperação secundária;

$cstg_i$: consumo de gás dos geradores de energia elétrica;

$comp_i$: volume de gás comprimido;

cA_i: número de compressores na plataforma;

KccA,j: constantes associadas ao consumo de compressores na plataforma;

$xcA_{,j}$: variáveis de decisão 0-1 indicando funcionamento (ou não) do compressor respectivo.

Naturalmente, algumas relações adicionais entre as variáveis acima e outras mais devem ser satisfeitas para descrever completamente o equilíbrio das demandas de gás da plataforma. As seguintes relações estabelecem as restrições de balanço volumétrico, sob condições padrão, para cada plataforma *i*:

$$0 \le inj_i \le inj\max_i, \forall i \tag{2}$$

onde *inj* define a variável volume injetado para armazenamento, limitado pela capacidade (*inj max*, constante);

$$0 \le dispcomp = KgA_i + Kgl_i + receb_{ibp} - quei_i - transf_{ibp}, \;\; \forall i \tag{3}$$

onde a variável *discomp* define o gás disponível em baixa pressão para compressão em cada plataforma, isto é, o gás associado ao óleo (*KgA*, constante para cada plataforma), mais o gás *lift* retornado (*Kgl*, constante para cada plataforma), mais o gás recebido de outra plataforma (*receb*, variável não negativa), subtraído o gás em baixa pressão transferido para uma outra plataforma (*transf*, variável não negativa) e o gás queimado (*quei*, variável não negativa);

$$comp_i + quei_i - glc_i = KgA_i, \forall i \tag{4}$$

o qual estabelece que em cada plataforma o gás que não é comprimido será queimado;

$$comp_i - \sum_{j=1}^{cAi} KcA_j xcA_j \leq 0, \forall i \tag{5}$$

$$comp_i - dispcomp_i \leq 0, \forall i \tag{6}$$

$$comp_i \geq 0, \forall i \tag{7}$$

estas relações garantem que a plataforma *i* comprimirá o menor valor positivo entre a capacidade dos compressores e o gás disponível para compressão;

$$\sum_{i=1}^{n} s_i \leq demanda, \forall i \tag{8}$$

o qual determina a restrição que controla o volume máximo de gás que pode ser enviado para os consumidores (*P* é o conjunto de índices das plataformas);

$$0 \leq glc_i \leq Kgl_i, \forall i \tag{9}$$

estabelece que o volume de gás *lift* estará entre 0 e o volume proposto (*Kgl*) (é necessário introduzir esta restrição, porque, em algumas configurações de compressão da plataforma *i* a capacidade de compressão é menor do que o volume de gás *lift* proposto Kgl_i);

$$0 \leq quei_i \leq KgA_i, \forall i \tag{10}$$

o qual limita o volume de gás queimado (*quei*).

Uma vez que as demandas de consumo de gás estão satisfeitas em cada plataforma *i*, um volume s_i de gás é injetado na rede de gasodutos. Assim, algumas limitações associadas com o fluxo de gás circulando nos trechos dos gasodutos e as pressões nas extremidades de cada trecho devem ser consideradas.

Para fazer isso, observe que a rede de gasoduto pode ser representada por um grafo direcionado (Rios-Mercado et al, 2004;. Wolf, 2003). Considere uma rede com *n* nós e *l* dutos. Tal rede pode ser descrita por um grafo orientado $G = (N, D)$, onde N ($|N| = n$) é o conjunto de vértices (nós) e $D \subseteq N \times N$ é o conjunto de arcos (dutos). A cada arco $(i, j) \in D$ associa-se uma direção positiva (arbitrária), do nó *i* ao nó *j*, indicando que, se o fluxo f_{ij} que circula no arco, é não negativo, a sua direção coincide com o sentido positivo do arco, sendo negativo no outro caso.

