

ALGORITMOS HEURÍSTICOS APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE REDES DE TRANSMISSÃO

Alexandre Akira Kida

Universidade Estadual de Londrina
alexandrekida@gmail.com

Andrés Felipe Alvarez Echavarría

Universidade Estadual de Londrina
andresalvarez215@gmail.com

Sebastián de Jesús Manrique Machado

Universidade Estadual de Londrina
sebjmanrique747@gmail.com

Luis Alfonso Gallego Pareja

Universidade Estadual de Londrina
luispareja@uel.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre heurísticas utilizadas no planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Serão utilizadas heurísticas construtivas baseadas em índices de sensibilidade, como: Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga, Villasana-Garver e de Levi-Calovic. Estas fornecem a topologia da rede e são baseadas em fluxo de potência. Desta forma, os modelos, originalmente não lineares, passam a serem lineares e o podem ser solucionados via técnicas de programação linear. O comportamento dos algoritmos será avaliado em sistemas de pequeno, médio e grande porte. Assim sendo, serão utilizados os sistemas-teste de Garver de 6 barras, IEEE 24 barras e o colombiano de 93 barras. Os algoritmos serão avaliados em função do número de iterações e valor de investimento.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento do Sistema da Transmissão, Algoritmos Heurísticos Programação Linear.

Área Principal: EN - PO na área de Energia.

ABSTRACT

This work presents a comparative study of heuristics used in the planning of the expansion of transmission systems. The construct heuristics based sensibility index will be used, such as Minimum Effort, Minimum Load Cut, Villasana-Garver and Levi-Calovic. These heuristics provide the network topology and are based on power flow. Thus, the models, originally non-linear, become linear and they can be solved using linear programming techniques. The behavior of the algorithms will be evaluated in small, medium and large systems. Therefore, in this work will be used the following test-systems: Garver 6 bus, IEEE 24 bus and Colombian 93 bus. The algorithms will be evaluated according to the number of iterations and investment value.

KEYWORDS. Transmission System Planning, Heuristic Algorithms, Linear Programming.

Main area: EN - OR in Energy.

1. Introdução

No planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica a longo prazo, são determinadas a quantidade e localização de novas linhas, adições de novas subestações, o reforço de subestações existentes, além dos transformadores que precisam ser adicionados para o correto funcionamento do sistema, dado um cenário de geração e demanda. O problema de planejamento encontra-se na categoria dos problemas não-lineares inteiros mistos, de difícil solução. Em sistemas de grande porte, técnicas exatas levariam tempos de solução e quantidades de memória proibitivos. Para reduzir sua complexidade, o problema pode ser modelado linearmente. Desta forma, pode-se resolvê-lo com o uso de técnicas de programação linear (PL) sucessivas ou de programação linear inteira (PLI). No caso das técnicas sucessivas, o processo é guiado por heurísticas. Sendo assim, pode-se encontrar a solução ótima utilizando técnicas heurísticas, metaheurísticas, exatas e combinações de todas as anteriores. Garver (1970) foi o primeiro a propor um modelo baseado no conceito de fluxo de carga. Também foi o primeiro em sugerir o uso de conceitos de otimização para resolver o problema.

Na literatura especializada diferentes metodologias foram propostas para solucionar o problema. Grande parte, utilizam técnicas de otimização clássicas como PL (Garver, 1970) (Kim, Park e Lee, 1994) (Villasana e Garver, 1985) (Kaltenbatch, Peshon e Gehrig, 1970), programação dinâmica (Dusonchet e El-Abiad, 1973), programação não-linear (PNL) (Youssef e Hackam, 1989), e programação inteira mista (Bahense et. al, 2001) (Seifu, Salon e List, 1989) (Santos, França, Said, 1989) (Sharifnia Aashtiani, 1985) (Meliopoulos at. al, 1982) (Lee, Hocks e Hnyilicza, 1974).

