



IBP1321_07

GAS PIPELINES OPTIMIZATION ROUTINE

Leonardo Guedes M. de Souza¹, Leonardo M. Carneiro²,
Luis Fernando Pires³, Philippe B. Krause⁴

Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

Resumo

O gás natural, por ser uma fonte de energia mais limpa que o petróleo e possuir uma grande versatilidade vêm crescendo no Brasil. Este crescimento exige um desenvolvimento tecnológico tanto na área de produção como na área de transporte de gás natural. Particularmente na área de transporte, uma questão importante é a potência consumida nas estações de compressão ao longo dos gasodutos. Os custos operacionais dos compressores representam um percentual tão elevado dos custos operacionais totais, que mesmo pequenas melhorias na utilização dos sistemas de compressão representam quantias substanciais de dinheiro. Assim, uma maior potência consumida acarreta lucros menores e uma maior emissão de poluentes.

A operação de um gasoduto ou de uma rede de gasodutos é baseada na manutenção de um determinado inventário de gás no sistema que permita atender aos valores demandados atuais e futuros. As estações de compressão são operadas de forma a manter este inventário. Porém, devido à complexidade do sistema, isto é, devido ao grande número de variáveis envolvidas, os pontos operacionais selecionados para as estações de compressão são baseados na experiência e na experimentação e não são, geralmente, os valores ótimos.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma rotina de otimização utilizando ferramentas computacionais de fácil acesso, capaz de calcular os parâmetros do escoamento e minimizar a potência total consumida nas estações de compressão de um gasoduto. Os parâmetros do gasoduto como diâmetros, comprimentos, perfil de elevação, equipamentos e condições operacionais arbitradas, são introduzidos numa planilha Excel e servem como dados de entrada para uma rotina criada no MATLAB, que calcula o perfil de pressão e vazão no estado estacionário, bem como a potência e o gás consumido nas estações de compressão. Esta rotina permita tratar gasodutos complexos com diversos pontos de retirada intermediários, várias estações de compressão e redes de gasodutos. A partir desta condição inicial calculada, a rotina de otimização desenvolvida, empregando funções de minimização disponíveis no MATLAB, define um pacote ideal de pressões de descarga nas estações de compressão, que representa uma nova condição operacional válida, na qual o consumo de combustível é minimizado, reduzindo os custos operacionais e a emissão de poluentes. As soluções otimizadas de três casos são apresentadas, incluindo um trecho real do GASBOL, exemplificando a utilidade e a flexibilidade da metodologia desenvolvida.

Abstract

The growth of Natural Gas in Brazil is due mostly because it's a cleaner and more versatile energy source than oil. This growth demands new technology development both in the production and in the transportation of natural gas. In the transportation field, an important question is the consumed power at compression stations throughout the gas pipes. These compressors' operational costs represent such a high percentage of the total costs that even small enhancements may cause a substantially high cutback on the cost of the operation. Thus, a greater power consumption leads to a lower profit margin and an even larger pollutant emission.

¹ Engenheiro Mecânico – PETROBRAS

² Engenheiro Mecânico – SIMDUT – PUC-Rio

³ PHD, Engenheiro Mecânico – SIMDUT – PUC-Rio

⁴ Engenheiro Mecânico – SIMDUT – PUC-Rio

The operation of a gas pipe or a network of gas pipes is based on the maintenance of a certain gas inventory in the system that allows the supply of current and future demands. The compression stations are operated in order to keep this inventory. However, due to the system's complexity, the selected operational points for the compression stations are experimentally-based and are usually not optimal values.

The purpose of this work is to develop an optimization routine using accessible computational tools, capable of calculating flow parameters and to minimize the total consumed power at compression stations of gas pipes. Parameters like diameter, length, elevation profile, equipment and arbitrated operational conditions are inserted in an MICROSOFT EXCEL™ spreadsheet and serve as input for a MATLAB™ routine that calculates pressure and flow profiles at steady state, as well as consumed power and gas at the stations. This routine allows proper treatment of complex gas pipes networks or those with several intermediate sample points and compression stations. From this calculated initial condition, the developed optimization routine, using minimization functions available at MATLAB™, defines the ideal discharge pressures that represent a new valid operational condition, whose power and fuel consumptions are minimized, decreasing operational costs and pollutant emissions. The optimal solutions of three cases are presented, including an actual section of GASBOL (Brazil-Bolivia gas pipe), evidencing the usefulness and flexibility of the developed methodology.