Portanto, sob as condições assumidas, uma primeira relação, chamada de *balanço de fluxos*, para cada nó $k \in N$ é:

$$\sum_{(k,i)\in D} f_{ki} = \sum_{(i,k)\in D} f_{ik} + s_k, \tag{11}$$

onde $s_k \geq 0$ se o nó *k* é gerador de fluxo, $s_k \leq 0$ se o nó k é consumidor de fluxo e $s_k = 0$ em outro caso. O vetor s, chamado de *vetor de fontes*, deve também satisfazer a relação $\sum_{i\in N} s_k = 0$.

Uma outra relação a considerar é a denominada *balanço de pressões*, entre o fluxo f_{ij}, circulando no trecho $(i, j) \in D$ do gasoduto, e as pressões p_i e p_j nos respectivos extremos do trecho, dada por (Wolf, 2003; Chaves, 1999):

$$p_i^2 - p_j^2 = c_{ij} f_{ij} \mid f_{ij} \mid, \tag{12}$$

onde a constante $c_{ij} > 0$ é o coeficiente de resistência do duto, que depende das características físicas do trecho. Note que o sinal do lado direito da relação (12) pode ser positivo ou negativo, dependendo do sinal de f_{ij} , de modo que p_i é maior do que p_j ou vice-versa, respectivamente. No problema aqui tratado existe um único nó consumidor de fluxo, digamos o nó *n*, onde a pressão é fixada, $p_n = \overline{p}_n$. As pressões nos outros nós devem satisfazer as restrições:

$$0 \leq \overline{p}_i^{\,L} \leq p_i \leq \overline{p}_i^{\,U}, \; i \in N \setminus \{n\} \tag{13}$$

onde $\overline{p}^L$ e $\overline{p}^U$ são vetores dados.

Note que 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.

As relações (11) e (12) acima, podem ser escritas em uma forma compacta, usando alguns conceitos adicionais associados ao gráfico G. Considerando a rede com *n* nós e *l* dutos, a matriz de incidência nó-duto *A* do grafo *G* é uma matriz de dimensão *n* x *l* cujos elementos são dados por:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ se o arco } j \text{ sai do nó } i; \\ -1, \text{ se o arco } j \text{ entra no nó } i; \\ 0, \text{ em outro caso.} \end{cases} \tag{14}$$

Sendo p_i a pressão no nó *i* e $p^T = p_1, \ldots, p_n$, considere o vetor de fontes *s*, como em (11). Lembrar, também, que o vetor de fontes deve satisfazer a relação:

$$\sum_{i \in N} s_i = 0. \tag{15}$$

Assim, o balanço de fluxos e pressões da malha de gasodutos ((11) e (12)) pode agora ser escrito como:

$$\begin{aligned} &Af = s, \\ &A^T p^2 = b(f), \end{aligned} \tag{16}$$

onde $f^T = f_1, \ldots, f_l$ é o vetor de fluxos (com f_j sendo o fluxo no duto $j \in \{1, \ldots, l\}$ e $l = |D|$), $(p^2)^T = p_1^{\,2}, \ldots, p_n^{\,2}$ e $b_k(f) = c_k f_k |f_k|$, onde c_j é uma constante que depende do duto $j \in \{1, \ldots, l\}$ do gasoduto. Desde que o posto da matriz *A* é *n*-1, considerando a matriz reduzida A_R como a matriz *A* sem a última linha e o vetor s_R como o vetor *s* sem a última componente, o sistema $Af = s$, em (16), é equivalente ao sistema $A_R f = s_R$. Consequentemente, ao invés de considerar o sistema (16) como balanço de fluxos e pressões considera-se o sistema:

$$\begin{aligned} &A_R f = s_R \\ &A^T p^2 = b(f) \\ &0 \leq \overline{p}_i^{\,L} \leq p_i \leq \overline{p}_i^{\,U}, \qquad i \in N \setminus \{n\}, \qquad p_n = \overline{p}_n \end{aligned} \tag{17}$$

Assim, o sistema de balanços (11) - (13) pode ser expresso pela relação (17).

Note que o conjunto de soluções viáveis para as equações de balanço de pressões, a segunda equação em (17), é não convexo (Wolf, 2003), o que aumenta a dificuldade para resolver o problema.