Além das técnicas exatas, o problema tem sido solucionado com o uso de heurísticas construtivas. Nestas, a cada passo, são geradas, avaliadas e selecionadas diferentes opções de expansão. Também são desenvolvidas buscas locais baseadas em índices de sensibilidade lógicos ou empíricos. Desta forma, as opções são classificadas durante a busca. O processo continua até que o algoritmo não seja capaz de encontrar uma melhor resposta com os critérios estabelecidos. O critério mais comum é adicionar novos circuitos mediante análises de sensibilidade (Pereira e Pinto, 1985) (Ekwue e Cory, 1984) (Ekwue, 1984) (Monticelli et. al, 1982) (Bennon, Juves e Meliopoulos, 1982) (Dechamps e Jamouille, 1980) (Serna, Durán e Camargo, 1978). Na atualidade, tem sido implementadas metodologias que procuram reduzir o espaço de busca (Duque at. al, 2013) (Melchor at. al, 2014), mediante a seleção de variáveis principais.

Neste trabalho, serão utilizados algoritmos heurísticos construtivos baseados em índices de sensibilidade, para o planejamento da expansão do sistema de transmissão. As heurísticas utilizadas serão: Mínimo Esforço (Monticelli et. al, 1982); Mínimo Corte de Carga (Pereira e Pinto, 1985); Villasana-Garver (Villasana e Garver, 1985) e Rede Marginal de Levi-Calovic (Levi e Calovic, 1991). Serão utilizados os sistemas-testes: Garver de 6 barras; IEEE 24 barras e colombiano de 93 barras. Para resolver o problema de PL, será utilizado a função *linprog*, do software MATLAB.

2. Modelos Teóricos

Quatro algoritmos heurísticos e seus modelos teóricos serão apresentados: Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga, Villasana-Garver e Levi-Calovic. Estes são baseado nos trabalhos de Rubén e Monticelli (2000) e Romero at al. (2002), os quais correspondem aos algoritmos heurísticos clássicos para o planejamento de sistemas de transmissão. Outras heurísticas têm sido propostas, como é mostrado em (Zeinaddini-Maymand at. al, 2011) e (Pareja, Romero e Lezama, 2009), porém não serão tratadas neste trabalho.

Os algoritmos mostrados neste trabalho são divididos em duas fases: construção (fase I) e poda (fase II). A Fase I é responsável por adicionar linhas a cada iteração e varia para cada algoritmo. Já a fase II, tem como objetivo retirar linhas redundantes que foram inseridas na fase I. Esta é comum a todos os algoritmos e será citada no final desta seção.

Mínimo Esforço

Monticelli et al. (1982) propuseram um algoritmo construtivo utilizado para o planejamento de redes de transmissão. Sua principal vantagem é o seu baixo custo computacional e sua boa resposta. Trata-se de um algoritmo baseado em índices de sensibilidades, chamados de critério de Mínimo Esforço. A cada iteração, é solucionado o fluxo de corrente contínua (CC), mostrado em (1) a (5). Com posse da solução do fluxo, mais precisamente θ_i e θ_j , calcula-se os índices de sensibilidade (6) para todos caminhos possíveis do sistema. O algoritmo adiciona uma linha (n_{ij}), por iteração, no caminho que possui o maior índice de sensibilidade. O processo (fase I) repete-se até que o sistema não apresente corte de carga. Para contornar o problema das redes não-conexas ao sistema inicial, são adicionadas redes fictícias com n_{ij} pequeno ($\leq 10^{-4}$), com capacidade de fluxo ilimitado, na rede atual.

$$\min w = \alpha \sum r_i \quad (1)$$

s.a

$$B\theta + g + r = d \quad (2)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (3)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (4)$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad (5)$$

$$Sens_{ij} = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \frac{\gamma_{ij}}{c_{ij}} \quad (6)$$

sendo que,

α – constante de penalização; r – vetor de geradores artificiais; B – Matriz de susceptâncias; g – vetor de geração nas barras; d – vetor de demanda nas barras; \bar{g} – vetor de geração máxima nodal; θ – vetor de ângulo das tensões nodais; γ_{ij} – susceptância entre as barras i e j ; c_{ij} – custo para instalar uma linha entre as barras i e j .