1. Introdução

O crescimento do gás natural em nossa matriz energética exige um desenvolvimento tecnológico tanto na área de produção como na área de transporte de gás natural. Particularmente na área de transporte, uma questão importante é a potência consumida nas estações de compressão ao longo dos gasodutos. Os custos operacionais dos compressores representam um percentual considerável dos custos operacionais totais, de forma que mesmo pequenas melhorias na utilização dos sistemas de compressão podem representar quantias substanciais. Assim, uma maior potência consumida acarreta lucros menores e uma maior emissão de poluentes. A operação de um gasoduto ou de uma rede de gasodutos é baseada na manutenção de um determinado inventário de gás no sistema que permita atender aos valores demandados atuais e futuros. As estações de compressão são operadas de forma a manter este inventário. Porém, devido à complexidade do sistema, isto é, devido ao grande número de variáveis envolvidas, os pontos operacionais selecionados para as estações de compressão são baseados na experiência e na experimentação e não são, geralmente, os valores ótimos. Esta preocupação, em países onde a malha de distribuição de gás natural é complexa, se traduz em trabalhos visando otimizar as condições operacionais. Notadamente observa-se, desde o início dos anos 60 (Carter, 1998), a necessidade de desenvolver ferramentas que permitam configurar as variáveis operacionais de forma a minimizar a potência consumida nas estações de compressão, porém atendendo diversos requisitos restritivos de operação. A elaboração desta metodologia de operação envolve duas etapas (Sekirnjak, 1996). A primeira etapa é determinar um método numérico para a análise do escoamento de gás na malha de dutos que gere um modelo computacional que se comporte como o sistema real. Na segunda etapa, a potência total das estações de compressão é transformada numa função de determinadas variáveis operacionais, chamada de função objetivo, e submetida a um processo de otimização de forma a minimizar esta função.

Em relação ao modelo numérico da malha de gasodutos, diversas abordagens são encontradas na bibliografia. Quando se deseja analisar situações de curta duração, como por exemplo, o efeito da partida ou de parada de uma usina termoelétrica, deve-se desenvolver uma rigorosa formulação transiente (Krishnaswami et al, 2004). Quando a necessidade é de um estudo estratégico de longo prazo, a abordagem caracterizada por uma formulação em estado estacionário ou em um estado transiente simplificado produz os resultados desejados (Wu et al, 2000 e Kelling et al, 2000). O processo de otimização pode ser realizado através de diversas metodologias, como algoritmos genéticos (Botros, 2004), por programação dinâmica (Carter, 1998) ou por programação seqüencial (Krishnaswami et al, 2004). Esta última tem a vantagem de existir no mercado diversos pacotes de programação de aplicação geral. Uma extensiva revisão destas técnicas foi realizada por More (1993). Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo em estado estacionário de uma malha de gasodutos implementado no *software MATLAB*. A otimização utiliza rotinas já existentes neste software, baseadas no método de programação seqüencial quadrática com restrições. As características da malha, como diâmetros e comprimentos dos dutos, condições nos pontos de entrega e recebimento, dados dos compressores, etc, são montados numa planilha *Microsoft Excel* e servem como dados de entrada para a rotina criada no *MATLAB*. O resultado visa estabelecer um pacote de pressões de descarga nas estações de compressão tal que a potência total consumida nessas estações seja mínima, reduzindo assim o consumo de combustível/energia nos acionadores dos compressores e conseqüentemente os custos de operação do gasoduto. Esta rotina foi denominada ROG (Rotina de Otimização de gasodutos).

Basicamente, um gasoduto envolve o escoamento de um gás de um ou mais fornecedores para um ou vários pontos de entregas que são os consumidores ou clientes. A pressão nos fornecedores é um valor normalmente conhecido devido às características operacionais e contratuais do próprio fornecedor. Nos pontos de entrega, a vazão é

sempre conhecida, pois ela deve atender a um contrato predefinido entre consumidor e fornecedor. Normalmente, a pressão de entrada no fornecedor não é suficiente para vencer a perda de carga do duto e fornecer a vazão requerida pelos pontos de entregas, sendo necessária a utilização de estações de compressão. Todos os pontos do duto devem obedecer ainda a condições de pressão mínimas e máximas, também conhecidas, devido a questões operacionais e estruturais. Os gasodutos possuem também válvulas controladoras de pressões utilizadas para garantir seu funcionamento dentro dos limites operacionais e válvulas de segurança, que garantem a segurança do duto em situações de aumento indevido de pressão.

