

MODIFICAÇÃO NO ALGORITMO DE GARVER PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO-TEP

ISABELA M. MENDONÇA^{1,2}

¹ Departamento de Energia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil

² Departamento de Tecnologia, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IFSUDESTE-MG), Juiz de Fora, MG

Rua Bernardo Mascarenhas, 1283 - Bairro Fábrica - Telefone: (32) 4009-3001
36080-001 - JUIZ DE FORA - MG

E-mails: isabela.mendonca@engenharia.ufjf.br

I. C. S. JUNIOR¹, B. H. DIAS¹ E A. L. M. MARCATO¹

¹ Departamento de Energia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil

E-mails: ivo.junior@ufjf.edu.br, bruno.dias@ufjf.edu.br e
andre.marcato@ufjf.edu.br

Abstract— This study presents a tool to solve the problem of static expansion planning of electric power transmission systems. To this end, the proposed methodology first uses a constructive heuristic algorithm based in an indice founded on the idea Garver, in which the expansion decisions are relaxed and represented through the hyperbolic tangent function. By considering different slopes of the hyperbolic tangent function, within a predetermined range, associated with the main sensitivity indice existing in the literature, it is possible to feasible solutions. The electric power transmission network is represented by a linearized load flow, direct current model. The final expansion plans obtained by the proposed methodology were satisfactory, showing that the use of the hyperbolic tangent function added to the adopted heuristics yielded an effective decision strategy.

Keywords— planning, expansion, optimization, transmission, energy.

Resumo— Este trabalho apresenta uma ferramenta para resolução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, a metodologia proposta faz uso, de um algoritmo heurístico construtivo baseado em um índice fundado na ideia de Garver, no qual as decisões de expansão são relaxadas e representadas através da função tangente hiperbólica. A consideração de diferentes inclinações da função tangente hiperbólica, dentro de um intervalo previamente determinado, associadas ao índice de sensibilidade é possível extrair soluções factíveis. A rede de transmissão de energia elétrica é representada por um modelo linearizado de fluxo de carga, corrente contínua. Os planos finais de expansão obtidos pela metodologia proposta foram satisfatórios, mostrando que a utilização da função tangente hiperbólica agregada à heurística adotada resultaram em uma estratégia eficiente de decisão.

Palavras-chave— planejamento, expansão, otimização, transmissão, energia.

1 Introdução

O planejamento da expansão da transmissão (PET) é um problema clássico de sistemas de energia elétrica, e tem por finalidade encontrar o plano ótimo de expansão, ou seja, o PET consiste em determinar, entre um conjunto pré-definido de circuitos candidatos à expansão (linhas de transmissão e/ou transformadores), aqueles que devem ser construídos de forma a minimizar os custos de operação (déficit) e de investimentos no sistema de transmissão de energia elétrica, suprimindo a demanda prevista para um hori-

zonte de planejamento já definido. Este é um problema de otimização de difícil solução e que apresenta algumas particularidades, tais como: (i) região de solução multimodal; (ii) explosão combinatória referente às alternativas de investimento, resultando em um elevado esforço computacional; (iii) a possibilidade da existência de sistemas elétricos não conexos (ilhados). Estas particularidades ilustram as principais dificuldades na elaboração de algoritmos rápidos, eficientes e robustos para a resolução do problema estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Na literatura técnica podem-se distinguir, basicamente, três grandes grupos de algoritmos emprega-

dos na resolução do problema aqui em questão: (i) Algoritmos Heurísticos Construtivos: são robustos e apresentam pouco esforço computacional, porém raramente encontram a solução ótima global, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte (Gaver, L. L., 1970), (Monticelli, A., et al, 1982), (Villanasa, R., et al, 1985) e (Rider, M. J, 2006); (ii) Algoritmos de Otimização Clássica: usam técnicas de decomposição matemática e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistemas de pequeno e médio porte. Para sistemas de maior porte podem apresentar problemas de esforço computacional e, em alguns casos, de convergência (Binato, S. 2000), (Rider, M. J., et al, 2008) e (Dehghan, H. , et al, 2010); (iii) Metaheurísticas: Utilizam combinação de escolhas inicialmente aleatórias e, posteriormente, fazem uso com conhecimento histórico dos resultados adquiridos para se guiarem e realizar suas buscas em vizinhanças dentro da região de solução. Entretanto, apesar do tempo de processamento, nos últimos anos, a utilização de metaheurísticas (Carmona, M, 2009), (Fuerte-Ledezma, L. F., et al, 2013) e (Arora, S., et al, 2013) tem ganhado força com o desenvolvimento de novas técnicas e o aprimoramento das já existentes.