Mínimo Corte de Carga

Formulado Pereira e Pinto (1985), o algoritmo de Mínimo Corte de Carga assemelha-se com o Mínimo Esforço, porém com índice de sensibilidade diferente. Este algoritmo também acrescenta apenas um circuito por iteração, com base no índice de sensibilidade mais atrativo. A cada iteração é resolvido o PL dado por (1) a (5), com a adição da restrição (7). Esta restrição limita a abertura angular entre as barras. O índice de sensibilidade (8) está relacionado com o caminho que fornecerá a maior redução do corte de carga, ponderado pelo seu custo. Sendo assim, o algoritmo escolhe, entre os candidatos, o caminho que possui o maior índice de sensibilidade.

Da mesma forma que o Mínimo Esforço, com objetivo de contornar os problemas das redes não-conexas, é adicionado pequenos n_{ij} – referentes às barras desconexas – ao circuito atual. Além disso, as restrições de abertura angular associadas a estes caminhos, devem permitir uma abertura dez vezes maior. Desta forma, evita-se que as aberturas angulares nos laços fictícios modifiquem a resposta.

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad (7)$$

$$SI_{ij}^{mcc} = \frac{\partial Z}{\partial \gamma_{ij}} \cdot \frac{1}{c_{ij}} = -(\theta_i - \theta_j)(\pi_i - \pi_j) \frac{1}{c_{ij}} \quad (8)$$

sendo que,

$\bar{\phi}_{ij}$ – abertura angular máxima entre as barras i e j ; π – multiplicadores de Lagrange associados as restrições $B\theta + g + r = d$.

Villasana - Garver

Em 1985, Villasana, Garver e Salon propuseram uma heurística construtiva, baseada no modelo híbrido linear. Diferentemente dos algoritmos apresentados, este não utiliza geradores artificiais. Sendo assim, sua função objetivo não é mais minimizar o corte de carga, mas o custo de instalação das linhas, como é mostrado em (9). Neste modelo são solucionadas duas redes: atual e artificial. A rede atual contém os circuitos já adicionados, durante o processo iterativo, juntamente com a configuração inicial. Já a rede artificial consiste em todos os circuitos que podem ser adicionados.

Nesta formulação, ambas redes devem satisfazer a primeira lei de Kirchhoff, e apenas a rede atual deve satisfazer a segunda lei de Kirchhoff. O sistema elétrico deve resolver o problema da operação utilizando apenas a rede atual. Deve-se recorrer à rede artificial apenas quando a atual é insuficiente. Da mesma forma que o algoritmo de Garver (1970), a cada iteração é adicionada uma linha ao circuito artificial que transporta a maior quantidade de fluxo de potência. O processo iterativo da fase I encerra-se quando o sistema conseguir resolver o problema da operação, sem o uso de redes artificiais. Ou seja, encerra-se quando os valores n_{ij} , retornados pelo PL, forem nulos.

$$\min w = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (9)$$

s.a

$$Sf + S^0 f^0 + g = d \quad (10)$$

$$f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) = 0, \forall (i, j) \in \Omega_0 \quad (11)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_0 \quad (12)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega \quad (13)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (14)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (15)$$

