

UMA METODOLOGIA PARA EXPANSÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Leontina M.V.G.Pinto

COPPE - Programa de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária - Ilha do Fundão
21944 - Rio de Janeiro - RJ

Mário V.F.Pereira

Sergio Granville

CEPEL-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
Cidade Universitária - Ilha do Fundão
20001 - Rio de Janeiro - RJ

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo para a expansão automática de sistemas de transmissão de energia elétrica. O problema é modelado como um problema linear de programação mista. As variáveis inteiras correspondem às decisões de adição de novos circuitos e as variáveis reais correspondem aos fluxos de potência na rede de transmissão. A rede existente é representada através do fluxo de potência linearizado (modelo DC). A representação dos fluxos nas linhas adicionadas é feita através do modelo de transportes (obedecem apenas à primeira lei de Kirchoff). Exemplos numéricos com um sistema brasileiro são apresentados e discutidos.

Abstract

The objective of this paper is to present a model for the automatic expansion of electric transmission systems. The problem is modelled as a mixed integer programming problem where integer variables correspond to circuit addition decisions and real variables correspond to the power flow in the transmission network. The existing network is represented by a linearized power flow model (DC model), whereas the power flow in the new circuits is represented by a transportation model (only the first Kirchoff's law is enforced). Numerical examples with a Brazilian system are presented and discussed.

I. INTRODUÇÃO

O planejamento a longo prazo da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica visa estabelecer quando e onde deverão ser instalados os equipamentos necessários para um atendimento econômico e confiável da demanda prevista. Estes requisitos são conflitantes, uma vez que um melhor desempenho (maior confiabilidade) só pode ser obtido através de investimentos adicionais, o que implica em tarifas mais eleva-

das. O planejador deve, portanto, tentar encontrar o melhor compromisso entre diversas opções de custo/benefício, levando em consideração os recursos disponíveis.

Por um longo tempo as únicas ferramentas disponíveis nesta área foram os programas de análise, como fluxo de potência, estabilidade e curto-circuito. Toda a síntese era feita de forma manual pelo planejador (ver EPRI, 1980; Tinney, 1980). Entretanto, o crescimento das dimensões das redes tornou

esta tarefa cada vez mais difícil e levou ao desenvolvimento de sistemas interativos para a expansão de redes de transmissão (ver Granville e Pereira, 1985; Monticelli e outros, 1982; Pereira e Pinto, 1983; Said, França e Santos, 1985). Além das ferramentas tradicionais de análise, estes sistemas dispõem de critérios de ordenação capazes de auxiliar o planejador a identificar adições atraentes a partir de um número grande de alternativas. Estes critérios podem ser extraídos da análise de sensibilidade do sistema a variações nas capacidades de seus elementos. Isto permite identificar pontos de estrangulamento e ordenar as possíveis adições com base na melhoria que cada adição, ao ser incorporada, causaria ao desempenho do sistema.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo para a expansão automática de sistemas de transmissão de energia elétrica. O problema é modelado como um problema linear de programação mista, onde as variáveis inteiras correspondem às decisões da adição de novos circuitos e as variáveis reais correspondem aos fluxos de potência na rede de transmissão. O algoritmo utilizado na sua resolução foi o de Branch-and-Bound. A rede existente é representada através do fluxo de potência linearizado (modelo DC). A representação dos fluxos nas linhas adicionadas é feita através do modelo de transportes (obedecem apenas à primeira lei de Kirchoff).

II. O PROBLEMA DA EXPANSÃO ÓTIMA

O problema da expansão ótima de um sistema de transmissão pode ser escrito como:

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & z = f(x,y) \\ \text{s/a} & G(x,y) \leq 0 \\ & x \in X, y \in Y \end{array} \quad (1)$$

onde as variáveis x representam investimentos em capacidade de transmissão. As res-

trições nestes investimentos (cronogramas, restrições financeiras, etc.) são representadas genericamente pela condição $x \in X$.

