

PLANEJAMENTO ESTÁTICO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO UM NOVO ÍNDICE DE SENSIBILIDADE

AUGUSTO C. L. OLIVEIRA¹

¹*Departamento de Tecnologia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG) – Campus Juiz de Fora
Rua Bernardo Mascarenhas, 1283, Bairro Fábrica, 36080-001, Juiz de Fora, MG, Brasil
E-mail: alaviola11@gmail.com*

ISABELA M. MENDONÇA¹, IVO C. S. JUNIOR², RODRIGO A. F. FERREIRA¹

²*Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Campus UFJF, Plataforma 5, 36036-330, Juiz de Fora, MG, Brasil
E-mails: isabela.mendonca@ifsudestemg.edu.br, ivo.junior@ufjf.edu.br,
rodrigo.ferreira@ifsudestemg.edu.br*

Abstract— This paper presents a new technique for solving the problem of planning the expansion of electric power transmission systems. Thus, a methodology based on the creation of a new sensibility index is proposed, based on the combination of two indices existing in the technical literature, which together with a constructive heuristic algorithm in which the expansion decisions are relaxed and represented by a hyperbolic tangent function modified, a scan is made around the best value found in order to obtain the lowest investment. The solutions found were satisfactory for the planning horizon, both for didactic and real systems of medium size, being thus a robust and efficient tool.

Keywords— planning, transmission, optimization, sensibility, expansion, heuristic.

Resumo— Este artigo apresenta uma nova técnica de resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Sendo assim, é proposta uma metodologia baseada na criação de um novo índice de sensibilidade a partir da combinação de dois índices existentes na literatura técnica, que aliada a um algoritmo heurístico construtivo no qual as decisões de expansão são relaxadas e representadas por uma função tangente hiperbólica modificada, é feita uma varredura em torno do melhor valor encontrado, a fim de obter o menor investimento. As soluções encontradas foram satisfatórias para o horizonte de planejamento, tanto para sistemas didáticos quanto para reais de médio porte, sendo assim uma ferramenta robusta e eficiente.

Palavras-chave— planejamento, transmissão, otimização, sensibilidade, expansão, heurística.

1 Introdução

O Sistema Elétrico Brasileiro destaca-se pela geração de energia elétrica, basicamente, por meio de usinas hidroelétricas, devido ao grande potencial das bacias hidráulicas existentes ao longo do país. No entanto, como o Brasil apresenta elevadas dimensões territoriais, que por consequência, resultam em enormes distâncias entre as unidades geradoras e os centros consumidores, o problema de planejamento da expansão da transmissão (PET) torna-se uma tarefa complexa, cujo objetivo é garantir o suprimento dos consumidores a um menor custo.

Conforme supracitado, as dificuldades em encontrar soluções para o PET existem por se tratar de um problema de programação não linear inteira mista com algumas particularidades, sendo elas: (i) a possibilidade de existência de sistemas não conexos, ou seja, ilhados; (ii) região de solução multimodal; (iii) explosão combinatória referente às alternativas de investimento, causando elevado esforço computacional para a determinação, dentre um conjunto pré-definido de circuitos candidatos, aqueles que construídos a um menor custo suprem a demanda prevista.

Portanto, mediante a esse contexto, elaborar algoritmos capazes de encontrar a solução do problema de maneira eficiente não é algo fácil.

Na literatura especializada, (Romero, et al., 2007) propôs a utilização de um algoritmo heurístico na estrutura do algoritmo branch-and-bound, sendo esse implementado e testado para sistemas de transmissão reais brasileiros. Já (Romero, et al., 2003) sugeriu a análise do PET por meio da aplicação de algoritmos heurísticos no modelo de transporte, que inicialmente foi proposto por Garver.