Tendo as vazões nos pontos de entrega fixas e as pressões limitadas, cabe ao operador do gasoduto utilizar as variáveis de controle disponíveis para garantir o fornecimento ao cliente, como o número de compressores em operação e as pressões de descarga nas estações de compressão, pressões de ajuste das válvulas de controle de pressão, etc. Neste trabalho, somente as pressões de descarga no duto são utilizadas como variáveis de controle, ou seja, deseja-se determinar qual o pacote de pressões de descarga ótimo de modo que a potência total consumida nas estações de compressão seja mínima.

2. Modelagem Matemática

2.1 Hipóteses Adotadas

A modelagem do escoamento de gás em dutos envolve o uso de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia que descrevem as relações das diversas variáveis que governam tal fenômeno. De acordo com o problema a ser resolvido, diversas hipóteses podem ser formuladas visando simplificar o tratamento destas equações. A mais comum em relação a gasodutos é o escoamento unidimensional. Além disto, considera-se:

- Escoamento compressível
- Propriedades do gás constantes entre pontos discretos do gasoduto e iguais aos valores médios entre os pontos
- Regime permanente
- Escoamento isotérmico
- Compressores utilizam o próprio produto transportado como fonte de energia

2.2 Formulação Matemática

A equação de estado dos gases reais é utilizada para relacionar a massa específica com a pressão e a temperatura. O cálculo do fator de compressibilidade z utiliza a equação CNGA (McCain, 1973). A pressão média num determinado trecho de duto foi determinada considerando uma queda de pressão não linear e a temperatura média é obtida pela média aritmética das temperaturas de entrada e saída do trecho de duto considerado.

A vazão volumétrica no duto pode ser calculada em função da pressão diferencial no duto, a partir das equações de conservação da massa e quantidade de movimento linear, aplicando as hipóteses do Item 2.1, resultando na Equação 1 (Schroeder, 2001):

$$Q_{std} = C \frac{T_{std}}{P_{std}} D^{2,5} \eta_p \sqrt{\frac{P_{in}^2 - P_{out}^2 - Y}{L SG T_{av} z_{av} f}} \quad (1)$$

onde L é o comprimento do trecho, D o diâmetro interno, T é a temperatura, P é a pressão, SG é a razão entre as massas específicas do gás e do ar e f é o fator de atrito. O índice av indica valor médio, o índice std é referente as condições padrão e in e out indicam entrada e saída do trecho de duto considerado. O termo Y é a correção devido a diferença de cota entre a entrada e a saída do duto e definida na Equação 2. Note que para dutos horizontais, $Y = 0$. A constante C vale 0,28704 quando se trabalha com as unidades do S.I. O fator de atrito é calculado pela equação de Colebrook-white (Fox e McDonald, 2001)

$$Y = \frac{0,06835 SG (h_{suc} - h_{dis}) P_{av}^2}{z_{av} T_{av}} \quad (2)$$

Para a solução da Equação 1, um segmento de duto deve ser criado sempre que houver mudança do diâmetro interno, variação da elevação e a existência de um equipamento. Os diversos segmentos que representam o gasoduto real são conectados matematicamente considerando a conservação de massa e a igualdade de pressão. Onde existe um equipamento (compressor ou válvula, por exemplo), os trechos de duto a montante e a jusante são conectados através da equação matemática que representa o equipamento.

O cálculo do *head* isoentrópico H é definido pela Equação 3 (Kurz, 2004) onde a variável σ é o expoente isoentrópico. Para que seja possível utilizar o *head* isoentrópico, é necessário o uso de uma eficiência isoentrópica η_{ise} , a qual quantifica o quanto o processo real se aproxima do ideal (isoentrópico). Tendo determinado a energia fornecida ao gás pelo compressor, é possível estabelecer a potência consumida Pot . Além da eficiência isoentrópica, a potência depende também da eficiência mecânica do compressor η_{mec} , relacionada a atritos, vazamentos, etc como apresentada na Equação 4.