Este artigo propõe a utilização de um algoritmo heurístico construtivo com finalidade de encontrar o plano final de expansão do sistema de transmissão de energia elétrica em estudo, sendo este um problema determinístico (Khorasani, M., et al, 2013), (Gomes, P. V., et al, 2015) e (Zeinaddini-Maymand, M., et al, 2011).

2 Formulação e Metodologia

O problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica é formulado como um problema de otimização não linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a seleção, dentre todas as linhas candidatas à expansão, as linhas que minimizam o custo de investimento na transmissão e um conjunto de restrições sistêmicas que devem ser satisfeitas.

A seguir, serão apresentadas a função objetivo (FOB) e as restrições que fazem parte da formulação proposta. Representando por E o conjunto das linhas existentes na topologia base de um sistema, C o conjunto das linhas candidatas à expansão e por F o conjunto das linhas fictícias, o problema de planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão é formulado como:

$$\text{Min} \sum_{m=1}^{nr} c_m \cdot r_m + \sum_{l \in \Omega_c} c_l \cdot PE_l \quad (1)$$

s.a

$$g_i + r_i - \sum_{j \in \Omega_i} f_{ij} = d_i \quad (2)$$

$$|f_l| \leq \bar{f}_l \quad \forall(l) \in E, C \quad (3)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (4)$$

$$0 \leq r \leq \bar{r} \quad (5)$$

$$0 \leq PE_l \leq 1 \quad \forall(l) \in C \quad (6)$$

$$f_l = \gamma_l \theta_l \quad \forall(l) \in E \quad (7)$$

$$f_l = \gamma_{l_{FIC}} \varphi_l \quad \forall(l) \in F \quad (8)$$

$$f_l = PE_l \gamma_l \theta_l \quad \forall(l) \in C \quad (9)$$

$$\varphi_l >> \frac{\bar{f}_l}{\gamma_l} \quad \forall(l) \in F \quad (10)$$

$$\gamma_{l_{FIC}} << \gamma_l \quad \forall(l) \in F \quad (11)$$

onde:

nr é o número de geradores fictícios;

c_m é o custo do déficit de energia (US\$/MW-ano);

c_l é o custo da construção da linha candidata l (US\$/ano);

g_i é a geração da unidade geradora na barra i (MW);

$\bar{g}_i$ é o limite máximo de geração na barra i (MW);

r_i é a geração da unidade geradora fictícia na barra i (MW);

$\bar{r}_i$ é o limite máximo da geração fictícia na barra i (MW);

Ω_i é o conjunto de barras conectadas à barras i ;

Ω_c é o conjunto de linhas de transmissão candidatas;

PE_l é o parâmetro de expansão da linha candidata l , variável inteira 0/1;

f_l é o fluxo de potência ativa da linha l (MW);

$\bar{f}_l$ é o limite de fluxo de potência ativa da linha l (MW);

γ_l é a susceptância da linha l ;

d_i é a demanda na barra i (MW);

φ_l é a diferença angular entre as barras da linha fictícia l ;

θ_l é a diferença angular entre as barras da linha l ;

$\gamma_{l_{FIC}}$ é a susceptância da linha fictícia l .

2.1 Índice de Sensibilidade

A decisão de construir ou não determinadas linhas é representada pelo parâmetro de expansão, onde o valor nulo deste parâmetro significa a não construção da determinada linha e o valor unitário indicaria a construção. Assim, o parâmetro de expansão corresponde a uma variável discreta no problema de planejamento. Entretanto, de modo a evitar as dificuldades peculiares da resolução de problemas de programação inteira, foi adotado em (Oliveira E. J., et al, 2005) a mesma heurística proposta inicialmente

por Garver (Gaver, L. L., 1970), isto  , permite-se ao parâmetro de expansão assumir valores contínuos dentro do intervalo [0,1]. Assim, o problema que originalmente   de programac o inteira passa a ser um problema de programac o contínuo. Os valores contínuos assumidos pelo parâmetro de expansão são inaceitáveis a princípio como propostas de expansão, porém podem ser indicativos interessantes na procura de boas propostas discretas. Destaca-se que os resultados da heurística proposta por Garver apresentam, ainda hoje, grande utilidade no desenvolvimento/auxílio de algoritmos mais complexos.