$$\theta_j \text{ irrestrito} \quad (16)$$

sendo que,

c_{ij} – custo para instalar uma linha entre as barras i e j ; n_{ij} – número de circuitos instalados entre as barras i e j no sistema artificial; n_{ij}^0 – número de circuitos instalados entre as barras i e j no sistema atual; \bar{n}_{ij} – número máximo de linhas permitidas entre as barras i e j ; f_{ij} – fluxo de potência ativa, por linha, entre as barras i e j ; \bar{f}_{ij} – fluxo de potência ativa máxima permitida na linha entre as barras i e j ; γ_{ij} – susceptância da linha entre as barras i e j ; g – vetor de geração nas barras; r – vetor de corte de carga nas barras; d – vetor de demanda nas barras; f – vetor de fluxos nas linhas do sistema artificial; f^0 – vetor de fluxos nas linhas do sistema atual; S – matriz incidência nó ramo do sistema artificial; S^0 – matriz incidência nó ramo do sistema atual.

Levi-Calovic

Foi apresentado pela primeira vez no trabalho de Levi e Calovic (1991). Também conhecido como algoritmo de rede marginal. Este decompõe o problema em dois subproblemas. Um associado à operação e outro associado ao investimento. Assim, são resolvidos dois modelos matemáticos correspondentes a duas redes diferentes, a cada iteração. O primeiro modelo matemático refere-se ao modelo CC para a configuração corrente (17) - (21). Neste é verificado se o sistema opera adequadamente para esta configuração. Caso o sistema não opere adequadamente para a configuração corrente, $w > 0$, procede-se a montagem do segundo modelo matemático conhecido como rede marginal, utilizando os resultados obtidos da solução do primeiro modelo matemático. Deve-se estabelecer a quantidade de potência que pode ser transportada pelos circuitos existentes, os quais são conhecidos como circuitos não saturados. Este resultado, é expressado em fração de circuito e não em potência em por unidade (p.u), de acordo com (22).

$$\min w = \alpha \sum r_i \quad (17)$$

s.a

$$B_1 \theta + g + r = d \quad (18)$$

$$|\theta_i + \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad (19)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (20)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (21)$$

$$\bar{n}_{ij}' = 1 - \frac{f_{ij}'}{f_{ij}} \quad (22)$$

sendo que,

B_1 – matriz de susceptâncias dos circuitos existentes; θ_i – valor do ângulo na barra i ; $\bar{\phi}_{ij} = \frac{f_{ij}^{max}}{\gamma_{ij}}$;

g – vetor de geração nas barras; r – vetor de corte de carga nas barras; d – vetor de demanda nas barras; θ_j irrestrito; f_{ij}' – vetor de fluxo de potência disponível em cada circuito; \bar{n}_{ij}' – porção de circuito disponível sem custo na rede marginal.

Na rede marginal, as demandas e gerações estão constituídas pela parcela de demanda não fornecida e pela parcela de capacidade de geração não gerada por insuficiência de circuitos elétricos na configuração existente (23) a (27). Neste modelo, a fração de circuito que ainda está disponível da solução de (17) a (21), é usada na rede marginal sem nenhum custo. Pode-se adicionar um circuito com maior fluxo ou com maior n_{ij}' . Desta forma, continua-se o processo iterativo até o corte de carga ser nulo (r).

$$\min w = \sum c_{ij} n_{ij}'' \quad (23)$$

s.a

$$Sf + g_m = d_m \quad (24)$$

$$|f_{ij}'| \leq \bar{f}_{ij} (n_{ij}' + n_{ij}'') \quad (25)$$

$$0 \leq n_{ij}' \leq \bar{n}_{ij}' \quad (26)$$

$$0 \leq g_m \leq \bar{g}_m \quad (27)$$

$$0 \leq n_{ij}'' \quad (28)$$

$$\theta_j \text{ e } F_{ij} \text{ irrestritos} \quad (29)$$

sendo que,

n_{ij} é implementado para todos os caminhos possíveis (existentes e candidatos); n_{ij}' – número de circuitos instalados entre as barras i e j da rede marginal; \bar{n}_{ij}' – máximo número de circuitos que podem ser adicionados entre as barras i e j da rede marginal; d_m – vetor de demanda marginal nas barras; \bar{g}_m : vetor de geração marginal nas barras.

