



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA PARA EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS

Wagner Emanuel Costa^{1*}, Elizabeth Ferreira Gouvea^{2*}, Marco César Goldberg^{3*}

* Departamento de Informática e Matemática Aplicada DIMAp
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário - Lagoa Nova
Natal RN - Brasil
59072-970

¹ wemano@digicom.br

² beth@dimap.ufrn.br

³ gold@dimap.ufrn.br

Resumo – O Brasil atravessa um cenário propício para o desenvolvimento do gás natural como parte da matriz energética. A grande responsabilidade de se projetar uma rede de distribuição do gás aumenta, à medida que novos investimentos são realizados. No entanto, as tecnologias de projeto auxiliado por computador dessas redes, foram pouco desenvolvidas devido à existência de malhas de gás nos EUA e em grande parte dos países da Europa, existem muito antes da computação, de forma que, muito pouco do potencial do computador foi explorado no tocante a criar malhas metropolitanas de gás. Este trabalho investiga o uso das técnicas de otimização combinatória e de diversas técnicas da computação evolucionária, para determinar opções de traçado para atingir novos pontos e realizar o dimensionamento dos tubos da rede de distribuição em expansão, considerando o atendimento da demanda exigida e visando minimizar os custos envolvidos na implantação da rede.

Palavras-Chave: projeto de redes; otimização combinatória; computação evolucionária.

Abstract – Brazil is in a excellent context for the development of natural gas as energy source. The responsibility of design a network to deliver gas increases with the new investments made every day. However the computer aided design (CAD) technologies for gas network design were poor developed because in EUA and Europe have their gas networks from long time ago, in such that only a little of the potential of computer had been explored for the gas network design. This work studies the use of combinatorial optimization technics and others technics from evolutionary computing to find layouts to create and expand a network and make the pipeline optimization looking for costs minimizations and respecting all demands of pressures and flow.

Keywords: network design; optimization combinatorial; evolutionary computing.

1. Introdução

Devido ao potencial brasileiro e a necessidade de energia sempre crescente, os investimentos na utilização do gás natural como parte da matriz energética se tornaram maiores, mas para a definição de um projeto para expansão da rede de atendimento de gás, é essencial possuir uma boa definição de um layout da rede; por quais ruas os dutos irão passar de forma a minimizar custos e alcançar os novos clientes desta rede, entretanto o layout somente não define completamente a expansão da rede. Uma vez que um layout tenha sido definido para a rede de distribuição de gás, deve-se então escolher que dutos farão parte da rede e realizar o dimensionamento dos tubos.

Então otimizar a expansão de uma Rede de Distribuição de Gás consiste em, dada uma rede de gás funcionando, definir o traçado dos tubos que ligará a rede aos novos clientes que demandam por gás, dentro de um certo horizonte de planejamento e com base no layout determinado dimensionar os dutos que farão parte da rede e suas características, de forma a otimizar uma função objetiva definida através de parâmetros econômicos. Portanto, as técnicas computacionais estudadas neste trabalho, recebem como entrada uma rede pré-existente e os novos pontos de demanda que devem ser atendidos por ela, fornece como saída o novo traçado e o dimensionamento dos dutos. A Figura 1 ilustra a entrada a ser fornecida e a saída que deve ser gerada.

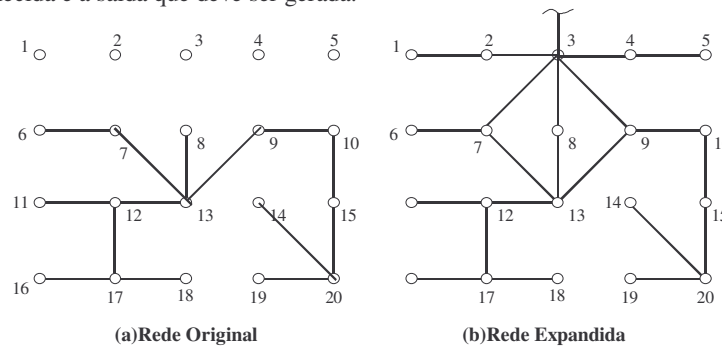


Figura 1: Entrada e saída do sistema computacional

Nas seções seguintes serão apresentadas a modelagem dos problemas associados, a descrição das técnicas a serem empregadas e os resultados esperados.