Utilizando um teorema conhecido da literatura (Teorema 2, Rios-Mercado et al, 2000) e as relações (17), considerando $\tilde{p} = p^2$, o sistema de balanço de fluxo e pressões é transformado em:

$$A_R f = s_R , \quad B_R b(f) = 0, \quad A^T \tilde{p} = b(f). \tag{18}$$

A vantagem do sistema (18), em relação ao (17), é que os dois primeiros conjuntos de equações ($A_R f = s_R$ e $B_R b(f) = 0$) tem solução única (Corolário 2, Rios-Mercado et al, 2000) e pode ser resolvido pelo método de Newton – Raphson.

A função objetivo associada ao problema do planejamento da transmissão de gás considerada é a função lucro, que considera as seguintes receitas e custos:

• Receita da venda de gás, constituída pelo somatório dos volumes de gás disponibilizados para venda em cada plataforma multiplicados pelos seus preços de venda.

• Receita do gás *lift*, constituída pelo somatório dos volumes de óleo adicional dos poços produzido em função do gás *lift*, multiplicado pelos respectivos preços de venda do óleo (P_{glc}), corresponde ao ganho financeiro da injeção de gás *lift* .

• Receita Unitária da Injeção para Recuperação Secundária (P_{rec}), correspondente aos valores do volume adicional de óleo recuperado em função da injeção de gás.

• Receita Unitária do gás injetado para armazenamento (P_{inj}), constituída pelos respectivos valores do gás que não foi queimado.

• Custo *Take or Pay* ($Dif_{\mathrm{T\ or\ P}}$), multa unitária por entrega de volume de gás abaixo do mínimo acordado.

• Custo unitário do gás queimado (P_{quei}), que surge quando se considera como objetivo a maximização da função lucro (se houver necessidade de queima de gás, deve-se priorizar o volume da plataforma que tem, a princípio, menor preço de venda).

Portanto, considerando a função objetivo:

$$F\ \ s, f, x, y\ \ = P_s^T s + P_{glc}^T glc + P_{inj}^T inj + P_{rec}^T inj_{rec} - P_{quei}^T quei - Dif_{\mathrm{T\ or\ p}}^T multa \tag{19}$$

onde $y^T = (glc^T, inj^T, inj_{rec}^T, comp^T, cstg^T, receb^T, quei^T, transf^T, cstc^T)$ é o vetor de variáveis operacionais nas plataformas. Note que a função F(.) é não diferenciável.

Assim, o problema de determinar a configuração de compressores nas plataformas (vetor binário *x*), a operação de plataformas (vetor de variáveis operacionais *y* nas plataformas e o vetor de fontes *s*), o vetor de fluxo (*f*), e o vetor de pressão (*p*), para maximizar a função lucro é dado por:

$$\begin{aligned} &\max \ \ F(f, s, y, x) \\ &s.a \\ &\quad Af = s \\ &\quad A^T p^2 = b(f) \\ &\quad Cy + Dx = s_p \\ &\quad Ey \le e \\ &\quad \bar{p}_i^L \le p_i \le \bar{p}_i^U, \quad i = 1, \ldots, n-1 \\ &p_n = \bar{p}_n,\ f \ge 0,\ \ 0 \le y \le y^s,\ \sum_{i \in P} s_i \le d,\ \ x \in \{0,1\}^m, \end{aligned} \tag{20}$$

Neste modelo, C, D e E são matrizes adequadas (dada pelas relações (3) - (6)); *e* é um vetor constante dado; P é o conjunto de índices das plataformas; o vetor s_P é o vetor fonte associado às plataformas; n é o número de nós da rede de gasodutos; y^s é o vetor de limite superior associado às variáveis operacionais nas plataformas; d é a demanda de gás natural solicitada; e m é o número total de compressores no sistema.

4. Comparação Entre AG e GRASP na Implementação da Heurística Proposta

A heurística proposta realiza dois procedimentos básicos em cada iteração.