$$H_{ise} = 0,28704 \frac{T_{suc} z_{suc}}{\sigma SG} \left(\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^\sigma - 1 \right) \quad (3)$$

$$Pot = \frac{H_{ise} \dot{m}}{\eta_{ise} \eta_{mec}} \quad (4)$$

Dada uma configuração de *head* isoentrópico e vazão, deve-se utilizar as curvas de operação do compressor para determinar primeiramente sua rotação e em seguida sua eficiência isoentrópica. A rotina desenvolvida possui uma sub-rotina que calcula tais parâmetros a partir de uma base de dados em Excel com os pontos das curvas dos compressores. Como alternativa, pode-se optar por arbitrar diretamente a eficiência isoentrópica do compressor sem recorrer às suas curvas. O combustível consumido pelo compressor pode ser estimado através da Equação 5 (Kurz, 2004):

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Pot}{LHV \eta_{drv}} \quad (5)$$

2.3 Função Objetivo

Um modelo simples de escoamento em gasodutos consiste em uma linha de diâmetro constante com somente um fornecedor a montante e somente um consumidor a jusante com estações de compressão intermediárias. Inicialmente, esta configuração simples de um gasoduto será analisada, como apresentada na Figura 1.

No problema em questão deseja-se minimizar o consumo de energia (gás consumido) nas estações de compressão. Em vista das considerações feitas, minimizar este consumo implica em minimizar a potência requerida pelas estações de compressão, uma vez que é possível relacionar a vazão de gás consumida por um compressor com sua potência (Equação 5), logo a função a ser minimizada será dada pela Equação 6.

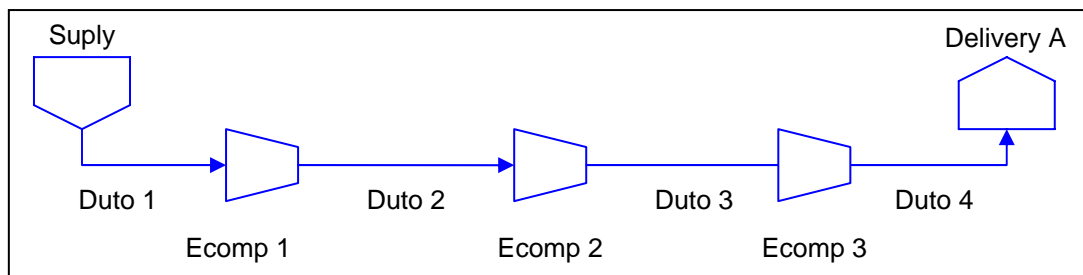


Figura 1. Fluxograma da configuração estudada.

$$f = \sum_{i=1}^N Pot(i) \quad (6)$$

onde N é o número de estações de compressão. Substituindo as Equações 1 e 4 em 6 tem-se:

$$f = \sum_{i=1}^N Q(i) \left[A(i) \left(\frac{P_{dis}(i)}{P_{suc}(i)} \right)^\sigma - 1 \right] \quad (7)$$

Onde $Q(i)$ é a vazão na sucção do compressor i . Porém, a Equação 1 pode ser reescrita como:

$$P_{in}^2 - P_{out}^2 = k_2 Q^2 \quad (8)$$

Onde

$$k_2 = 0.015744 \cdot \frac{p_b \cdot SG \cdot T \cdot Z_m \cdot f \cdot L}{T_b^2 \cdot d^5} \quad (9)$$

Assim, a perda de pressão num duto entre dois compressores i e $i+1$, implica que P_{in} é a pressão de descarga do compressor i e P_{out} é a pressão de sucção do compressor $i+1$. Desta forma, a Equação 7 pode ser reescrita como:

$$f = \sum_{i=1}^N Q(i) \left[A(i) \left(\frac{P_{dis}(i)}{P_{dis}(i-1) - k_2 Q(i)} \right)^\sigma - 1 \right] \quad (10)$$

Nesta formulação, a função objetivo é função somente das pressões de descarga, isto é, $f=f(P_{dis}(1), P_{dis}(2), \dots, P_{dis}(N))$. Para complementar a formulação deve-se determinar se existem condições de restrição e se as variáveis tem limites. De forma geral, um gasoduto opera com um limite de pressão inferior definido por questões de economicidade e por um limite superior definido por questões de segurança e projeto. Porém, estas condições valem para todos os trechos do gasoduto. Normalmente, as pressões mínimas poderão ocorrer na sucção dos compressores e no último ponto de entrega e as pressões máximas ocorrerão na descarga. Assim, tem-se:

$$\begin{aligned} P_{dis}(i) - P_{suc}(i-1) &\geq P_{\min} \\ \text{ou} \\ (P_{dis}(i))^2 - k_i Q(i) &\geq P_{\min}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

