

DESPACHO DE UNIDADES TERMOELÉTRICAS CONSIDERANDO A REDE DE GÁS E A REDE ELÉTRICA

Lourival B. Castro *
Murilo L. Rodrigues *
Prof. Dr. Edimar J. de Oliveira **

RESUMO

Este artigo apresenta uma modelagem para o problema de Unit Commitment térmico incluindo as restrições de fluxo na rede elétrica e a disponibilidade de gás para a geração termoeletrica. O modelo proposto é formulado através de um problema de programação não linear onde inicialmente um problema de otimização linear é resolvido para determinar o sentido de fluxo de gás na rede. A formulação proposta para o problema não linear considera as restrições de pressão nos nós da rede bem como a priorização do gás para a indústria de base. Os resultados obtidos com a metodologia proposta evidenciam a forte influência dos limites da rede elétrica e da disponibilidade de gás no despacho das unidades termoeletricas.

Palavras-chave: Despacho termoeletrico, Disponibilidade de gás, Limite nas linhas de transmissão

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo mostrar o planejamento da operação de sistemas elétricos de potência em estudos de curtíssimo prazo (planejamento horário), incluindo a rede de distribuição de gás natural no planejamento.

A distribuição do gás é realizada por gasodutos em uma rede interligada de 'nós', que podem ser: as próprias fontes, as usinas termoeletricas ou a indústria (onde há uma demanda), entradas e saídas de reservatórios, ou apenas lugares de passagem de gás, que são interligações entre dois ou mais gasodutos distintos.

O foco deste problema consiste na modelagem da rede de distribuição de gás natural como esta rede de gás se comporta quando acoplada ao sistema de geração e transmissão de energia elétrica. Para tanto, foi implementado um modelo computacional para encontrar o menor custo global e foram realizados estudos em um sistema teste.

* Bolsistas PROBIC/FAPEMIG/UFJF

** Professor Orientador da Faculdade de Engenharia - UFJF

Endereço Profissional do Professor Orientador:

Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Cidade Universitária, Bairro Martelos, CEP 36036-330, Juiz de Fora, MG, Brasil. Email: edimar.oliveira@uff.edu.br

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de despacho de unidades térmicas, considerando a rede de energia elétrica e a rede de gás, é resolvido para uma demanda variável durante 24 horas. Este problema de otimização pode ser formulado como:

$$\text{Mín } \sum_{t=1}^{nH} \{ \sum_{i=1}^{nT} ct_i vt_i^t + \sum_{i=1}^{nF} cf_i gf_i^t + \sum_{i=1}^{nR} cr_i go_i^t + \sum_{i=1}^{nD} cd_i Pd_i^t \} \quad (1)$$

sa/

$$\sum_{i=1}^{nT(k)} \eta_i vt_i^t + \sum_{l=1}^{nL(k)} \gamma_{i-j(l)} \theta_{i-j(l)}^t = Dp_k^t$$

$$k = 1, \dots, nB; t = 1, \dots, nH; (i, j) \in l \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=1}^{nG(n)} g_{k-m(i)}^t + \sum_{i=1}^{nF(n)} gf_i^t + \sum_{i=1}^{nR(n)} go_i^t = \sum_{i=1}^{nT(n)} vt_i^t + \sum_{i=1}^{nR(n)} gi_i^t + Dg_n^t$$

$$n = 1, \dots, nN; t = 1, \dots, nH \quad (1.2)$$

$$V_r^t = V_r^{t-1} + gi_r^t - go_r^t$$

$$r = 1, \dots, nR; t = 1, \dots, nH \quad (1.3)$$

$$nt(on)_i^t \geq mtu_i; nt(off)_i^t \geq mtd_i$$

$$i = 1, \dots, nT; t = 1, \dots, nH \quad (1.4)$$

$$\text{sinal}(g_{k-m(i)}^t) \cdot (g_{k-m(i)}^t)^2 = (C_i)^2 [(p_k^t)^2 - (p_m^t)^2]$$