2. Modelagem

2.1. Problema de otimização do traçado

O problema de definição de traçado pode ser solucionado realizando uma seleção dos trechos por onde os dutos vão passar com base em um grafo associado ao mapa urbano da região por onde irá se efetuar a expansão, a figura 2 ilustra como se processa a passagem da distribuição em planta ou mapa – para o grafo de modelagem que será interpretado pelo sistema computacional, nela os pontos de demanda estão em verde. No desenho (a) da figura 2 observa-se um trecho do mapa com as locações dos pontos de demanda dentro das quadras de uma malha urbana. No desenho (b) inclui-se os nós de passagem no encontro de ruas. O desenho (c) mostra o traçado de todas as conexões que poderão ser utilizadas na rede de distribuição. O conjunto de todos os pontos associados ao conjunto de todas as conexões possíveis sobre o mapeamento da planta urbana dará origem ao grafo G . O desenho (d) mostra a introdução dos nós de passagem/conexão, indicando os possíveis pontos de entrega de gás aos pontos de demanda, gerando o grafo que é utilizado para modelar o problema. Logo, a equação 1 representa a função objetiva a ser utilizada.

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in M} (c_{ij} f_{ij} + b_{ij} x_{ij}) \quad (1)$$

onde:

$x_{ij} \equiv$ vale 1 se a aresta (i,j) fizer parte da solução. Vale 0 caso contrário.

$b_{ij} \equiv$ custo de instalação do tramo (i,j) da rede.

$b_{ij} = \beta_{ij} d_{ij}$, onde d_{ij} é a distância (em metros) entre os vértices i e j, e β_{ij} o custo unitário (por metro) de rede no tramo (i,j).

$c_{ij} \equiv$ custo de transporte de uma unidade de fluxo de gás através do tramo (i,j).

$c_{ij} = \gamma_{ij} d_{ij}$, onde d_{ij} é a distância (em metros) entre os vértices i e j, e γ_{ij} é o custo total por metro para transportar uma unidade de fluxo no tramo (i,j).

$f_{ij} \equiv$ fluxo de gás passando através do arco (i,j).

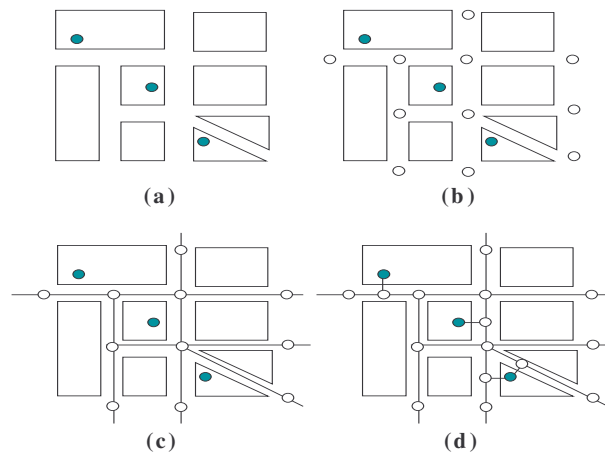


Figura 2: Formação do Grafo que modela o problema

A função objetivo está associada ao custo total de enviar fluxo através dos arcos. Mas, associada a função, o programa deve levar em consideração a conectividade da rede, ou seja, as restrições de pressão e vazão associada a cada ponto de demanda. Palmer(1994) utiliza um algoritmo genético para a construção do desenho de redes de telecomunicações, embora ele considere que nunca aparecerão construções em anel na rede sua abordagem pode ser adaptada, permitindo que abordagens heurísticas construam automaticamente o traçado de expansão da rede, enquanto elas estiverem associadas a operadores que mantenham as restrições citadas acima respeitadas. Entretanto, mesmo podendo definir um traçado de forma a diminuir os comprimentos dos tubos o custo total da expansão só pode ser avaliado por completo após a otimização das dimensões dos dutos, sendo necessário também nesta fase de traçado, para evitar caminhos muito longos de tubos e por consequência dutos de diâmetro mais elevados e custos.