O primeiro, fixa uma configuração de compressores (fixando o vetor binário x, definindo, assim, uma capacidade de compressão para cada plataforma), então, depois de satisfazer as exigências requeridas de gás em cada plataforma, ele define os componentes do vetor fonte para as plataformas (s_i, para $i \in P$), tentando injetar a quantidade máxima de gás na rede de gasodutos de uma forma gulosa (fazendo *inj* e *quei* o menor possível, começando com zero).

O segundo procedimento começa logo que os componentes do vetor de fontes correspondente às plataformas são definidos. Nesta fase, tentamos enviar os fluxos através da rede de gasodutos. Assim, um vetor de fluxos f e um vetor de pressões p satisfazendo (18) devem ser encontrados. Se estes vetores não são viáveis (por causa das restrições de pressão (13)), significa que as componentes do vetor fonte das plataformas devem ser diminuídas. Em seguida, eles são reduzidos, de forma adequada (aumentando *inj* primeiro e depois *quei*), retornando ao primeiro procedimento, até serem encontradas as componentes s_i, $i \in P$, um vetor de fluxos f e um vetor de pressões p satisfazendo as relações (18). Desta forma, para cada configuração de compressores é associada uma solução viável, para um determinado vetor s (definida por (1)).

A seguir, são descritos os respectivos passos executados pelo algoritmo genético (AG) e GRASP para implementar a heurística proposta.

4.1. Agoritmo Genético Proposto

Mais formalmente, podemos estabelecer as seguintes considerações. Diz-se que a plataforma i tem certa configuração de compressão quando um determinado conjunto de valores 0–1 é considerado para as variáveis binárias xcA_{ij} (estado de operação do compressor j na plataforma i). Portanto, todas as configurações possíveis de compressão das plataformas são formadas por um conjunto de disposições de 0's e de 1's (com o tamanho do arranjo correspondente ao número total de compressores da rede dado por m). Considerando essas configurações possíveis, no AG proposto apresentado aqui, cada arranjo possível é um *cromossomo* e cada 0 ou 1 do cromossomo é chamado um *gene*, representando um estado de funcionamento (ligado ou desligado) do compressor correspondente na respectiva plataforma.

Assim, os seguintes passos são executados pelo algoritmo:

Algoritmo 1 (AG – Algoritmo para o Planejamento do Balanço de Gás)

Passo 1. (Leitura de parâmetros) Produção de gás, *gás lift*, dados dos compressores e gasodutos, pressão de entrega, paradas programadas, etc.
Passo 2. (Geração da população inicial de indivíduos - cromossomos) Gera a população $P(t)$ que irá representar as possíveis soluções para a configuração operacional dos compressores.
Passo 3. (Viabilidade da População Atual) Para cada cromossomo, este passo fornece um vetor viável s, um vetor de fluxo viável f e um vetor de pressão viável p.
- Calcular, para cada cromossomo, as componentes $si>0$ (do vetor de fontes s) usando a relação (1), considerando as relações (2)-(10).
- Resolver o sistema (18) de balanço de fluxos e pressões, utilizando o método de Newton-Raphson.

- Verificar se as condições de pressão estão sendo satisfeitas para cada plataforma, isto é, se a relação (13) é satisfeita.

Caso estas condições não forem satisfeitas:

- Aumentar a injeção de gás para armazenamento, com incrementos de 10% do gás produzido, 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, com incrementos de 10% do gás produzido, até que as condições de pressão sejam atendidas.

Recalcular os valores de s_i (menores que os iniciais) e calcular o valor da função objetivo F (*função de aptidão*).

Passo 4. (Critério de parada) Enquanto critérios de parada não estiverem satisfeitos:

- Gerar nova população ***P(t+1)*** a partir de ***P(t)*** (população atual). Para a seleção dos cromossomos que irão gerar descendentes escolhem-se os melhores indivíduos da população dividida por subgrupos. Utiliza-se nesta etapa os operadores de *crossover* e *mutação,* com probabilidades de 70% e 0,5% respectivamente. Faça $t = t+1$.
- Retornar ao **Passo 3**.