Uma vez tomada decisão de investimento em capacidade de transmissão, os equipamentos são usados para suprir o mercado. As variáveis y representam os níveis de geração e fluxo nas linhas efetivamente utilizados para atender à demanda. As restrições nestas variáveis (leis de Kirchoff, limites geração e fluxo, etc.) são expressas genericamente pelas restrições $G(x,y) \leq 0$ e $y \in Y$. Observe-se que as variáveis de investimento x participam das equações de operação do sistema uma vez que elas definem os limites de capacidade dos equipamentos.

É importante observar que as variáveis x são discretas, já que não é possível adicionar parte de uma linha de transmissão ao sistema. Por outro lado as variáveis y são contínuas. Este é, portanto, um problema de programação mista (variáveis contínuas e discretas). As restrições $G(x,y) \leq 0$ dependerão naturalmente da modelagem da rede.

III. REPRESENTAÇÃO DA REDE

Conhecida a demanda a ser atendida, o cálculo do ponto de operação do sistema elétrico pode ser feito através de um dos seguintes modelos:

III.1. Modelo de Transportes

No modelo de transportes, apenas a primeira lei de Kirchoff (lei dos nós) é respeitada: a soma algébrica dos fluxos que chegam ou partem de um nó é igual à injeção líquida (geração menos carga) neste nó. Em termos matriciais,

$$S f + g = d \quad (2)$$

onde S é a matriz de incidência nó-ramo; f é o vetor de fluxos; g é o vetor de gerações e d é o vetor de demandas.

Existem ainda algumas restrições operativas na rede elétrica correspondentes a limites nos fluxos das linhas e nas capacidades dos geradores:

$$|f| \leq \bar{f} \quad (3)$$

$$\underline{g} \leq g \leq \bar{g} \quad (4)$$

onde \bar{f} é o vetor de limites de transporte das linhas e \underline{g} e \bar{g} são vetores de capacidades mínimas e máximas de geração.

III.2. Modelo de Fluxo de Potência Linearizado

Neste modelo, os fluxos de potência ativa obedecem às duas leis de Kirchoff: a lei dos nós, como o modelo anterior, e a lei das malhas, expressa como

$$f_k = (\theta_i - \theta_j) \cdot \gamma_k = \psi_k \cdot \gamma_k, \quad (5)$$

onde f_k é o fluxo na linha k , que liga as barras i - j , θ_i é o ângulo de tensão na barra i , $\psi_k = \theta_i - \theta_j$ é a abertura angular sobre a linha k e γ_k é a susceptância da linha k .

Note-se que os fluxos nas linhas e as gerações nas barras estão sujeitos aos limites operativos dados pelas equações (3) e (4).

Pode-se observar que o modelo de transportes é uma simplificação do modelo de fluxo de potência linearizado, onde a lei das malhas (equação (5)) foi relaxada. Embora de fácil resolução, através de eficientes técnicas e algoritmos já tradicionais (ver Ford e Fulkerson, 1962; Kennington e Helgason, 1980) a precisão deste modelo só é em geral considerada boa para sistemas radiais. O modelo fica impreciso à

medida em que o sistema fica mais malhado. Por outro lado, estudos com o sistema brasileiro mostraram que os erros percentuais na utilização do modelo de fluxo de potência linearizado para estimação dos fluxos de potência ativa são pequenos para sistemas de alta tensão, notadamente nas linhas mais carregadas—justamente as de maior interesse na análise de sobrecarga (ver Parker, Tanabe e Schilling, 1980). A solução do sistema linear (obtenção dos fatores triangulares) é feita por técnicas que preservam a esparsidade do sistema e permitem uma grande economia em termos de memória e esforço computacional (ver Stott e Marinho, 1979).

Note-se que nenhum dos dois modelos considera a fluxo de potência reativa. Para isso, seria necessário representar a rede através do fluxo de potência completo.

IV. O MODELO PROPOSTO PARA A EXPANSÃO ÓTIMA

A função objetivo $z=f(x,y)$ do problema da expansão ótima (1) pode ser decomposta em duas partes:

$$z = c_x \cdot x + c_g \cdot g \quad (6)$$

onde c_x e c_g são, respectivamente, os vetores de custos dos novos investimentos x e das gerações g .