$$\text{sinal}(g_{k-m(i)}^t) \cdot (g_{k-m(i)}^t)^2 \geq (C_i)^2 [(p_k^t)^2 - (p_m^t)^2]$$

$$i = 1, \dots, nG; t = 1, \dots, nH; (k, m) \in i \quad (1.5, 1.6)$$

$$X_{\text{mín}} \leq X \leq X_{\text{máx}} \quad (1.7)$$

A função objetivo deste problema, equação (1), consiste em minimizar o custo total de operação do sistema. Este custo é formado por quatro termos: (i) o primeiro termo representa o custo de operação das usinas térmicas; (ii) o segundo termo, o custo da retirada de gás das fontes de gás natural; (iii) o terceiro termo está relacionado ao custo de retirada de gás dos reservatórios de gás natural; e o último (iv) é referente ao custo do déficit pelo não atendimento à demanda. Pode-se observar que todos os

custos da função objetivo variam proporcionalmente com a demanda de energia elétrica, não havendo, portanto, a ocorrência de função multiobjetivo.

A restrição (1.1) é a equação referente ao modelo de fluxo DC de balanço de potência ativa em cada hora do período de operação. Nesta equação, a potência gerada por uma usina é igual a sua produtividade multiplicada pelo volume utilizado de gás natural ($\sum_{i=1}^{nT(k)} n_i v_i^t$)

A restrição (1.2) é a equação do balanço de gás natural em um nó da rede. Ou seja, a soma dos fluxos de gás que chegam ao nó pelos gasodutos ou por alguma fonte ou reservatório é igual ao volume de gás utilizado pela usina somado ao gás que vai para armazenamento (reservatório) ou para outra demanda.

A restrição (1.3) é a equação de balanço de volume de gás em um reservatório da rede. Ou seja, o volume de gás do reservatório em cada hora é igual ao volume inicial do reservatório, somado ao volume afluente, subtraído do volume fornecido para o sistema.

As inequações (1.4) representam as restrições dos tempos mínimos de parada e partida das usinas térmicas geradoras.

O conjunto de equações (1.5) e (1.6) são as restrições de fluxos de gás. Estas expressões são dependentes da pressão nos nós da rede de gás. Estas restrições dependem do tipo de duto que está sendo utilizado e podem ser basicamente de dois tipos:

A) DUTOS PASSIVOS

Para gasodutos sem compressores, a equação de fluxo de gás é:

$$\text{senal}(g_{k-m(i)}^t) \cdot (g_{k-m(i)}^t)^2 = (C_i)^2 [(p_k^t)^2 - (p_m^t)^2]$$

Onde a função *senal* ($g_{k-m(i)}^t$) é dada por:

$$\text{senal}(g_{k-m(i)}^t) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_{k-m(i)}^t = 0 \\ 1, & \text{se } g_{k-m(i)}^t > 0 \\ -1, & \text{se } g_{k-m(i)}^t < 0 \end{cases}$$

Senal ($g_{k-m(i)}^t$) representa o sentido do fluxo de gás nos gasodutos. Se ($g_{k-m(i)}^t$) > 0, o fluxo vai do nó *k* para o nó *m*. Se ($g_{k-m(i)}^t$) < 0, o fluxo - ($g_{k-m(i)}^t$) vai do nó *m* para o nó *k*.

B) DUTOS ATIVOS (COMPRESSORES)

Para gasodutos com compressores, utiliza-se uma inequação de fluxo para permitir o acréscimo de pressão no ponto onde é instalado o compressor.

$$\text{senal}(g_{k-m(i)}^t) \cdot (g_{k-m(i)}^t)^2 \geq (C_i)^2 [(p_k^t)^2 - (p_m^t)^2]$$

Em trechos com compressores o quadrado do fluxo de gás pode ser maior que o módulo da diferença dos quadrados das duas pressões multiplicado pelo quadrado da constante correspondente ao gasoduto. Isso acontece devido ao “*boost*” de pressão injetada pelos compressores neste tipo de gasoduto.