Passo 5. (Refinamento da solução**)** Na população atual, encontre um cromossomo que maximiza a função aptidão. Para este cromossomo, como no passo 3, calcule o vetor *s* aumentando a injeção de gás e a queima de gás com incrementos de 1% do gás produzido (ao invés de 10%).

4.2. Algoritmo GRASP proposto

A metaheurística GRASP baseia-se na premissa de que diferentes soluções iniciais de boa qualidade tem um papel importante no sucesso dos métodos de busca local. A heurística consiste de dois estágios, onde a cada iteração uma solução construída pela GRASP é seguida por uma busca local. Este procedimento é repetido diversas vezes e a melhor solução encontrada é retornada pela GRASP (Feo e Resende, 1995).

Neste modelo de planejamento de transmissão de gás temos uma matriz $J_i = [x_{jk}]$**,** para cada nó ou plataforma *i*, onde x_{jk} pode assumir o valor 0 (desligado) ou 1 (ligado) que representa o valor operacional do compressor *k* em cada configuração possível *j*. Assim, J_i é a matriz que representa todas as configurações possíveis de condições de operação dos compressores.

Um custo $C_i(j,k)$ da plataforma *i* é calculado para cada configuração *j* de compressores operacionais *k*. Tal custo, é a soma de todo gás consumido, gás queimado e gás injetado da plataforma *i*.

O conjunto solução *s* é construído através da inclusão de um elemento por vez, até o conjunto *s* ser uma solução possível. Para determinar quais dos candidatos devem ser selecionados para serem incluídos nas soluções, fazemos uso de uma lista de candidatos restrita LCR, de acordo com um critério de classificação pré-determinado. Este processo de classificação é baseado numa função gulosa adaptativa, que estima o benefício da seleção de cada elemento. O funcionamento do algoritmo GRASP proposto é descrito a seguir:

Algoritmo 2 (GRASP – Algoritmo para o Planejamento do Balanço de Gás)

Passo 1. (Leitura de parâmetros) Produção de gás, gás *lift*, dados dos compressores e gasodutos, a pressão de entrega, matriz de incidência da rede (A_R), matriz de ciclo reduzido B_R(Rios-Mercado et al, 2000), paradas programadas, matriz de condição de operação de compressão $J_i = [x_{jk}]$, etc.

Passo 2. (Fase de Construção) Calcule $s_i(j)$ para cada plataforma e $C_i(j)$ para todas as configurações possíveis de operação de compressores na plataforma *i* (total de 2^{cA_i}, onde cA_i é o nº de compressores instalados na plataforma *i*);
Inicialize o conjunto *C* de candidatos

Enquanto $C \neq \phi$ faça:

$C_{i_{min}} = min\{C_i(j) \mid j \in C)$

$C_{i_{max}} = max\{C_i(j) \mid j \in C)$

Calcule a *LCR* para cada plataforma *i*:

$LCR_i = \{ j \in C \mid C_i(j) < C_{i_{\min}} + \alpha(C_{i_{\max}} - C_{i_{\min}})$

Selecione aleatoriamente um elemento $j \in LCR$

$s_i \leftarrow s_i(j)$

Atualize o conjunto *C* de candidatos

$C \leftarrow C \setminus \{ s_i(j)\}$

Fim enquanto

Retorne *s*

Passo 3. (viabilização as condições de pressão e avaliação da solução)

- Resolver o sistema de balanço de fluxo e pressão (18).
- Verifique se as condições de pressão são satisfeitas para cada plataforma, ou seja, se a relação (13) é satisfeita.

Se essas condições não forem satisfeitas:

- Aumentar a injeção de gás para o armazenamento, com passo de 10% do gás produzido, até que as condições de pressão sejam atendidas ou até que o limite máximo de injeção é atingido.
- Aumentar a queima de gás nas plataformas, com passo de 10% do gás produzido nas plataformas que possuírem pressão maior que o limite de pressão operacional, até que as condições de pressão sejam atendidas.

Recalcular os valores de s_i (menores do que os valores iniciais) e calcular o valor da função objetivo F.