2.2. Problema de otimização de dutos

O problema de encontrar a política ótima de atendimento da rede de demanda depende da formulação e análise de um enorme número de configurações e políticas viáveis (um problema combinatório NP-Árduo). O fator econômico, claramente tem um papel significativo na escolha da solução final. A seleção final da hipótese a adotar, está muitas vezes a cargo do projetista e não exclusivamente dependente dos resultados do dimensionamento. Considerando uma rede com p tubos, cada um podendo ser selecionado dentre q diâmetros possíveis, o espaço de busca contém q^p soluções. Como exemplo, considere uma rede com apenas 25 trechos de tubos, que possam ser escolhidos dentre seis diâmetros possíveis. Essa rede possui um espaço com $6^{25} \approx 3 \times 10^{19}$ soluções. Esse espaço de soluções, por sua vez, possui baixíssima densidade de redes válidas, isto é, somente um certo número dessas soluções, corresponde a redes que satisfazem as restrições impostas pelo projeto. Esse tipo de problema é conhecido como Problema de Otimização com Restrições. Para resolve-lo de forma ótima é necessário que, tendo satisfeito as restrições, a função objetivo seja levada ao seu valor ótimo (mínimo ou máximo, conforme o caso). Osaiadacz e Górecki (1995) apresentam alguns métodos existentes na literatura para resolver o problema do dimensionamento dos tubos de uma rede de distribuição de gás e classificam tais métodos em três grupos: heurísticos, contínuos e de otimização discreta. Eles chamam atenção para o fato de que, embora tais métodos tenham sido desenvolvidos por anos, não existe qualquer garantia de que eles produzam soluções ótimas sob o ponto de vista de qualquer critério existente para uma rede genérica.

A Computação Evolucionária é uma abordagem que tem sido aplicada a uma vasta gama de problemas de otimização com grande sucesso. Surry *et al.* (1995), entretanto, enfatizam o fato de que as abordagens evolucionárias mais comuns para problemas de otimização com restrições, devem ser enriquecidas com um maior feedback de informações que dêem condições ao algoritmo de busca, de tratar as restrições impostas pelo problema. Quando o problema possui restrições de natureza implícita, como é o caso do problema de otimização do dimensionamento de uma rede de gás, Surry *et al.* (1995) sugere que seja utilizada uma abordagem que considere uma função de penalidade, que considere as restrições na composição da função objetivo. A função objetivo sugerida por Surry *et al.* (1995) para o problema do dimensionamento de redes de distribuição de gás é:

$$\min \sum_{j=1}^n L_j(cD_j) + \alpha n_{gen}^{k1} (p_{proj} - p_{min})^{k2} + \beta n_{gen}^{k3} \sum_{j=1}^n (D_j - DM)^{k4} \quad (2)$$

onde o primeiro termo é o custo dos tubos em função do diâmetro, o segundo termo corresponde a restrição de pressão mínima e o terceiro termo corresponde a restrição dos tubos de upstream de forma que o máximo diâmetro de um tubo seja dado por DM . As restrições são ponderadas, segundo um esquema annealing, de acordo com o número de iterações ou de gerações do algoritmo, dado por n_{gen} . A fórmula envolve, ainda, mais seis parâmetros de controle, sendo eles:

- as constantes α e β selecionadas para normalizar os valores nominais das penalidades em relação a escala de custo utilizada

- os expoentes k_1 , k_2 , k_3 e k_4 selecionados de modo a fazer com que as penalidades sejam suficientemente grandes, quando uma rede não satisfaz as restrições correspondentes.

Pode-se observar, portanto, que a nova função objetivo considera um conjunto de critérios, a partir dos quais uma solução deve ser avaliada e não apenas um critério como anteriormente descrito. Esse tipo de problema de otimização é chamado de *multi-objetivo* ou *multi-critério*. No caso específico do problema em questão, as três funções que compõem a função objetivo se somam e devem ser minimizadas. Esse é um caso mais simples do Problema de Otimização Multi-critério, sendo equivalente a um Problema de Otimização com Restrições. No caso mais geral dos problemas de otimização multi-critério, entretanto, as funções que compõem a função objetivo podem competir entre si. Nesses casos, os métodos evolucionários procuram manter em sua população, as soluções que representem diferentes trade-offs. Essa idéia é estendida por Surry *et al.* (1994) na construção de um algoritmo genético para resolver o problema em questão. Eles aplicaram seu método a um problema real resolvido pela British Gas e encontraram uma solução que reduzia os custos em 4%.