Finalmente, são consideradas no problema as restrições de limite das variáveis, equação (1.7), tais como volume máximo de fluxo de gás, limites de geração térmica, limites de fluxos nas linhas de transmissão e limites de pressão nos nós da rede. Destaca-se que este limite de pressão determina a quantidade máxima de gás que flui no duto e, portanto, o volume de gás que estará disponível para utilização.

O problema de otimização (1) é muito complexo e não pode ser resolvido facilmente devido as suas características de acoplamento temporal das decisões liga/desliga das unidades térmicas, bem como a interdependência da demanda elétrica com a disponibilidade de gás. Portanto, propõe-se no item seguinte um algoritmo passo a passo para a solução deste problema.

METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

O fluxograma da **fig. 1** mostra o algoritmo passo a passo proposto para solução do problema de despacho com rede de gás. Os passos necessários para obtenção do resultado final são apresentados a seguir.

1) SOLUÇÃO DO PROBLEMA LINEAR SIMPLIFICADO.

Este problema linear simplificado é obtido através do problema completo (1) desprezando-se as restrições (1.4), (1.5) e (1.6). Este resultado aproximado é necessário para definir o sentido do fluxo de gás nos dutos, ou seja, a partir desta solução obtém-se a “função sinal” que será usada na etapa não linear de solução.

2) SOLUÇÃO DO PROBLEMA NÃO LINEAR COMPLETO.

A partir dos sinais dos fluxos de gás obtidos no modelo linear, é realizada a simulação considerando também as equações e inequações não lineares correspondentes ao sistema de fluxo e pressão, restrições (1.5 e 1.6). Destaca-se que devido às restrições de pressão mínima e máxima nos nós, o resultado obtido é mais realista que o modelo linear, podendo apresentar déficit de gás devido à falta de pressão. Este aspecto justifica a utilização de compressores, principalmente em rede longas de abastecimento de gás.

Nesta etapa as restrições de tempo de parada e de partida das usinas termoeletricas ainda não são levadas em consideração.

3) AJUSTE DAS RESTRIÇÕES DE TEMPO DE PARADA E PARTIDA

Nesta fase são verificadas e corrigidas as possíveis violações das restrições dos tempos de parada e partida das termoeletricas. A partir do resultado obtido da resolução não linear do problema, identifica-se uma matriz com elementos binários (0 - usina desligada, 1 - usina ligada) arranjados de forma que as linhas da matriz representam o horário de operação (normalmente de 0 a 24 horas) e cada coluna da matriz fica associada a uma unidade geradora.

O algoritmo então “corrige” essa matriz, de modo que todas as restrições de tempo mínimo do sistema sejam satisfeitas. Com a nova matriz de geração, os limites de geração dos elementos alterados são remodelados, de modo que todas as usinas obedeçam às restrições na próxima iteração. O problema é então simulado novamente, desta vez, com o resultado adequado.

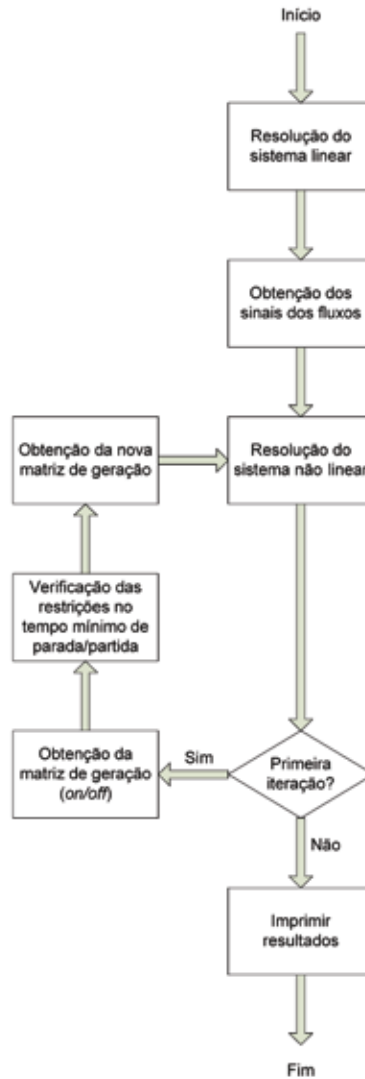


Figura 1 – Fluxograma de resolução do problema

Para considerar o custo relativo da utilização de compressores na rede de gás, além de simplificar o problema, foi sugerida a adição de mais uma variável no sistema, chamada BTR, representativa do *Booster* de pressão introduzido pelos compressores. Esta variável é inserida nas equações (1.5) e (1.6), de forma a tornar as duas restrições como uma única equação, veja a expressão (2):