Passo 4. Fase de busca local que substitui a configuração *J* de cada plataforma *i* pela configuração que resulta no custo mínimo $C_{i_{\min}}$

$s^* \leftarrow s$ {melhor solução encontrada}

$V = \{s' \in N(s) \mid s' = s(j_{\min})\}$

Enquanto $|V| > 0$ faça:

Selecione $s' \in V$

- Atenda as condições de pressão e avalie a solução.
- Resolva o sistema de balanço de fluxo e pressão (18).
- Verifique se as condições de pressão são satisfeitas para cada plataforma *i*, ou seja, se a relação (13) é satisfeita.

Se essas condições não forem satisfeitas:

- Aumentar a injeção de gás para o armazenamento, com passo de 10% do gás produzido, até que as condições de pressão sejam atendidas ou até que o limite máximo de injeção seja atingido.
- Aumentar a queima de gás nas plataformas, com passo de 10% do gás produzido nas plataformas que possuírem pressão maior que o limite de pressão operacional, até que as condições de pressão sejam atendidas.

Recalcular os valores de s_i (menores do que os valores iniciais) e calcular o valor da função objetivo F.

Se $F(s) > F(s^*)$ então $s^* = s$ e $F(s^*) = F(s)$

$V = \{ s' \in N(s) \mid F(s') > F(s) \}$

Fim enquanto

$s \leftarrow s^*$

Retorne s (Fim busca local)

Passo 5. Critério de parada satisfeito?

a) Se não, vá ao **Passo 2.**

b) Se sim, **FIM**

O critério de parada utilizado foi $t < K$, onde K é o nº de iterações: os testes mostraram que em redes maiores, um máximo de 30 iterações é suficiente.

5. Apresentações de Dados e Resultados

A seguir, são apresentados os resultados dos testes que foram realizados com a GRASP e o AG em instâncias reais. O modelo matemático foi testado também em um software comercial que utiliza algoritmos exatos (LINGO), na tentativa de encontrar a solução ótima destas instâncias. Para a realização dos testes, foram utilizadas malhas (redes) de 60, 80 e 100 nós. A seguir, nas tabelas 1, 2 e 3, são apresentados os resultados dos testes, que foram realizados em um computador Pentium M Centrino 1.3 GHz, 512 M de RAM.

	LINGO		A.G		GRASP	
	FO	t(seg)	FO	t(seg)	FO	t(seg)
60 nós e 59dutos	4,68E+07		4,71E+07	302	4,73E+07	312,1
60 nós e 64dutos	4,88E+07		4,84E+07	101	4,87E+07	20,3
60 nós e 70dutos	4,92E+07		4,88E+07	25,5	4,92E+07	5,3
60 nós e 75dutos	4,92E+07		4,88E+07	21,7	4,93E+07	5,7
60 nós e 80dutos	4,93E+07		4,88E+07	30,6	4,93E+07	6,52

Tabela 1: Resultados de testes da malha com 60 nós

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

Tabela 2: Resultados de testes da malha com 80 nós

	LINGO		A.G		GRASP	
	FO	t(seg)	FO	t(seg)	FO	t(seg)
100 nós e 99dutos	não viável		7,69E+07	325	7,72E+07	593
100 nós e 104dutos	não viável		7,70E+07	60	7,73E+07	25
100 nós e 109dutos	não viável		7,70E+07	68	7,73E+07	26
100 nós e 114dutos	não viável		7,70E+07	71	7,73E+07	32
100 nós e 119dutos	não viável		7,70E+07	127	7,73E+07	44

Tabela 3: Resultados de testes da malha com 100 nós

6. Análise dos Resultados

Para sistemas com pequeno número de plataformas, verifica-se que o Algoritmo Genético e GRASP têm bom comportamento. Praticamente em todas as redes chegam-se aos mesmos valores da Função Objetivo. Os tempos de otimização são semelhantes, sendo que o Sistema GRASP tem se mostrado mais rápido que o Algoritmo Genético.