Além desses, também foram propostos algoritmos que envolvem modelagens de fluxo de potência ideal (FPI) e utilização da técnica do ponto interior primal-dual (Oliveira, et al., 2005), que apresentam parâmetros de decisão *fuzzy* para solucionar problemas críticos encontrados no PET (Sousa e Asada, 2009), que utilizam ferramentas híbridas associadas ao algoritmo heurístico construtivo (AHC) e a otimização por meio de enxame de partículas (PSO) (Gomes e Saraiva, 2015), dentre outros, inclusive o que foi utilizado como base para a construção deste artigo, cuja proposta principal é a elaboração de um novo índice de sensibilidade a partir de índices existentes que apresentam elevados desempenhos para os sistemas de transmissão em questão (IEEE 24 barras

– Cenário G1 e Sul Brasileiro Com e Sem Redespaço).

2 Formulação e Metodologia

O AHC utilizado para o desenvolvimento deste artigo foi proposto por (Mendonça, 2016) e tem como objetivo proporcionar a obtenção de soluções de investimento economicamente viáveis para o problema do PET, bem como os planos finais de expansão de cada um dos sistemas analisados. Sendo assim, é importante salientar que:

(i) O algoritmo heurístico utiliza como técnica de solução a metodologia primal-dual dos pontos interiores (Granville, 1994), permitindo a inclusão de não linearidades intrínsecas ao PET.

(ii) A decisão da expansão é realizada por meio da variação de um parâmetro de expansão (PE) e a inclinação da função tangente hiperbólica (Figura 1) é inserida ao problema de otimização por meio do modelo CC de fluxo de carga (Silva Junior, 2003).

(iii) É analisada a sensibilidade calculando o índice para cada caminho candidato e aquele que possuir maior valor é selecionado por ser o mais atrativo.

(iv) Cada vez que uma linha é selecionada mediante análise do item (iii) a operação do sistema é verificada e se o corte de carga for maior que uma tolerância pré-estipulada o processo se repete até que ele fique abaixo dela.

(v) Em sistemas não conexos, ou seja, naqueles que possuem barras isoladas, são inseridas linhas fictícias com baixas susceptâncias quando comparadas as das linhas candidatas (relação entre elas é de 10^{-3}).

(vi) Em cada barra de carga possui um gerador fictício que atende a demanda a altos custos quando ela não é garantida pelas expansões realizadas.

Diante disso, a formulação adotada possui a seguinte função objetivo e restrições, nas quais é dado por E o conjunto das linhas existentes na topologia base de um sistema, C o conjunto de linhas candidatas à expansão e por F o conjunto das linhas fictícias:

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

s.a

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\gamma_{l_{fic}} \ll \gamma_l \quad \forall (l) \in F \quad (11)$$

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 às 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 Parâmetro de Expansão (PE)

A decisão de construir ou não determinadas linhas a fim de sanar o problema do PET é representado pelo PE, em que, se PE=0, opta-se pela não construção, se PE=1, opta-se pela construção. No entanto, tal parâmetro se trata de uma variável discreta, o que poderia causar dificuldades na resolução de problemas de programação inteira.

Logo, foi adotado em (Silva Junior, 2003) e (Oliveira, et al., 2005), uma heurística no qual o PE possa assumir valores contínuos no intervalo [0, 1], a partir de uma função tangente hiperbólica, ou seja, uma função que apresenta comportamento parecido com a função degrau (modelagem ideal para o PE).

Baseado no que foi previamente mencionado, (Mendonça, 2016) propôs uma heurística, na qual é utilizada a função tangente hiperbólica modificada, Equação (12), com o “x” variando de 0 a 20 e “A” variando de 0,1 a 6 com um passo de 0,1, vide Figura 1:

$$PE = \frac{e^{x/A} - 1}{e^{x/A} + 1}, \quad \forall 0 \leq x \leq 20 \quad (12)$$

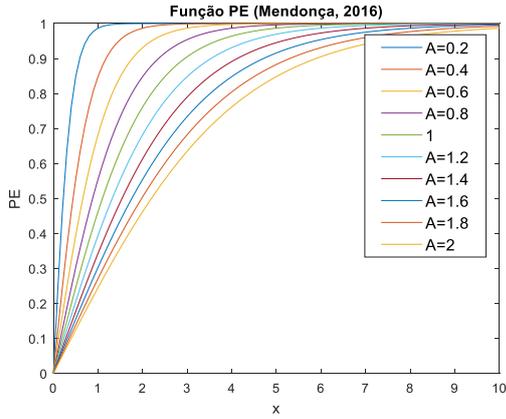


Figura 1. Exemplo Ilustrativo das Variações da Função Tangente Hiperbólica.