$$\text{senal}(g_{k-m(i)}^t) \cdot (g_{k-m(i)}^t)^2 = BTR_i^t (C_i)^2 [(p_k^t)^2 - (p_m^t)^2] \quad (2)$$

Para dutos passivos, a variável BTR do duto é sempre igual a 1, o que torna a nova equação a própria restrição (1.5). Para dutos com compressores, a variável BTR pode ser maior ou igual a 1. Assim sendo, foi inserido um custo, na função objetivo, associado a esta variável a fim de simular o custo da utilização do compressor no sistema. Se o resultado da variável for 1, seu custo é nulo, já que demonstra a não utilização do compressor em tal duto.

CASO ESTUDADO

Para a avaliação da metodologia proposta será apresentado um estudo de caso estruturado na forma de um sistema de três barras, sendo uma de demanda energética e de gás e as demais de geração térmica. A rede de gás possui cinco nós, um reservatório, uma fonte equatro gasodutos, sendo um com compressor (nó 1/ nó 3). Foram adicionadas também uma usina termoeletrica e uma fonte de gás necessárias para representar os déficits de energia e gás, respectivamente. O sistema integrado é disposto conforme a **fig. 2**.

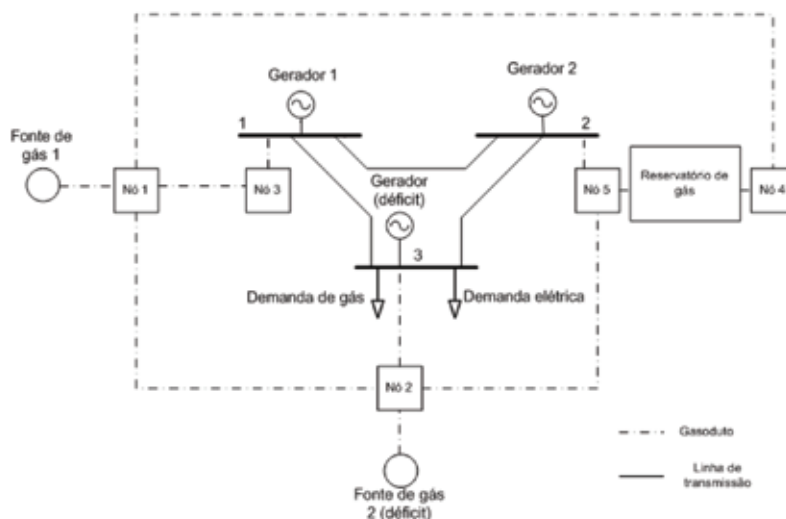


Figura 2 –Esquema do caso estudado

A demanda do sistema obedece a uma curva de carga típica, baseada na curva de carga da região Sudeste do país, **fig. 3**, em porcentagem de um máximo de 11 MW. Nas **tab. I a VI** são representados os dados do sistema.