No algoritmo heurístico construtivo proposto neste artigo (AHCP), baseado em (Oliveira E. J., et al, 2005) utilizou-se a fun o tangente hiperbólica modificada Equac o (12) para representa o da PE, onde a constante A inserida varia dentro de um intervalo e com passo previamente definido, vide Figura 1.

$$PE = \frac{e^{x/A} - 1}{e^{x/A} + 1} \quad p/ x \geq 0 \quad (12)$$

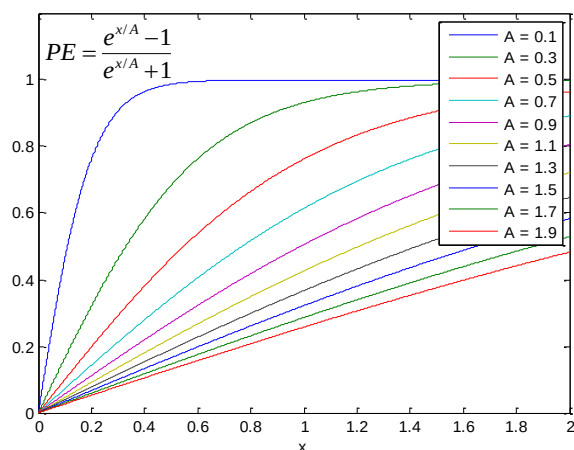


Figura 1 -Varia es da Fun o Tangente Hiperbólica.

A medida que o valor de A cresce, a inclina o da curva   alterada. Atr vés deste comportamento   possível executar o algoritmo heurístico construtivo para diferentes sensibilidade da PE. Ou seja, variando-se os valores de A   possível obtermos um conjunto de solu es, o qual tem o objetivo de direcionar a busca do processo de otimiza o multimodal para regiões que possibilitem a obten o de solu es de boa qualidade. O algoritmo heurístico construtivo proposto   dividido em duas etapas: (i) etapa contínuo; (ii) etapa discreta. A etapa contínuo tem como objetivo a obten o dos valores contínuos dos parâmetros de expansão (PE), para cada valor de A adotado, de todas as linhas candidatas   expansão. Com estes valores obtidos, o próximo passo consiste em definir entre as linhas candidatas   expansão, quais devem ser construídas, etapa discreta. Para fazer esta defini o, a metodologia proposta faz uso de um de  ndice de sensibilidade, Equac o (13).

A heurística de decisão adotada foi empregada inicialmente por Garver (Gaver, L. L., 1970) em 1970, o  ndice   baseado na linha candidata   expan-

são que transportar o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa, Equac o (9), será a linha que deve ser construída ou adicionada   topologia corrente Equac o (13), IS^{ga} . A observa o experimental de que o valor do fluxo de potência ativa   um bom critério de decisão,   puramente empírica, não havendo justificativa matemática.

$$IS^{ga} = PE_l \gamma_l \theta_l \quad \forall (l) \in C \quad (13)$$

Para tanto dentre todas as linhas candidatas, a que tiver o maior  ndice   a linha que deve ser inserida/construída na topologia corrente, $PE=1$.

Na etapa discreta   imposto ao parâmetro de expansão da linha selecionada   constru o, pela etapa contínuo, o valor unitário, $PE=1$, e aos demais parâmetros das linhas candidatas não selecionados, valores nulos, $PE=0$. Assim, com os valores discretos dos parâmetros de expansão definidos   verificado se o sistema elétrico, com as expansões realizadas, está operando adequadamente. Portanto, se o sistema estiver operando com o valor de corte de carga menor que uma tolerância (ε), 1 MW, considera-se o plano de expansão viável para o sistema de transmissão e o processo termina. Caso contrário, volta-se para a etapa contínuo a procura da próxima linha candidata a ser adicionada   topologia corrente. Destaca-se que o processo de resolu o inicia-se pela etapa discreta originalmente, com todos os parâmetros de expansão nulos, isto  , $PE=0$. Assim,   verificada a opera o do sistema elétrico com a topologia base, e os resultados obtidos são utilizados para inicializar o problema de planejamento (etapa contínuo). O fluxograma da heurística proposta   apresentado na Figura 2.