Fase Poda

Após a fase I dos algoritmos terminar, é iniciada a fase II, comum a todos. Esta é responsável por retirar circuitos redundantes, adicionados na fase I. Os circuitos adicionados são ordenados decrescentemente a seu custo. Sendo que os de maior custo são retirados. Após a remoção de um circuito, verifica-se a factibilidade do sistema. Se factível, o circuito é retirado. Caso contrário, não se deve remover o circuito e é analisado o próximo circuito de maior custo. O processo termina quando não há mais circuitos a serem removidos.

3. Análise Iterativa

Nesta secção, será demonstrado o comportamento iterativo do algoritmo de Mínimo Corte de Carga, para o sistema-teste Garver de 6 barras (Figura 1). As figuras 2 a 9, demonstram os índices de sensibilidade e os valores do corte de carga para cada iteração. A configuração atual do sistema, composta pela configuração inicial (linhas finas) e linhas adicionadas (linhas espessas), é ilustrada por linhas contínuas. As pontilhadas, correspondem aos circuitos não-existentes. A cada iteração, são avaliados os índices de sensibilidade (8) para todos os caminhos candidatos. Então, é adicionado um circuito ao caminho de maior índice. Nas figuras 2 a 9, o índice escolhido é destacado por uma elipse.

Conforme novas linhas foram adicionadas, os índices de sensibilidade se modificaram. Sendo assim, o algoritmo adota caminhos distintos para a adição uma nova linha. Nas iterações 3, 4 e 5 (figuras 4, 5 e 6), existem, para cada um, dois caminhos com os maiores índices (68.0). Nestes casos, o algoritmo escolhe aleatoriamente um destes para adicionar a linha. Na iteração 8 (Figura 9), o sistema opera sem corte de carga, finalizando a fase I. As iterações 3 e 4 (figuras 3 e 4) apresentaram os mesmos índices de sensibilidade, porém com valores de cortes de cargas distintos. Coincidentemente, nenhum circuito foi retirado durante a fase II, visto que a remoção de qualquer linha resultou em falha na operação do sistema.

Os cortes de carga aconteceram devido aos limites de capacidade de fluxo das linhas. Desta forma, com a adição destas, houve um incremento na capacidade de total de transporte de fluxo, logo menos cortes de cargas foram necessários. Neste sistema, foi verificado que a cada adição de uma nova linha o corte de carga reduziu, chegando a zero na iteração 8 após ter adicionado sete novas linhas. Seu custo é de US\$ 200,000.000.

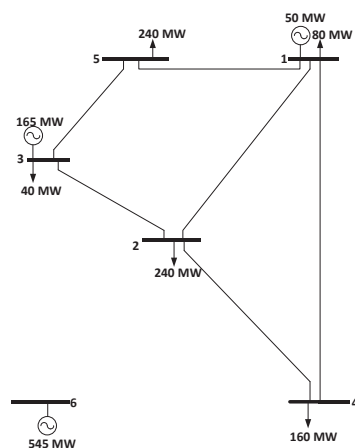


Figura 1 – Sistema 6 barras, configuração inicial.

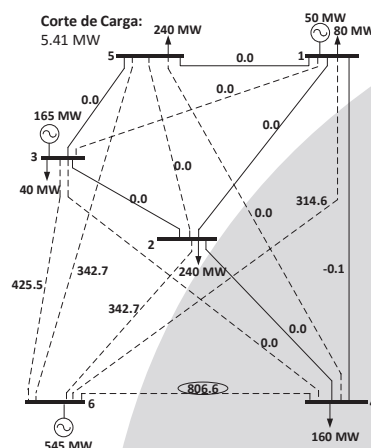


Figura 2 - Sistema 6 barras, iteração 1.