IV.1- Representação pelo Modelo de Transportes

Se a rede elétrica for representada pelo modelo de transportes, o problema (1) pode ser escrito como:

$$\text{Min } c_x \cdot x + c_g \cdot g \quad (7)$$

$$s/a \quad Sf + g = d$$

$$\underline{g} \leq g \leq \bar{g}$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k, k \in \{\text{linhas existentes na configuração inicial}\}$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k \cdot x_k, k \in \{\text{possíveis adições ao sistema}\}$$

$$x \in X$$

O problema de expansão ótima corresponderá assim a um problema, de programação linear mista, onde x_k é a variável discreta que representa o número de linhas adicionadas no caminho k (0, 1, 2 ...)

IV.2. Representação pelo Modelo de Fluxo de Carga Linearizado

Caso a representação escolhida para a rede elétrica seja o modelo de fluxo de potência linearizado, o problema (1) pode ser escrito como:

$$\text{Min } c_x \cdot x + c_g \cdot g \quad (8)$$

$$\text{s/a } Sf + g = d$$

$$g \leq g \leq \bar{g}$$

$$f_k = Y_k \Psi_k, k \in \{\text{linhas existentes na configuração original}\}$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k,$$

$$f_k = Y_k \Psi_k x_k, k \in \{\text{possíveis adições ao sistema}\}$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k \cdot x_k,$$

Este problema corresponde a um problema de programação não linear mista.

A representação mais precisa da rede elétrica leva portanto a um problema substancialmente mais complexo que a representação simplificada. A resolução do problema (8) pode implicar em tempos de execução muito elevados (ou mesmo proibitivos) para sistemas elétricos de grande porte.

IV.3. O Modelo Híbrido

Pode-se observar que a não linearidade do problema (8) está associada às equações

$$f_k = Y_k \Psi_k x_k \quad (9)$$

correspondentes à 2ª lei de Kirchoff aplicada aos fluxos nas linhas a serem adicionadas. Isto sugere um terceiro modelo, onde os fluxos nas linhas existentes na configuração original obedecem às duas leis de Kirchoff e os fluxos nas linhas adicionadas respeitam apenas a primeira lei de Kirchoff (lei dos nós):

$$\text{Min } c_x \cdot x + c_g \cdot g \quad (10)$$

$$\text{s/a } Sf + g = d$$

$$g \leq g \leq \bar{g}$$

$$f_k = Y_k \Psi_k, k \in \{\text{linhas da configuração original}\}$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k$$

$$|f_k| \leq \bar{f}_k x_k, k \in \{\text{possíveis adições}\}$$

Este modelo corresponde a uma versão relaxada do modelo completo (8), onde as restrições (9), lei das malhas para os fluxos nas possíveis adições, são abandonadas. Esta formulação é mais precisa do que a do modelo simplificado, já que os fluxos nas linhas pertencentes à configuração inicial obedecem às duas leis. Pode-se ainda observar que somente o cálculo dos fluxos nas linhas realmente adicionadas estará impreciso: o fluxo nas adições não incorporadas ao sistema será nulo. Note-se ainda que este é um problema linear de programação mista, de resolução bem mais rápida e simples do que o modelo (8).

V. ALGORITMO PARA A EXPANSÃO ÓTIMA UTILIZANDO O MODELO HÍBRIDO

1) Cálculo das linhas a serem adicionadas. Resolve-se o problema (10), obtendo-se assim um plano de expansão.

2) Utiliza-se o fluxo de potência linearizado (2) a (5) para detectar possíveis sobrecargas (violação da restrição 3). Note-se que isto pode ocorrer, já que na expansão anterior a 2ª lei de Kirchoff foi relaxada nos novos circuitos.

3) Se não há sobrecargas (ou elas são desprezíveis), o processo termina. Caso contrário, as novas adições são incorporadas ao sistema original e volta-se à etapa 1.