Sendo assim, na medida em que “A” cresce, a inclinação da curva é alterada, Figura 1; o que torna possível a execução do algoritmo para diferentes sensibilidades da função PE, objetivando direcionar a busca para regiões que possuem soluções de boa qualidade.

De modo geral, o AHC proposto por (Mendonça, 2016) é dividido em etapa contínua – obtenção dos valores contínuos do PE de todas as linhas candidatas, para cada valor de “A” – e etapa discreta – consiste em definir quais linhas candidatas serão construídas, usando a metodologia dos índices de sensibilidade.

2.2 Índice de Sensibilidade Proposto

Conforme explícito na introdução, nesse artigo será realizada a análise de seis índices mais usuais na literatura técnica, para dois sistemas de transmissão de médio porte. A partir dos resultados encontrados para cada um deles, mediante a simulação do AHC previamente apresentado, serão selecionados dois, a fim de compor um novo índice.

As identificações desses seis índices bem como suas respectivas formulações estão a seguir, Equações (13), (14), (15), (16), (17) e (18):

Sensibilidade Baseada em Garver

$$IS_l^{ga1} = -PE_l \gamma_l \theta_l, \forall (l) \in C \quad (13)$$

Sensibilidade Baseada em Garver Modificada pelo Custo

$$IS_l^{ga2} = \frac{-PE_l \gamma_l \theta_l}{c_l}, \forall (l) \in C \quad (14)$$

Sensibilidade Baseada no Mínimo Esforço

$$IS_l^{me1} = PE_l \frac{1}{2} \gamma_l \theta_l^2, \forall (l) \in C \quad (15)$$

Sensibilidade Baseada no Mínimo Esforço Modificada pelo Custo

$$IS_l^{me2} = \frac{PE_l \frac{1}{2} \gamma_l \theta_l^2}{c_l}, \forall (l) \in C \quad (16)$$

Sensibilidade Baseada no Mínimo Corte de Carga

$$IS_l^{mcc1} = PE_l(\theta_l)(\lambda_l), \forall (l) \in C \quad (17)$$

Sensibilidade Baseada no Mínimo Corte de Carga Modificado pelo Custo

$$IS_l^{mcc2} = \frac{PE_l(\theta_l)(\lambda_l)}{c_l}, \forall (l) \in C \quad (18)$$

Onde:

λ_l é o multiplicador de Lagrange.

As sensibilidades baseadas em Garver, Equações (13) e (14), buscam priorizar linhas que possuem o maior valor absoluto de fluxo de potência ativa. Já aquelas relacionadas ao mínimo esforço, Equações (15) e (16), visam a minimização dos cortes de carga no sistema elétrico a partir da representação de unidades geradoras artificiais no problema de otimização tornando sua solução sempre viável. E, por fim, as pertinentes ao mínimo corte de carga, Equações (17) e (18), permitem a localização de linhas que produzem maior diminuição do corte de carga do sistema.

É importante ressaltar que no algoritmo de mínimo esforço os problemas de operação são contornados permitindo que os circuitos sejam sobrecarregados. Contudo, no algoritmo de mínimo corte de carga estas sobrecargas não são permitidas, uma vez que os circuitos devem permanecer dentro de limites de capacidade.