As Equações 11 estabelecem os limites e as restrições do problema, fechando a formulação. De acordo com o sistema analisado, outras restrições podem ser formuladas e acrescentadas ao modelo de otimização. Como exemplo, pode-se trabalhar com uma restrição em relação a uma taxa de compressão máxima para os compressores ou com a manutenção do inventário de gás no sistema.

3. Programação

3.1 Cálculo do Estado Estacionário

A rotina de otimização de gasodutos (ROG) foi desenvolvida em ambiente MATLAB e é composta por uma série de funções (M-files). A programação foi dividida em três etapas: inserção de dados, cálculo do regime permanente e otimização. A Figura 2 ilustra a estrutura do programa.

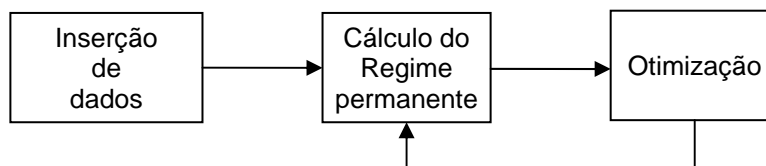


Figura 2. Estrutura do programa ROG

A rotina de otimização é iniciada com a leitura de uma base de dados em formato Excel pré-definido pelo usuário. Esta base de dados contém todas as informações do gasoduto necessárias à rotina de otimização, sendo dividido em duas planilhas, a primeira (Perfil) destinada às informações dos dutos, e a segunda (Elementos) destinada às informações dos diversos elementos existentes.

Partindo das vazões nos pontos de entrega, calculam-se as vazões em todos os demais trechos do gasoduto, inclusive nos fornecedores. Sabendo a pressão do fornecedor e tendo calculado sua vazão, a rotina caminha sobre o gasoduto a partir do fornecedor, verificando que tipo de estrutura existe à seguir (ponto de entrega, compressores, divisão, duto ou controladora). Para cada estrutura, existe uma sub-rotina de cálculo. Essa sub-rotina determina a pressão à jusante da estrutura na qual ela se encontra baseada na vazão e na pressão à montante. A equação utilizada no cálculo da pressão de jusante é a Equação 1. No entanto, esta equação utiliza valores médios de z e T , além de ser função do fator de atrito f . Como essas variáveis são função da própria pressão de jusante que se deseja calcular, é necessária a utilização de um processo iterativo. Optou-se por utilizar um procedimento de iteração “externo”, de modo que em cada iteração, todas as pressões do gasoduto são calculadas. Ao final de cada iteração, atualizam-se as vazões considerando agora o gás consumido nas estações de compressão e comparam-se as pressões e as potências das

estações com os resultados da iteração anterior. Caso ainda não haja convergência, reinicia-se o processo com uma nova vazão no fornecedor, já considerando o novo consumo das estações. O fluxograma da Figura 3 mostra como o regime permanente é determinado.