VI. CASO EXEMPLO

O algoritmo proposto na seção V será utilizado para a expansão do sistema de transmissão da região sul brasileira, com as cargas e injeções previstas para o ano de 1990. A configuração inicial, ilustrada na Figura 1, corresponde à rede existente no ano de 1984, reduzida para 97 linhas e 46 barras. As linhas sólidas correspondem aos circuitos existentes, enquanto que as tracejadas correspondem às alternativas de expansão. A duplicação de um circuito existente também é considerada uma alternativa de expansão.

A Figura 2 apresenta a rede sintetizada através do modelo híbrido apresentado na seção IV. Partiu-se, então para a análise de viabilidade desta configuração, testando-se a factibilidade das restrições relaxadas pelo modelo. Os fluxos nas linhas do sistema planejado foram calculados pelo modelo de fluxo de potência linearizado, e foram detectadas algumas sobrecargas localizadas (ver Figura 2). Pode-se observar que estas sobrecargas encontram-se nas novas

linhas adicionadas pelo modelo ou a elas conectadas.

Os novos circuitos foram então incorporados ao sistema original. Utilizamos novamente o modelo híbrido e a nova rede sintetizada é ilustrada na Figura 3. Após uma nova análise de viabilidade, pode-se observar que foi detectada apenas pequena sobrecarga indicada na Figura 3.

A nova rede sintetizada foi considerada adequada. Note-se que, posteriormente, serão ainda adicionados novos circuitos para reforços da rede para que esta seja capaz de resistir às possíveis situações de contingências no sistema. Estes novos circuitos deverão ser capazes de eliminar totalmente as pequenas sobrecargas remanescentes. A Figura 4 apresenta a síntese a partir da mesma rede realizada por um programa interativo de expansão de redes (ver Monticelli e outros, 1984). Este programa começa agora a ser utilizado no setor elétrico e seus resultados são considerados bastante satisfatórios. Pode-se ver que, embora o programa tenha feito uma síntese que não leva a nenhuma sobrecarga, seu custo foi aproximadamente 40% mais elevado.

VII. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para a síntese de redes de transmissão de energia elétrica baseada na aplicação iterativa de um modelo que representa todas as restrições do fluxo de potência linearizado para as linhas pertencentes à configuração original e as restrições de um modelo de transportes para as linhas a serem adicionadas. A metodologia foi aplicada ao sistema sul brasileiro e a rede sintetizada foi significativamente mais barata que a obtida por métodos interativos.