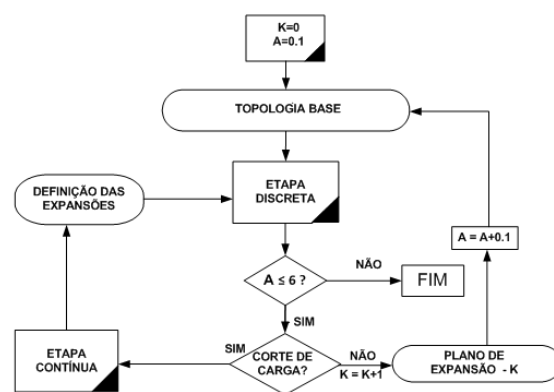


Figura 2-Fluxograma do Algoritmo Heurístico Proposto- AHCP.

Como se trata de um problema de otimiza o não convexo, com vários pontos de mínimos, o ponto de partida do processo de otimiza o tem grande influência na forma como a soluço final (linhas construídas) vai ser obtida e na qualidade (custo de investimento) desta soluço. Sendo assim, a metodologia proposta faz uso da heurística construtiva, Figura 3, partindo de diferentes inclina es da fun o PE, ou seja, de diversos pontos de partidas para que seja possível a resolu o do PET. O termo A varia de 0.1

a 2 com o passo de 0.1, ou seja, têm-se 20 variações (inclinações) diferentes para a função que modela o parâmetro de expansão, isto é, a metodologia proposta varre uma vasta região passando por diferentes pontos de partida e consequentemente aumentando as chances de sucesso.

3 Estudo de Casos

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela metodologia em análise para o problema referente ao planejamento estático da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Para tanto, serão analisados um sistema acadêmico proposto por Garver e um sistema real, equivalente da região sul do Brasil.

3.1 Sistema Garver

Este sistema, proposto inicialmente por Garver (Gaver, L. L., 1970), é bastante conhecido na literatura sendo formado por 6 barras, 6 circuitos existentes na topologia base, 15 caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista para o horizonte de planejamento de 760 MW.

O sistema proposto por Garver, apesar de ser de pequeno porte, já ilustra as principais dificuldades encontradas na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão, pois é um sistema não conexo, Figura 3, e apresenta, para este caso, um número total de 4^{15} combinações possíveis de investimento no sistema de transmissão, ilustrando o problema referente à explosão combinatória das alternativas de investimento.

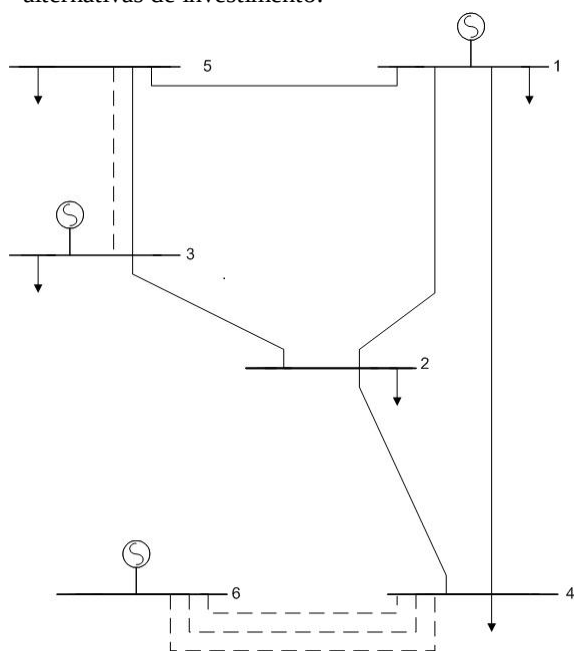


Figura 3- Configuração Final para o Sistema de Garver com Redespacho.

Para ilustrar os resultados obtidos pela metodologia proposta serão feitas duas análises em relação ao sistema de Garver. Na primeira análise será permi-

tido o redespacho das unidades geradoras e no segundo caso as unidades geradoras terão os despachos pré-determinados. O plano final de expansão obtido pelo AHCP é apresentado Tabela 1.

Tabela 1. Sistema Gaver com e sem Redespacho.

Índice de Sensibilidade - <i>SI</i>	Garver_CR - US\$	Garver_SR- US\$
Garver	130	200
Garver Modificado	110	200

O algoritmo heurístico construtivo utilizando o índice de Garver (Rider, M. J, 2006), obteve um custo superior para o planejamento comparado ao encontrado pela metodologia aqui proposta.