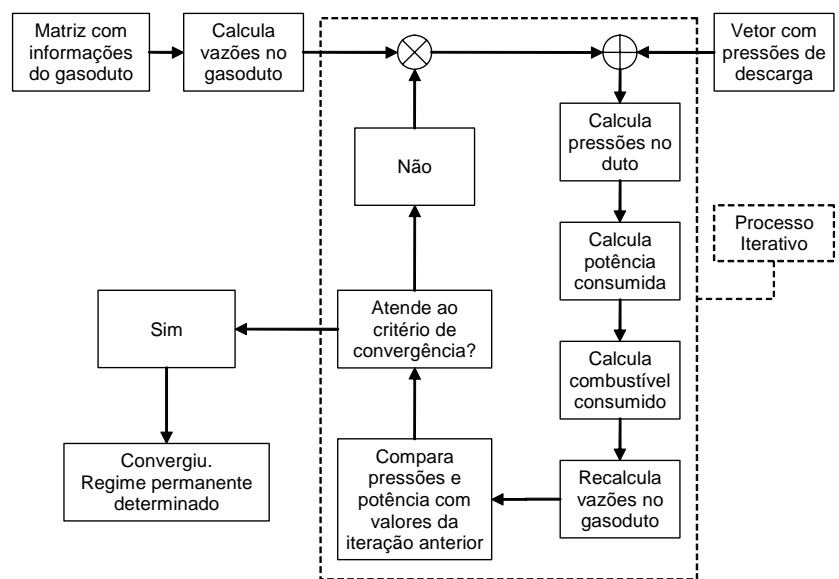


Figura 3. Processo Iterativo para determinar o regime permanente

3.1 Otimização

A otimização visa determinar as pressões de descarga das estações de compressão do gasoduto que forneçam a menor potência total consumida, ou seja, trata-se de um problema de minimização. O problema pode ser definido da seguinte forma: seja uma função *Potência* que retorna um valor real e cuja variável de entrada é um vetor com pressões de descarga P_{dis} , ou seja, $Potência = Potência(P_{dis})$. A otimização retorna um novo vetor com pressões de descarga P_{dis}^* tal que $Potência(P_{dis}^*)$ seja mínimo.

A Equação 3 calcula o consumo em uma estação de compressão dado um valor de *head* e de vazão mássica. O valor de *head*, no entanto, é função das pressões de sucção e descarga da estação de compressão. Além disso, nos casos com mais de uma estação de compressão, as pressões nas sucções são função das pressões de descarga das estações a montante. Sendo assim, pode-se afirmar que o consumo total no gasoduto é igual ao somatório dos consumos em cada compressor, sendo, portanto função das pressões de descarga de todas as estações de compressão do sistema, como apresentado na Equação 6.

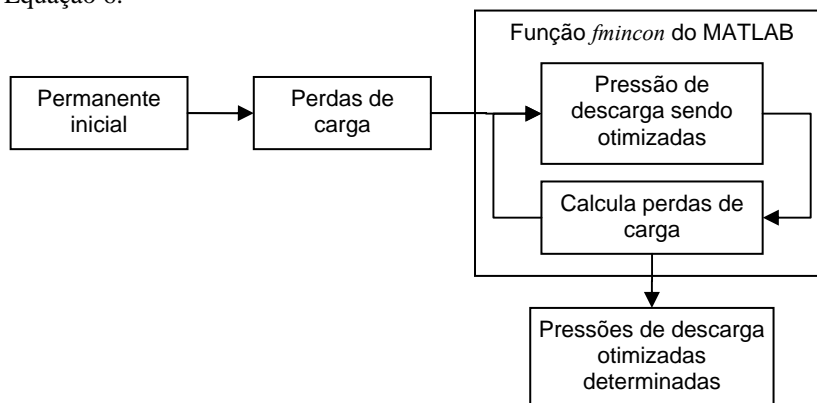


Figura 4. Processo de otimização

O MATLAB fornece um pacote com funções de otimização pré-definidas, de forma que não foi necessário desenvolver um algoritmo de otimização. Ao invés disso, utilizou-se a função *fmincon* do MATLAB. Esta função calcula o valor mínimo de uma dada função submetida a um conjunto de restrições. O algoritmo utilizado é baseado na técnica de programação seqüencial quadrática. A otimização parte de um regime permanente calculado a partir de condições iniciais. Como a técnica de otimização é um processo iterativo, a cada novo conjunto de pressões de descarga calculado, é necessário recalculer este novo estado estacionário, isto é, recalculer as perdas de carga e as pressões de sucção de cada estação de compressão. Deve-se ressaltar, que para cada nova situação, as vazões em cada trecho do duto mudam devido à mudança da potência e, conseqüentemente, da vazão de gás consumido. Como conseqüência,

optou-se por corrigir as perdas de carga dentro da própria função *fmincon*. Assim, o vetor de pressões de descarga calculado pela função já está correto, eliminando a necessidade de um outro *loop* externo. A Figura 4 mostra como a otimização está implementada.

Este método aumenta o número de iterações internas da função *fmincon*, no entanto o resultado final já está otimizado com o perfil de pressão e vazões corretos. As restrições são usadas por dois motivos: atender limites operacionais (limitar vazões, pressões, taxa de compressão, potência, etc) e para garantir que o resultado obtido pela otimização seja fisicamente admissível. Elas são inseridas na forma de um vetor de inequações o qual pode possuir quantas restrições forem necessárias.