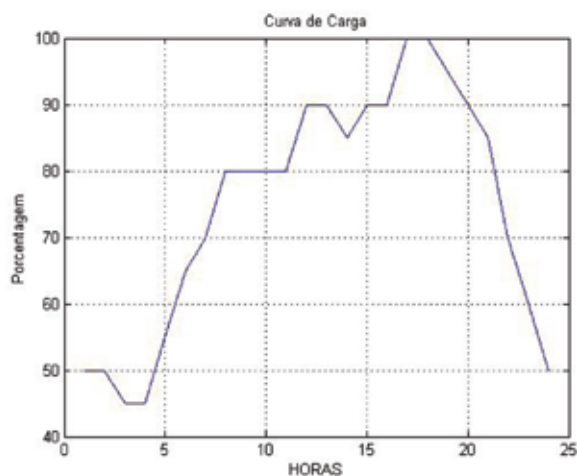


Figura 3 – Curva de demanda do sistema

Tabela I – Dados das unidades termoeletricas

Usina	Produtibilidade (MW/10 ⁴ m ³)	PGmáx (MW)	Tempo de parada (h)	Tempo de partida (h)	Custo (\$/10 ⁴ m ³)
1	0.6	10	3	4	100
2	0.6	10	3	4	500

Tabela II – Dados das linhas de transmissão

Linha	Fluxo mínimo (MW)	Fluxo máximo (MW)	Admitância (S)	Barra de saída	Barra de chegada
1	0	6	5.0	1	2
2	0	4	2.0	1	3
3	0	6	5.0	2	3

Tabela III – Dados das fontes de gás

Fonte de gás	Produção máxima (10 ⁴ m ³)	Produção mínima (10 ⁴ m ³)	Custo (\$/m ³)
1	50	0	0.01
2	200	0	10000

Tabela IV - Dados dos gasodutos

Gasoduto	Fluxo mínimo (10 ⁴ m ³)	Fluxo máximo (10 ⁴ m ³)	Constante (m ³ /BAR)	Nó de partida	Nó de chegada
1	0	40	1	1	2
2	0	18	1	1	3
3	0	18	1	1	4
4	0	15	1	2	5

Tabela V – Dados de pressão dos nós da rede

Nó	Pressão Mínima (BAR)	Pressão Máxima (BAR)
1	94.5	95
2	90	100
3	94.5	95
4	94.5	95
5	90	95

Tabela VI – Dados do reservatório de gás

Reservatório	Volume armazenado mínimo (10 ⁴ m ³)	Volume armazenado máximo (10 ⁴ m ³)	Entrada / retirada máxima de gás (10 ⁴ m ³)	Volume inicial (10 ⁴ m ³)	Custo de retirada (\$/m ³)
1	0	50	20	15	0.05

O resultado da geração, para o caso em que o gasoduto 2 possui compressor (BTR) e para o caso em que todos os gasodutos são passivos, é apresentado no gráfico da **fig. 4**.