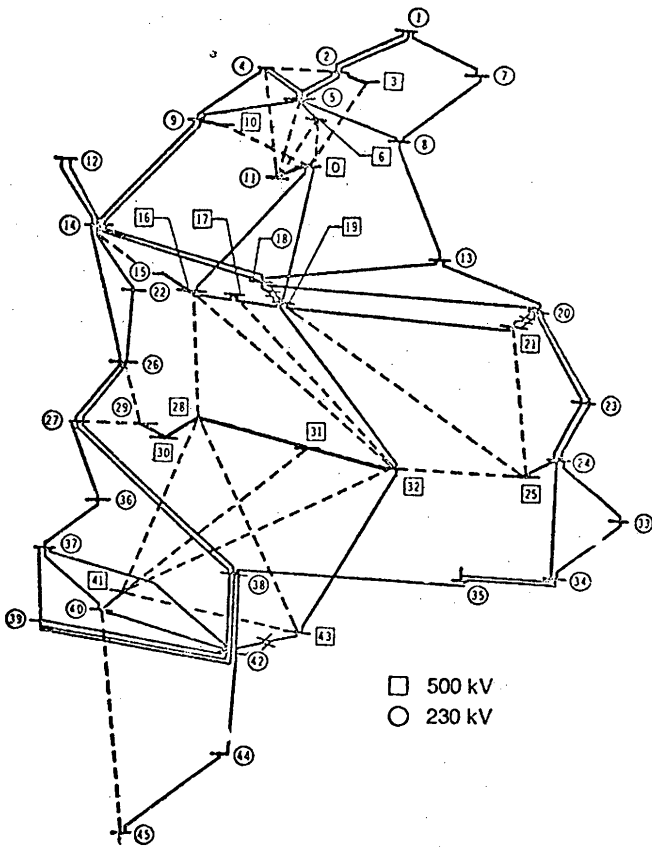


Fig. 1 - Rede Básica

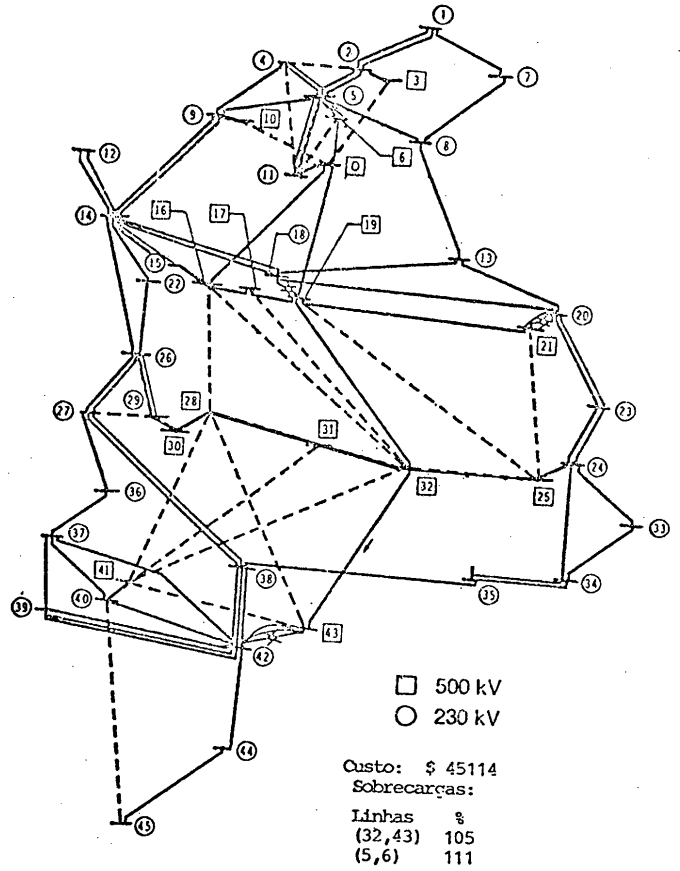


Fig. 3 - Modelo Híbrido
2ª Expansão

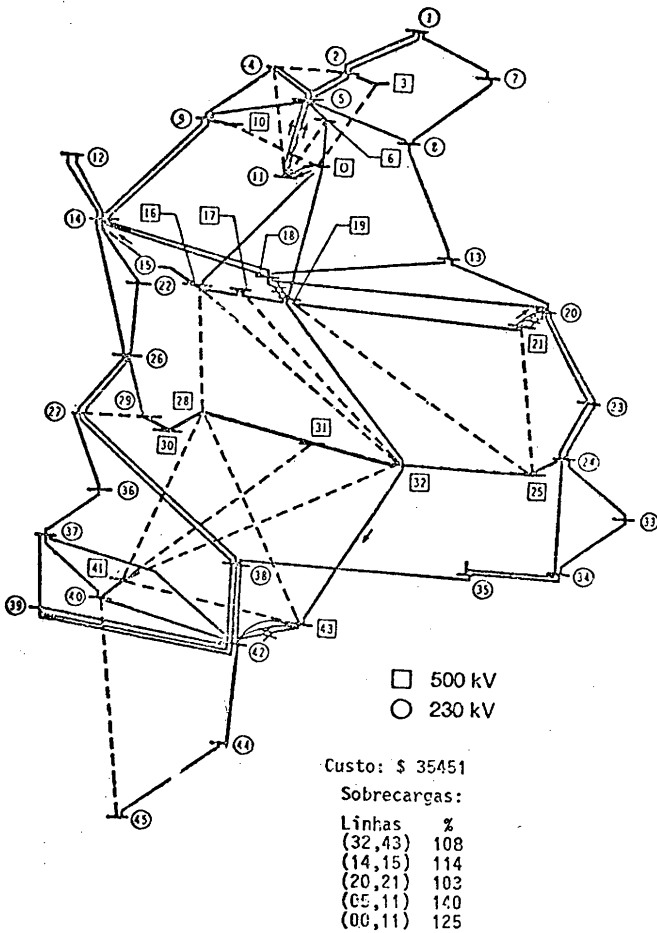


Fig. 2 - Modelo Híbrido
1ª Expansão

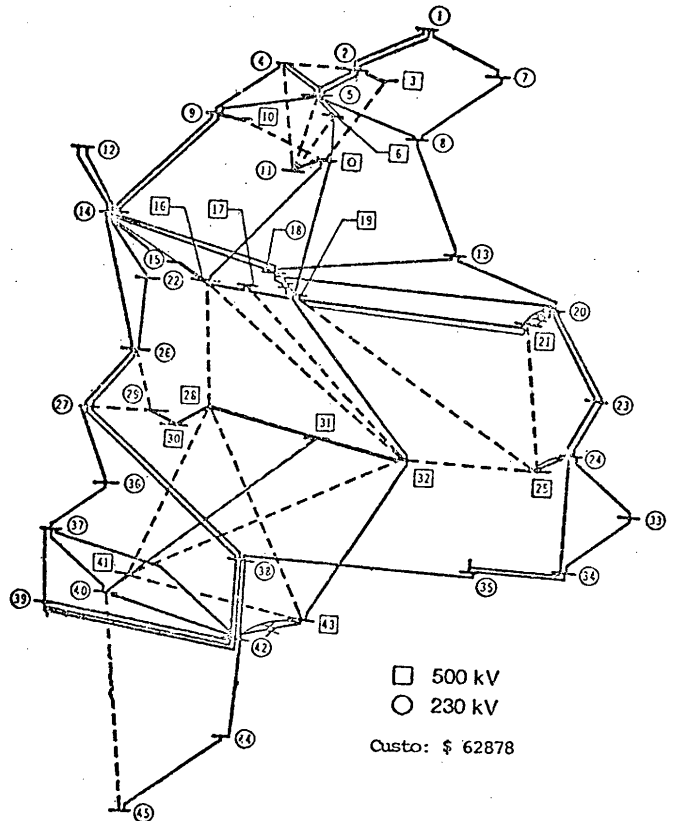


Fig. 4 - Solução do Programa
Interativo

VIII. REFERÊNCIAS

- EPRI, (1980). Long-Range Transmission Expansion Models, elaborado por EBASCO Services, EPRI Report EL-1569.
- Ford, L.R. & Fulkerson, D.R., (1962). Flows in Network, Princeton University Press.
- Granville, S. & Pereira, M.V.F., (1985) "Analysis of the Linearized Power Flow Model in Benders Decomposition", Technical Report SOL 85-04, Systems Optimization Laboratory, Dept. of Operations Research, Stanford University.
- Kennington, J.L. & Helgason, R.V., (1980). Algorithms for Network Programming. John Wiley & Sons.
- Monticelli, A. & Garcia, A. & Santos, A.J. & Pereira, M.V.F. & Da Cunha, S.H.F. & De Oliveira, G.C., (1984). Planejamento Interativo de Redes de Transmissão Considerando Contingências: O Sistema SINTRA VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília.
- Monticelli, A & Santos, A. & Pereira, M.V.F. & Cunha, S.H.F. & Panther, B.T. & Praça, J.C.G., (1982) "Interactive Transmission Network Planning Using a Least Effort Criterion", IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-101, nº 10.
- Pereira, M.V.F. & Pinto, L.M.V.G., (1983) "Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning", Artigo 84 M593-0, IEEE/PES 1984 Summer Meeting, vol. PAS-102, No. 11: 3611-3618.
- Parker, B.J. & Tanabe, D.R. & Schilling, M.T., (1980) "Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Brasileiro". NI-DEST-18/80.
- Said, A. & França, P.M. & Santos, A. Jr., (1985) "An Efficient Optimization Method for Transmission Expansion Planning". IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro.
- Stott, B & and Marinho, J.L. (1979) "Linear Programming for Power System Network Security Applications", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-91.
- Tinney, W.F., (1980). "Mathematical Challenges in Power System Planning", in Electric Power System Problems: The Mathematical Challenge, Proceedings of a SIAM Conference, Philadelphia.