3 Estudo de casos

Inicialmente foi simulado o sistema IEEE 24 barras cenário G1 (Romero, et al., 2005), Figura 2, com 38 circuitos existentes na topologia base, 41 circuitos candidatos, demanda prevista de 8550 MW e geração de 8550 MW sem reprogramação.

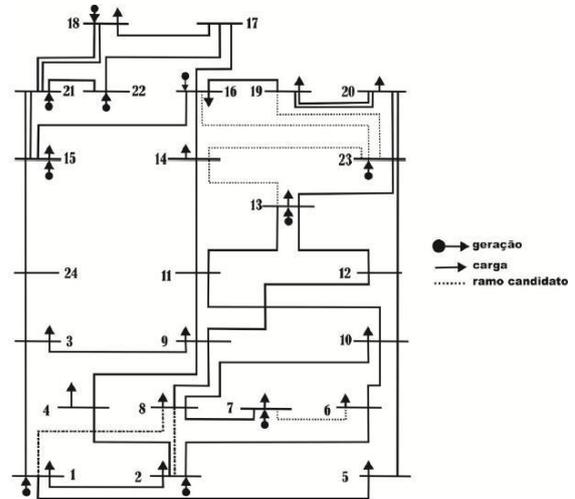


Figura 2. Sistema IEEE 24 barras.

Os resultados obtidos mediante aplicações dos índices mencionados no AHC para esse sistema estão apresentados na forma de gráfico *boxplot*, Figura 3;

uma vez que, por meio dele, é possível visualizar com maior clareza a distribuição empírica dos dados:

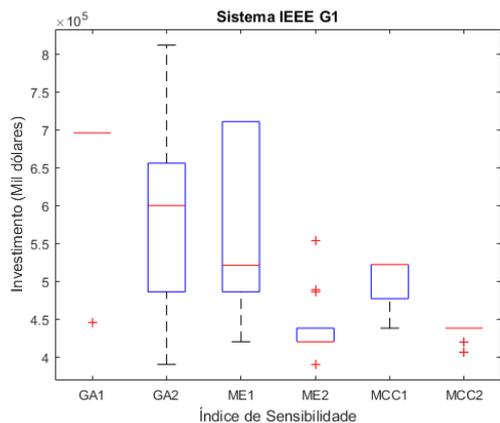


Figura 3. Resultados das aplicações dos índices no AHC para o IEEE 24 barras cenário G1.

Em seguida foram efetuadas simulações para o sistema sul brasileiro, Figura 4, composto por 46 barras, das quais 11 estão isoladas, 66 circuitos existentes na topologia base, 79 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 6880 MW.

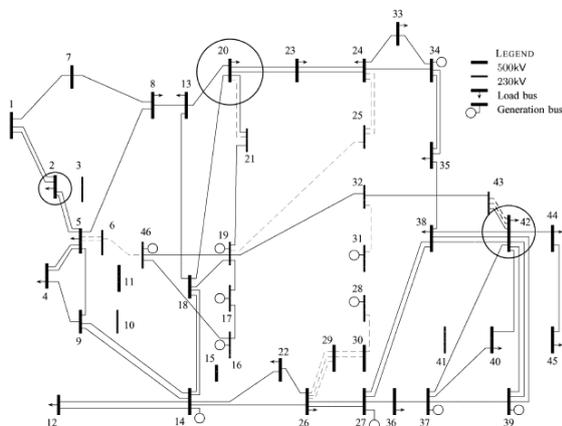


Figura 4. Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil.

Os resultados para esse sistema com e sem redespacho estão explícitos nas Figuras 5 e 6, novamente na forma de gráficos *boxplot*:

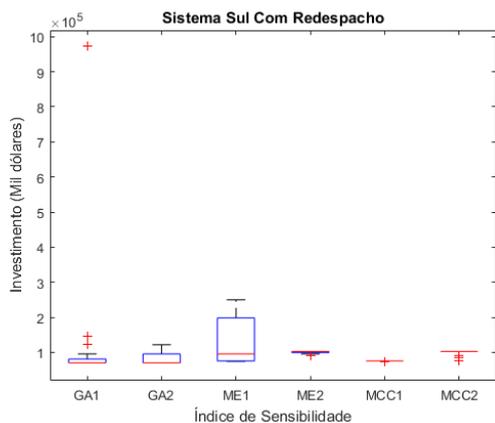


Figura 5. Resultados das aplicações dos índices no AHC para o sistema sul com redespacho.