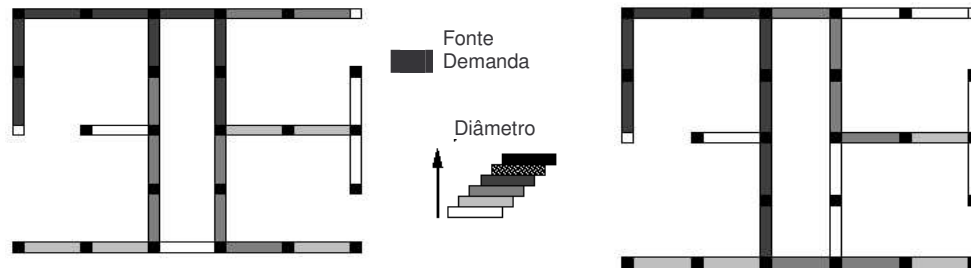


Figura 3: Esquema do problema real resolvido pela British Gás. A rede da direita possui um custo 4% menor e foi gerada a partir algoritmo genético

O presente trabalho visa o desenvolvimento de algoritmos transgenéticos e genéticos para a realização dos dimensionamentos dos tubos. Os algoritmos em desenvolvimento consideram que companhias brasileiras como a Companhia Potiguar de Gás, Potigás, trabalha basicamente com dutos de dois tipos de material, sendo eles:

- Tubos de Aço Carbono sem costura, API 5L GR B.
- Tubos de Polietileno (PEAD), PE 80, SDR 17,6.

Os tubos de Polietileno, pelas suas características e preço, são dos mais utilizados em redes de distribuição e serão preferencialmente adotados. As tabelas 1 e 2 resumem as especificações de cada tipo de tubo considerado.

Diâmetro Nominal (polegada)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Peso/Metro (Kg/m)	Rugosidade (polegada)	Espessura de Parede (mm)
1	33,4	24,3	3,23	0,02	4,55
2	60,3	52,5	5,43		3,91
3	88,9	77,92	11,29		5,49
4	114,3	102,26	16,07		6,02
5	141,3	127,26	21,07		6,52
6	168,3	155,6	25,36		6,35

Tabela 1. Especificação dos Dutos de Aço Carbono

Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Peso/Metro (Kg/m)	Rugosidade (mm)
63	63,6	55,8	0,695	0,01
90	90,6	90,6	1,402	
125	125,6	125,6	2,691	

Tabela 2. Especificação dos Dutos de PEAD

Utilizando a Equação Fundamental exibida em Schroeder (2001) e as equações de Colebrook e Weymouth, indicadas pela Potigás, para o cálculo da perda de carga nos dutos com fator de fricção de Serghides.

As variáveis de entrada para esses algoritmos, portanto, são:

- A arquitetura da rede – rede em árvore com uma única fonte com arquitetura fornecida pelo software, desenvolvido na primeira parte do projeto que determina quantos dutos compõem a rede.
- Pressão na entrada.

- Pressão mínima nos pontos de demanda da rede.
- Características dos dutos considerados na construção da rede.
- Características do gás natural.

Como resultado do processamento cada uma das implementações computacionais apresentará os diâmetros dos tubos que compõem a rede, segundo uma solução viável de menor custo possível. Estes resultados serão utilizados para determinar a performance das abordagens na qualidade das soluções encontradas e do tempo de processamento.

7. Agradecimentos

À ANP por meio do programa de recursos humanos da ANP PRH-22 informática e geologia no setor de petróleo e gás pelo apoio.

À INEP pelos incentivos a este projeto.

8. Referências

BOYD, E. A., SCOTT, L. R. E WU, S., *Evaluating the Quality of Pipeline Optimization Algorithms*, <http://www.psig.org/paper/1997/9709.pdf>. 1997.