3 Resultados

Wong e Larson (1968) determinaram, em estado estacionário, a condição ótima de operação de um gasoduto longo trabalhando com dez compressores em série e com vazões diferentes em cada trecho entre compressores. O problema formulado apresenta uma simplificação ao considerar a perda de carga constante e conhecida em cada trecho de duto. As equações foram preparadas para utilizar a técnica de programação dinâmica de forma a achar uma condição ótima para as pressões de sucção e descarga. Assim, o que se pretende neste caso é comparar os resultados de otimização através de duas técnicas diferentes: a técnica de programação seqüencial quadrática, do trabalho atual, com a técnica de programação dinâmica apresentada na referência em questão. Observa-se uma concordância muito boa entre as duas técnicas de otimização, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação de técnicas de otimização

Estação	ROG		Larson e Wong		Erro %	
	P.suc (psi)	P.desc (psi)	P.suc (psi)	P.desc (psi)	P.suc	P.desc
1	500	800	500	800	0,0	0,0
2	595,71	953,14	595,7	1000	0,0	4,7
3	763,65	1000	821,39	1000	7,0	0,0
4	588,94	765,62	588,93	765,61	0,0	0,0
5	526,28	842,04	526,26	842,03	0,0	0,0
6	631,04	952,05	631,02	950	0,0	-0,2
7	755,76	900	753,17	900	-0,3	0,0
8	697,49	1000	697,49	1000	0,0	0,0
9	811,05	1000	811,05	1000	0,0	0,0
10	598,87	767,29	598,86	767,3	0,0	0,0

Para um caso onde a perda de carga é função da solução de otimização considerou o Gasoduto Bolívia-Brasil – GASBOL – no trecho Corumbá-Replan. Neste trecho, para uma vazão de gás passando em Corumbá de $21,878 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ considerou-se cinco estações de compressão atuando: Miranda, Campo Grande, Três Lagoas, Penápolis e São Carlos. A condição inicial estabelece uma pressão de descarga de 98, 95, 98, 100 e 98 kgf/cm^2 absolutos, respectivamente. Para efeito de validação desenvolveu-se um modelo deste duto no software comercial Pipeline Studio (TGNET), da Energy Solutions. A potência total calculada pelo TGNET, utilizando compressores ideais é de 36MW e a potência calculada pela rotina atual é de 38,1MW. A diferença verificada é devido ao modelo do TGNET utilizar uma equação diferente para o cálculo do fator de compressibilidade (z) do gás. Os valores de pressão de descarga otimizados para as cinco estações de compressão, não variando a pressão na REPLAN, foram de 100,2; 100,9; 98,2; 100,9 e $98,0 \text{ kgf/cm}^2$ (Figura 5), sendo a potência total consumida de 35,8MW. Caso fosse estipulada uma pressão mínima na REPLAN de 86 kgf/cm^2 , a solução otimizada produz uma pressão de descarga no último compressor que leva a pressão na REPLAN para este valor, que é a solução ótima, como apresentado na Figura 6. As pressões de descarga otimizadas são 100,2; 100,9; 98,2; 100,9 e $95,3 \text{ kgf/cm}^2$, sendo a potência total consumida 35,3MW, proporcionando uma redução de 2,8MW ou de 7%, em relação a situação inicial.