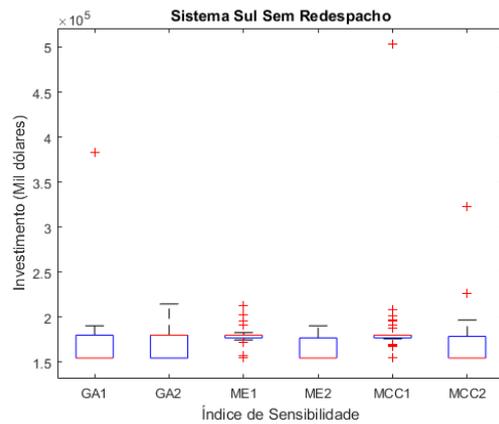


Figura 6. Resultados das aplicações dos índices no AHC para o sistema sul sem redespacho.

Analisando o gráfico da Figura 3, verifica-se que os melhores resultados apresentados para o sistema em questão, foram os dos índices IS_l^{ga1} , IS_l^{me2} e IS_l^{mcc2} , adotados critérios relacionados à confluência dos dados e baixos valores de investimento.

Para o gráfico da Figura 5, sistema sul com redespacho, cinco índices apresentaram resultados bem similares, ou seja, somente o índice IS_l^{me1} que divergiu de forma mais explícita.

Já para o gráfico da Figura 6, sistema sul sem redespacho, os índices IS_l^{me1} e IS_l^{mcc1} convergiram melhor, porém os demais índices exibiram faixas de resultados economicamente mais viáveis.

Logo, por meio da análise dos gráficos anteriores, Figuras 3, 5 e 6; optou-se pela implementação de um novo índice composto pelos índices IS_l^{ga1} e IS_l^{mcc2} , visto que proporcionaram uma maior eficiência, sendo essa próxima ao valor ótimo difundido pela literatura, que são US\$ 390.000.000,00 (Resende, 2014), US\$ 70.289.000,00 (Binato, et al., 2001) e US\$ 154.420.000,00 (Rider, et. al., 2008) para os sistemas IEEE 24 barras G1, sul com e sem redespacho, respectivamente.

A formulação do novo índice é dada pela Equação (19):

$$IS_l^N = \left(\frac{\sum_{i=1}^2 x_{\max} \frac{|IS_l^i|}{IS_{\max}^i}}{2} \right), \forall (l) \in C \quad (19)$$

$$i_1 = IS_l^{ga1} \text{ e } i_2 = IS_l^{mcc2}$$

É feita uma varredura refinada, isto é, alteração da faixa de valores e redução do passo da variável "A" da função PE em torno da melhor solução encontrada, na tentativa de melhorar os resultados previamente obtidos, caso o valor ótimo não seja atingido para alguns dos sistemas.

4 Análise de desempenho do novo índice

Realizadas as simulações para os sistemas mencionados anteriormente, foram obtidos os seguintes custos (milhares de dólares) e comparativos com valores ótimos, Tabela 1, considerando um corte de carga de no máximo 1 MW:

Tabela 1. Custos de expansão obtidos para o novo índice.

Sistema	IEEE24_G1	SUL_CR	SUL_SR
Valores Encontrados	406.000	70.289	154.420
Valores Ótimos	390.000	70.289	154.420
Comparativo com o ótimo	4,103 % Acima	Atingiu o ótimo	Atingiu o ótimo

Na Tabela 2, para cada um dos sistemas abordados, é possível verificar os planos de expansão, ou seja, linhas que construídas suprirão as demandas de forma economicamente viável:

Tabela 2. Planos de expansão obtidos para o novo índice.