Para sistemas grandes, acima de 60 nós, o LINGO apresenta em alguns casos, soluções não viáveis, sendo que a otimização é interrompida por inviabilidade. Para as metaheurísticas testadas, o sistema GRASP tem uma eficiência melhor que o Algoritmo Genético. Outro problema verificado no sistema exato, mesmo para redes pequenas é que quando o fluxo positivo otimizado é o oposto ao sentido direcionado, este sentido tem de ser redirecionado para que se consiga obter valores melhores. Este procedimento foi guiado pelos fluxos das metaheurísticas e também pelos valores dos fluxos preliminares, tendo-se que buscar os valores ótimos por tentativas.

Para as redes de 100 nós, no sistema LINGO, mesmo com o redirecionamento dos sentidos dos fluxos não se conseguiu melhorar as soluções. O sistema encontrava ótimos locais.

7. Conclusões

- O algoritmo genético híbrido e o sistema GRASP híbrido apresentaram excelentes resultados para resolver o problema da movimentação de gás.

- Os algoritmos exatos têm dificuldade de encontrar os valores ótimos absolutos para os problemas de grande porte, o que já era esperado em função do problema ser classificado como NP-completo.

- Os resultados comprovam uma maior robustez do sistema em análise em relação ao processo de cálculo de fluxo e pressões da malha de gasodutos e conseqüentemente da análise integrada do sistema de compressão e escoamento.

- Testes efetuados com o novo sistema proposto, baseado em um modelo misto-inteiro quadrático, que utiliza um algoritmo híbrido genético e outro que utiliza o algoritmo GRASP para geração de populações e um método exato para o balanço de fluxos e pressões (o método de Newton-Raphson), têm mostrado excelentes resultados, tanto em termos de precisão, como em tempo total de processamento.

- O novo módulo proporciona condições de análise mais detalhada dos resultados, principalmente no que se refere ao cálculo de fluxo e perda de carga através dos gasodutos.

- Dentre os possíveis usos desta metodologia podemos citar: otimização da capacidade dos dutos, permitindo uma completa visibilidade através da rede de gasodutos e sistema de compressão e suportando tomadas de decisão encontrando o nível ótimo de operação, menores custos de operação, controle de eventos não previstos.

- 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 soluções melhores através de capacidades disponíveis não utilizadas, aumentando receitas sem investimento adicional em facilidades.

8. Referências

Bemporad, A.; Mignone, D.; Morari, M. (1999), An Efficient Branch and Bound Algorithm for State Estimation and Control of Hybrid Systems. European Control Conference.

Chaves, J. R. da C. (1999), Linearização da Equação de WEYMOUTH”, PETROBRAS, Rio de Janeiro.

Feo, T. A., e Rezende, M. G. C. (1995), Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. Journal of Global Optimization, 6: 109-133.

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., Galaxe, F.P., Chavez, J.R.A., Iachan, R., Justiniano, L.R.S. (2005a), Um algoritmo genético híbrido para o planejamento de movimentação de gás da bacia de Campos. XXXVII SBPO- *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Gramado, RS.

Iamashita, E. K., Galaxe, F., Arica, J. (2005b), A New Integrated Planning Model for Gas Compression and Transmission Through a Complex Pipeline Network. RIO PIPELINE CONFERENCE & Exposition. Rio de Janeiro.

Rios-Mercado, R. Z.; Wu, S.; Scott R.L.; Boyd, A. (2000), Preprocessing on Natural Gás Transmission Networks. Universidad Autônoma de Nuevo Leon, AP 111 – F, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, NL 66450, México, (e-mail: roger@uanl.mx).

Rios-Mercado, R.Z.; Kim, S. ; Boyd, E.A. (2004), Efficient Operation of Natural Gas Transmission Systems: A Network-Based Heuristic for Cyclic Structures. Universidad Autónoma de Nuevo León, AP 111 – F, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, NL 66450, México.

Wolf, D. De (2003), Mathematical Properties of Formulations of the Gas Transmition Problem, Université de Lille 3, B.P. 149, 59 653 Villenueve D’ascq Cedex, France. (dewolf@univ-lille3.fr).