BOYD, I. D., SURRY, P. D. E N. J. RADCLIFFE, *Constrained Gas Network Pipe Sizing with Genetic Algorithms*, EPPC-TR94-11, University of Edinburgh. <http://users.breathemail.net/njr/formaPapers.html>. 1994.

SURRY, P. D., RADCLIFFE, N. J. E BOYD, I. D., A Multi-objective Approach to Constrained Optimisation of Gas Supply Networks: The COMOGA Method, in *Evolutionary Computing: AISB Workshop*, T. Fogarty (Ed.), Springer-Verlag. 1995.

CARTER, R. G., *Pipeline Optimization: Dynamic Programming After 30 Years*, <http://www.psig.org/papers/1997/9803.pdf>. 1998.

CASTILLO, L. E A. GONZÁLEZ, Distributed Network Optimization: Finding the Most Economic Solution by Using Genetic Algorithms, *European Journal of Operational Research* 108(3), 527-537. 1998.

CASTILLO, L. E A. GONZÁLEZ, Fuzzy Optimization of Distribution Networks by using Genetic Algorithms, in *Genetic Algorithms and Soft Computing (Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol 8)*, F. Herrera, J. L. Verdegay (Eds), Springer-Verlag. 1996.

DEOLA, M., E J. C. BONNEL, Two Products for Network Calculation in Interactive Graphic Mode for the Size of Installations and for Computer-Aided Network Operation, *SPE Gas Technology Symposium*, Dallas, Texas, 13 a 15 de Junho, SPE17734, 303-310. 1988.

FERBER, P., BASU, U., GOODREAU, M E P. LINDEN, *Gas Pipeline Optimization*, <http://www.psig.org/papers/1997/9905.pdf>. 1999.

HANYANG, W. S., LEE, J., HUTH, D. E O. KWON, Optimization of Pipeline Network in Metropolitan Area, Korea, with Hybrid MCST-CD Networking Model, *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*, Kuala Lumpur, Malásia, 14 a 16 de Abril, SPE38101, 629-635. 1997.

HATAMIAN, H., Natural Gas Supply and Demand Problems, SPE38779, Society of Petroleum Engineers Inc., 311-320. 1997.

HOEVEN, T., Some Mathematical Aspects of Gas Network Simulation, <http://www.psig.org/papers/1987/9206.pdf>. 1992.

HOEVEN, T. E FOURNIER, T., Stead-State Modeling Based on (Piecewise) Linear Programming, <http://www.psig.org/papers/1987/9507.pdf> 1995.

KELLING, C., REITH, K. E E. SEKIRNJAK, A Practical Approach to Transient Optimization for Gas Network, <http://www.psig.org/papers/1997/0005.pdf>

LEE, E.-W., CHANG, S.-Y. E I.-W KIM, A Comparative Study of Statistical and Mathematical Methods for Natural Gas Pipeline Network Analysis, SPE50335, Society of Petroleum Engineers Inc. 1998.

MACEDO, R. Q. E BAANWART, A. C., Projeto, Simulação e Otimização de Dutos de Transporte e Distribuição de Gás, Relatório Final de Iniciação Científica, Bolsa PIBIC/CNPq – PRP, Unicamp, São Paulo. 2000.

MONTOYA, O. S. J., JOVEL, T. W. A., HERNÁNDEZ, R. J. A. E R. C. GONZÁLEZ, Genetic Algorithms Applied to the Optimum Design of Gas Transmission Networks, SPE59030, Society of Petroleum Engineers Inc., 1-7. 2000.

OSAIADACZ, A. J. E M. GÓRECKI, Optimization of Pipe Sizes for Distribution Gas Network Design, <http://www.psig.org/papers/1987/9511.pdf>. 1995.

PALMER, C. C., *An Approach To A Problem in Network Design Using Genetic Algorithm*. PhD thesis, Department of Computer Science, Polytechnic University, Germany. 1994.

SCHROEDER, D. W., A Tutorial on Pipe Flow Equations, <http://www.psig.org/papers/1997/0112.pdf>. 2001.