Planos de Expansão		
IEEE24_G1	SUL_CR	SUL_SR
15-24 (1)	46-6 (1)	19-25 (1)
14-16 (1)	20-21 (1)	46-6 (1)
3-24 (1)	42-43 (1)	28-30 (1)
16-17 (3)	20-21 (1)	20-21 (1)
16-19 (1)	5-6 (2)	42-43 (2)
1-5 (1)	20-23 (1)	24-25 (2)
17-18 (1)	13-20 (1)	5-6 (2)
7-8 (2)		31-32 (1)
6-10 (1)		29-30 (2)
		26-29 (3)

Comparando os resultados encontrados para o índice proposto, com os alcançados para o índice portfólio (combinação dos seis índices previamente mencionados) elaborado por (Mendonça, 2016), obtém-se os seguintes gráficos, vide Figuras 7, 8 e 9.

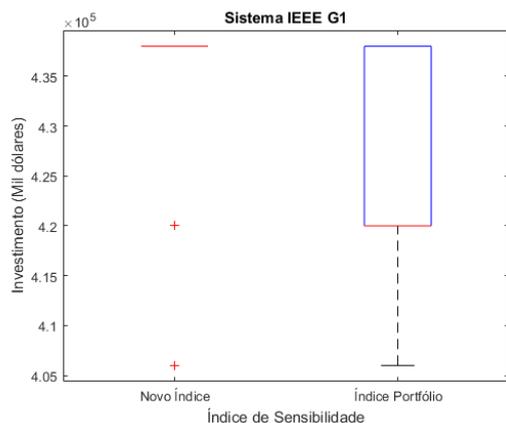


Figura 7. Comparativo entre o índice proposto e o portfólio para o sistema IEEE24_G1.

Na Figura 7, certifica-se para o sistema IEEE24_G1, uma menor dispersão dos resultados obtidos para o índice proposto, apesar de ambos terem atingido o valor de US\$ 406.000.000,00.

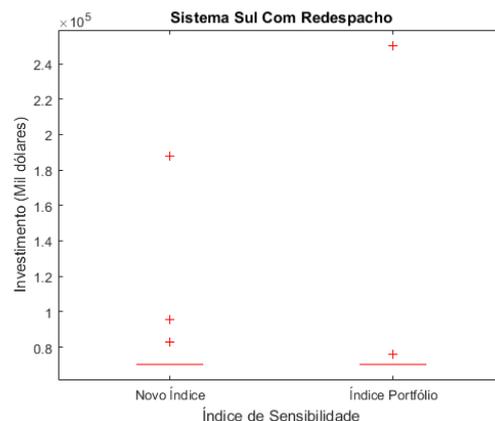


Figura 8. Comparativo entre o índice proposto e o portfólio para o sistema SUL_CR.

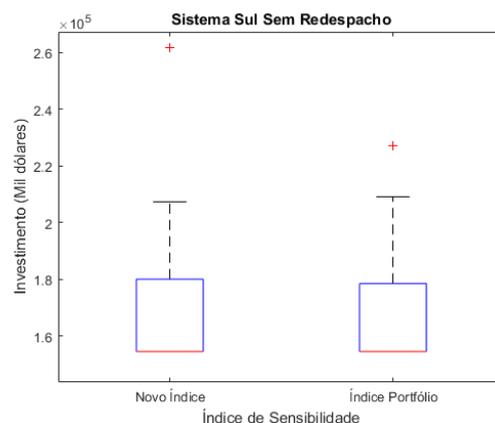


Figura 9. Comparativo entre o índice proposto e o portfólio para o sistema SUL_SR.

Já para o sul com e sem redespacho, Figuras 8 e 9, respectivamente, ambos os índices apresentaram dispersões muito próximas, bem como os mesmos custos de expansão, Tabela 1.