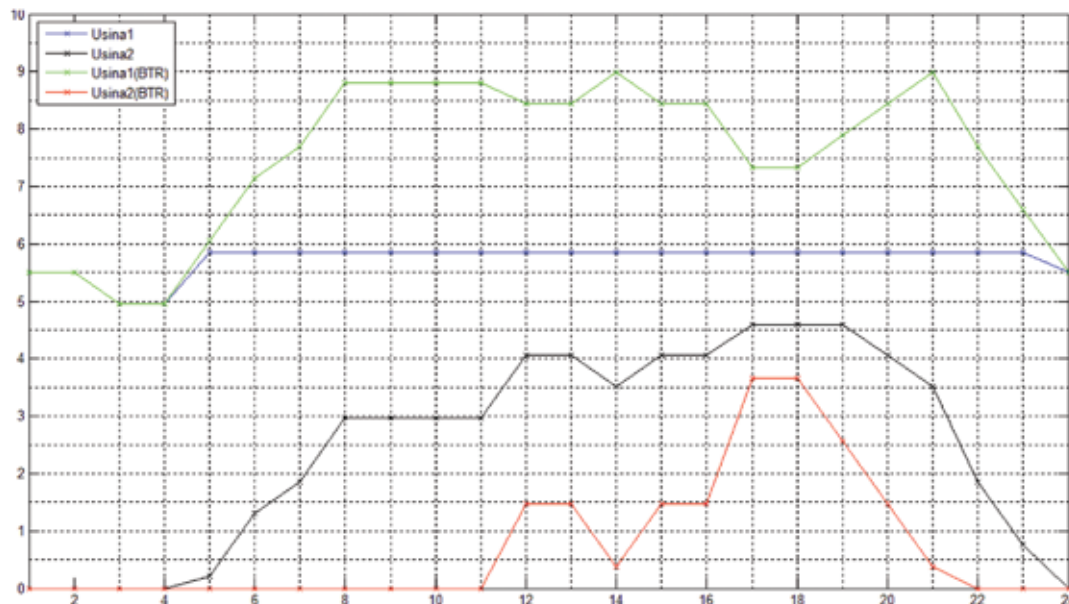


Figura 4 – Resultado da geração

Verifica-se que, quando não há compressor no gasoduto 2, a usina 2 é utilizada praticamente em todas as horas do período devido à impossibilidade de chegada de maior volume de gás à usina 1, que é 5 vezes mais barata do que a outra unidade geradora. Quando é adicionado o compressor ao gasoduto, a pressão não mais restringe o volume de gás que alimenta a usina 1, e por isso a térmica 2 passa a ser utilizada somente nas horas de maior carga, onde a térmica 1 não é capaz de suprir sozinha toda a demanda. Destaca-se que a redução de custo obtida pela melhor utilização da usina de menor custo foi suficiente para justificar o investimento no compressor.

CONCLUSÃO

Este artigo propôs um método de resolução do problema de fluxo de potência de modo a unir a rede de distribuição de gás natural com a rede de transmissão elétrica. Foram consideradas todas as equações e inequações não lineares decorrentes dos cálculos do fluxo de gás em gasodutos com ou sem compressores acoplados. Para inclusão do custo oriundo dos compressores foi adicionada uma nova variável ao problema. Outro ponto de destaque é a verificação de restrições dos tempos mínimos de parada e partida de usinas termelétricas. Estas foram analisadas e resolvidas por meio de um método algoritmo que se aproxima do já conhecido *unitcommitment*.

Com base nos resultados obtidos, é possível destacar alguns pontos importantes:

- A desconsideração da rede de gás em alguns casos pode levar a resultados equivocados, principalmente devido aos limites de fluxo de gás, que dependem da pressão nas saídas do gasoduto, quando este não possui um compressor acoplado.

- A utilização de compressores em gasodutos estratégicos nos sistemas de distribuição de gás pode ser uma saída econômica e produtiva, principalmente em momentos que seja necessário a partida de usinas termelétricas mais importantes.

- Reservatórios em locais de fácil distribuição para as usinas da rede podem ser essenciais em horários de pico e momentos com a demanda acima do normal, de modo a funcionarem como uma usina hidrelétrica em épocas de seca; no caso, em curtíssimo prazo.

THERMOELECTRIC UNITS DISPATCH CONSIDERING GAS AND ELECTRICAL NETWORKS

ABSTRACT

This article presents a model for the problem of Unit Commitment including power flow restrictions in the electrical network and the availability of natural gas for thermoelectric power generation. The proposed model is formulated using a nonlinear programming problem where initially a linear optimization problem is solved to determine the direction of gas flow in the network. The proposed formulation for the nonlinear problem considers the constraints of pressure in the gas network nodes as well as the prioritization of gas to the base industry. The results obtained with the proposed methodology show the strong influence of the boundaries of the electrical grid and the availability of gas in the dispatch of thermal units.

Key words: Thermoelectric dispatch, Gas availability, Transmission line limits

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE WOLF, D.; SMEERS, Y. The gas transmission problem solved by an extension of the Simplex algorithm, **Management Sciences**, 2000.

LIU, C.; SHAHIDEHPUR, M.; WANG, J. Application of augmented Lagrangian relaxation to coordinated scheduling of interdependent hydrothermal power and natural gas systems, **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2010.

MORAIS, M.S.; MARANGON, J.W.L. Combined natural gas and electricity network pricing, **Science Direct**, 2007.

UNSIHUAY, C.; MARANGON, J.W.L.; ZAMBRONI, A.C.S. Short-term operation planning of integrated and hydrothermal and natural gas systems, **IEEE PES Power Tech Conference**, 2007.