3.2 Sistema Sul

Este sistema real, formado originalmente por 46 barras, das quais 11 barras estão isoladas, 66 circuitos existentes na topologia base, 79 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 6880 MW. Este sistema foi proposto inicialmente em (Monticelli, A., et al, 1982), e vem sendo muito utilizado para validar os resultados de novos métodos para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Para o sistema aqui em análise serão consideradas novamente duas situações, onde na primeira análise será permitido o redespacho das unidades geradoras e na segunda, as unidades geradoras terão os despachos de potência pré-determinados. Para este caso tem-se um número total de combinações possíveis de investimento $3^{79}=5.10^{37}$, demonstrando a dificuldade da obtenção do ponto de mínimo global. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pela metodologia proposta neste trabalho.

Tabela 2. Sistema Sul com e sem Redespacho.

Índice de Sensibilidade - <i>SI</i>	Sul_CR- US\$	Sul_SR- US\$
Garver	102820000	183560000
Garver Modificado	70289000	154420000

Novamente, o AHCP foi mais eficiente que o algoritmo heurístico construtivo utilizando o índice de Garver (Rider, M. J, 2006), obtendo um custo inferior para o planejamento do sistema Sul.

A modificação no algoritmo de Garver (índice de sensibilidade modificado) associada a heurística construtiva adotada mostrou-se eficiente para a resolução do PET.

4 Conclusão

O algoritmo heurístico construtivo proposto apresentou um desempenho superior em relação ao

proposto originalmente por Garver, encontrando a solução ótima global de sistemas reais, como é o caso sistema equivalente da região sul do Brasil.

A utilização da função tangente hiperbólica agregada ao índice de sensibilidade adotado resultaram em uma estratégia eficiente de decisão, os resultados encontrados pela metodologia proposta correspondem a solução ótima global, difundida na literatura, para os sistemas aqui estudados. Desta forma, os resultados preliminares obtidos podem ser considerados promissores. Entretanto, destaca-se a necessidade da simulação de outros sistemas reais de grande porte como o sistema equivalente da região sudeste do Brasil e o sistema Colombiano.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, INERGE, IFSUDESTEMG, FAPEMIG e ao Grupo de Otimização Heurística e Bioinspirada (GOHB) de pesquisa da UFJF pelo suporte deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Arora, S. and Singh, S (2013) "A conceptual comparison of firefly algorithm, bat algorithm and cuckoo search," in 2013 International Conference on Control Computing Communication Materials (ICCCCM), pp. 1–4.
- Binato, S (2000) Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes. (2000) Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- Carmona, M.; Behnke, P., Moya, O (2009) "Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm", Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on, pp 1-7.
- Dehghan, S., Saboori, H., Kazemi, A., and Jadid, S (2010) "Transmission network expansion planning using a DEA-based benders decomposition," in 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 955–960.
- Fuerte-Ledezma, L.F, Gutierrez-Alcaraz, G. and Javadi, M. S (2013) "Static transmission expansion planning considering uncertainty in demand using BPSO," in North American Power Symposium (NAPS), 2013, 2013, pp. 1–6.
- Garver, L. L (1970) "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, Sep. 1970.
- Gomes, P. V. and Saraiva, J. T (2015) "Static transmission expansion planning using Heuristic and metaheuristic techniques," in PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, pp. 1–6.
- Khorasani, H., Pourakbari-Kasmaei, M., and Romero, R (2013) "Transmission expansion planning via a constructive heuristic algorithm in restructured electricity industry," in 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), pp. 1–6.
- Monticelli, A., Junior, A. S., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J., Praca, J. C. G (1982), "Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion", IEEE trans. on PS, Vol. 101, No 10, October, 1982, pp. 3919-3925.
- Oliveira, E. J., da Silva I. C., Pereira J. L., and Carneiro, S (2005) "Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1616– 1621, Aug. 2005.
- Rider, M (2006), "Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC – CA e Técnicas de Programação Não – Linear," Tese de Doutorado, Unicamp, Fev. 2006.
- Rider, M., Garcia, A. V., and Romero, R (2008) "Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 2, no. 1, pp. 90–99, Jan. 2008.
- Villasana, R., Garver, L. L., and Salon, S. J (1985) "Transmission Network Planning Using Linear Programming," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 2, pp. 349–356, Feb. 1985.
- Zeinaddini-Maymand, M., Rashidinejad, M., Mohammadian, M., Mahmoudabadi, A., Khorasani, H., and Rahmani, M (2011) "An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning," in PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, 2011, pp. 1–5.