Por fim, na tentativa de obtenção do valor ótimo para o sistema que não o atingiu (IEEE24_G1), foi desenvolvido o seguinte procedimento:

- Verificou-se que os melhores resultados foram obtidos para $A=5,7$ e $A=6$.
- Como o AHC demorou a convergir para os melhores valores de expansão, foi realizada a redução do incremento da variável "A" que inicialmente era 0,1 e considerados intervalos próximos a 6, de modo a tangenciar cada vez mais a melhor solução encontrada.
- Adotando o intervalo de 6 a 6,2, com um passo de 0,004, foi possível encontrar a solução ótima (US\$ 390.000.000,00), Tabela 1, para o sistema em $A=6,164$.

Haja vista a redução do custo, segue na Tabela 3, o novo plano de expansão para o sistema IEEE24_G1:

Tabela 3. Novo plano de expansão para o IEEE24_G1.

Novo Plano de Expansão	
IEEE24_G1	
15-24 (1)	17-18 (2)
14-16 (1)	7-8 (2)
3-24 (1)	6-10 (1)
16-17 (2)	
16-19 (1)	
1-5 (1)	

5 Conclusão

O índice de sensibilidade proposto juntamente com o AHC adotado apresentaram as melhores soluções existentes na literatura para os sistemas estudados, como sul brasileiro com e sem redesenho e também para o sistema IEEE 24 barras cenário G1, quando submetido à técnica de varredura das sensibilidades da função PE próximas do melhor resultado até então encontrado.

Além disso, comparando o novo índice com o portfólio, foi possível verificar que os resultados obtidos por cada um deles para os sistemas simulados, foram bem similares, tornando o primeiro mais eficiente pelo fato de ser a composição de apenas dois índices, em vista do outro, que é a composição de seis.

Apesar dos bons resultados obtidos pela estratégia proposta, como em toda metodologia heurística ou metaheurística, não é possível garantir a otimalidade, mas sim a viabilidade das soluções encontradas. Contudo, são necessárias simulações para sistemas como o sudeste brasileiro e o colombiano, a fim de verificar o comportamento do índice e técnica propostos para sistemas de grande porte, bem como aplicá-lo em algoritmos mais bem elaborados, ou seja, naqueles que envolvam metaheurísticas, por exemplo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG, CNPq, IF Sudeste MG – *Campus* Juiz de Fora e ao Grupo de Otimização Heurística e Bioinspirada (GOHB) da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFJF pelo apoio a este trabalho.

Referências Bibliográficas

Binato, S., Pereira, M. V., and Granville, S. (2001) “A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, No. 2, pp. 235-240.

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

Granville, S. (1994) “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, No. 1, pp. 136-146.

Mendonça, I. M. (2016) “Identificação de Rotas Relevantes Para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica,” Tese de Doutorado, UFJF.

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.

Resende, A. S. (2014), “Particle Swarm Optimization Aplicada ao Planejamento da Expansão de Transmissão,” Tese, UNESP, Ilha Solteira.

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.

Romero, R., Rocha, C., Mantovani, M., and Mantovani, J. R. S. (2003) “Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems,” Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 150, No. 5, pp 521-526.

Romero, R., Asada, E. N., Carreno, E., and Rocha, C. (2007) “Constructive Heuristic Algorithm in Branch-and-bound Structure Applied to Transmission Network Expansion Planning,” IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 2, pp. 318-323.

Romero, R., Rocha, C. Mantovani, J. R. S., and Sanchez, I. G. (2005) “Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning,” Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 152, No. 2, pp. 277-282.

Silva Junior, I. C. (2003) “Planejamento Estático Da Expansão De Sistemas de Transmissão Utilizando Um Novo Algoritmo Heurístico Construtivo,” Dissertação, UFJF.

Sousa, A. S. and Asada, E. N. (2009) “Fuzzy Guided Constructive Heuristic Applied to Transmission System Expansion Planning,” International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp.1-6.