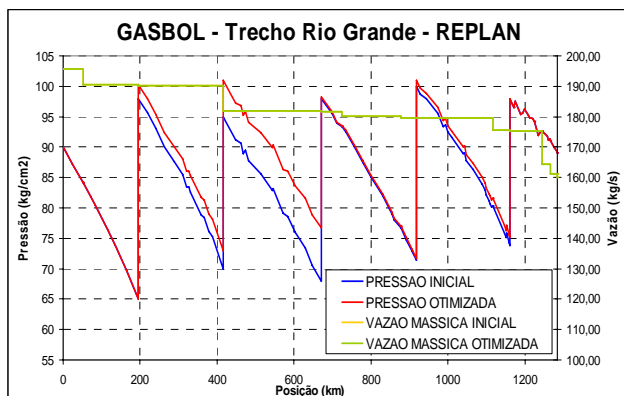


Figura 5. GASBOL otimizado com mesma pressão na REPLAN

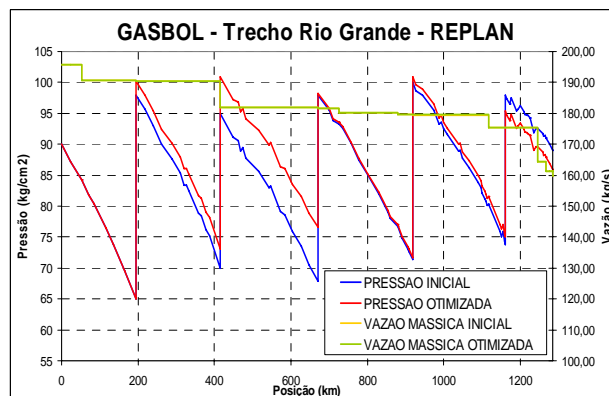


Figura 6. GASBOL otimizado com limite mínimo de 86kgf/cm² na REPLAN

4. Conclusão

Desenvolveu-se uma rotina de otimização de operação de gasoduto, visando minimizar o consumo das estações de compressão. Esta rotina utiliza soluções a partir de planilhas eletrônicas e de pacotes de otimização já existentes no software MATLAB. Tendo em vista os resultados apresentados, pode-se concluir que a rotina de otimização desenvolvida até o momento apresenta resultados coerentes e válidos. Na fase atual de implementação, a rotina já permite utilizar os mapas dos compressores reais e as vazões de consumo nas estações de compressão, o que permite sua utilização prática no planejamento de operações de médio e longo prazo, onde os cenários são avaliados, basicamente, a partir de condições em estado estacionário. No entanto, ainda é necessário que tal rotina seja aprimorada, de forma a ser capaz de prever um espectro maior de variáveis. A implementação de escoamentos não isotérmicos e dos limites operacionais dos compressores (máxima potência e fenômenos de “surge” e “stone wall”), assim como a possibilidade de se tratar escoamentos transientes são passos a serem dados em busca do refinamento da rotina.

8. Referências

- BOTROS K. K., SENNHAUSER D., JUNGOWSKI K. J., POISSANT G., GOLSHAN H., STOFFREGEN J. “Multi-objective Optimization of Large Pipeline Networks Using Genetic Algorithm”, *Internationa Pipeline Conference*, , Calgary, Canada, 2004
- CARTER R.G., “Pipeline optimization: Dynamic programming after 30 years”. In *Proceedings of the 30th PSIG Annual Meeting*, Denver, October 1998.
- KELLING C., REITH K., SEKIRNJAK E., “A Pratical Approach to Transiente Optimization for Gas Networks”, *Pipeli Simulation Interest Group*, paper 0005, 2000
- KRISHNASWAMI, P., CHAPMAN, K.S., ABBASPOUR, M. – “Compressor Station Optimization for Linepack Maintenance”, *Pipeli Simulation Interest Group* 0410, 2004.
- KURZ, R., - “The Physics of Centrifugal Compressor Performance”, *Pipeli Simulation Interest Group*, 0408, 2004,
- MCCAIN, JR W.D., “*The Properties of Petroleum Fluids*”, Petroleum Publishing Company, Tulsa, 1973.
- MCDONALD, A.T. E FOX, R.T., - “*Introdução à Mecânica dos Fluidos*”, Ed. LTC, 2001.
- MORE J.J AND WRIGHT, S.J., “*Optimization Software Guide, Society for Industrial and Applied Mathematics*”, Philadelphia, 1993.
- Petrobrás, “<http://www2.petrobras.com.br/tecnologia/port/index.htm>”, capturado em 30/07/2006
- SCHROEDER, D.W.JR., - “A Tutorial on Pipe Flow Equations”, *Stoner Associates, Inc*, August 16, 2001.
- SEKIRNJAK E., “Practical Experiences with Various Optimization Techniques for Gas Transmission and Distribuion Systems”, *Pipeline Simulator Interest Group*, paper 9603, 1996
- WONG P.J. AND LARSON R. E., “Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-13(5):475– 481, 1968.
- WU S., RIOS-MERCADO R. Z., BOYD E. A., AND SCOTT L. R., “Model relaxations for the fuel costminimization of steady-state gas pipeline networks”. *Mathematical and Computer Modelling*, 31(2–3):197–220, 2000.