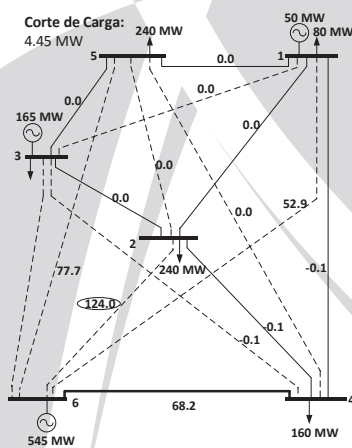


Figura 3 - Sistema 6 barras, iteração 2.

convergiaram para a mesma solução. Para o sistema IEEE, o algoritmo de Levi-Calovic e Mínimo Esforço apresentaram a melhor resposta (US\$ 152,000.000), seguido do Villasana-Garver (US\$ 154,000.000). A diferença entre eles foi de 1.3%. Para o sistema Colombiano de 93 barras, cujo espaço de solução é elevado em relação aos demais, verificou-se que o Villasana-Garver encontrou a melhor resposta (US\$ 650,400.000). A segunda melhor resposta foi encontrada com o Mínimo Corte de Carga (US\$ 735,160.000). Neste caso, a diferença entre as melhores soluções foi mais significativa (11.5%). No geral, o algoritmo de Villasana-Garver obteve o desempenho mais satisfatório. Este algoritmo somente não obteve a melhor resposta no sistema IEEE 24 barras, por uma diferença de apenas 1.3%.

Tabela 1 - Resumo dos resultados obtidos com o algoritmo de Mínimo Esforço e Corte de carga.

Sistema	Mínimo Esforço				Mínimo Corte de Carga			
	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 ⁶ US\$	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 ⁶ US\$
Garver	2	6	4	120	2	6	4	30
	4	6	1	20	3	5	1	20
	5	6	2	60	4	6	2	30
	Total		7	200	Total		7	200
IEEE 24 Barras	3	24	1	50	6	10	1	16
	7	8	2	32	7	8	2	16
	9	12	1	50	10	12	1	50
	14	16	1	54	14	23	1	86
	15	24	1	72				
	1	8	1	35				
	6	7	1	50				
Total		8	343	Total		4	184	
Colombiano de 93 Barras	52	88	1	34.2	43	88	2	39,6
	57	81	2	117.8	57	81	2	58.9
	27	89	1	13.3	27	89	1	13.3
	73	89	1	66.7	74	89	1	14.6
	8	67	1	29.2	15	18	1	7.9
	15	18	1	7.9	57	84	1	26.7
	55	57	1	46.8	55	84	2	26.7
	55	84	1	26.7	59	67	1	16.7
	55	62	2	142.0	59	62	1	71.0
	67	68	2	44.1	66	69	1	17.1
	62	73	1	73.2	9	69	3	15.7
	45	81	1	13.3	27	29	1	5.1
	19	82	1	13.3	19	66	1	9.3
	83	85	1	13.3	73	74	1	58.3
	82	85	1	89.9	62	73	1	73.2
68	86	2	16.5	45	81	1	13.3	
				19	82	1	13.3	
				82	85	1	89.9	
				68	86	1	8,3	
Total		20	748.2	Total		24	735.5	

Tabela 2 - Resumo dos resultados obtidos com o algoritmo de Villasana-Garver e Rede Marginal.

Sistema	Villasana-Garver				Rede Marginal			
	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 ⁶ US\$	Barra i	Barra j	Número	Custo *10 ⁶ US\$
Garver	2	6	4	120	2	6	4	30
	3	5	1	20	3	5	1	20
	4	6	2	60	4	6	2	30
	Total		7	200	Total		7	200
IEEE 24 Barras	3	24	1	50	6	10	1	16
	14	16	1	54	7	8	2	16
	6	7	1	50	10	12	1	50
	Total		3	154	Total		5	152
Colombiano de 93 Barras	43	88	1	39,6	52	88	1	34.2
	15	18	1	7,9	43	88	2	39.6
	56	81	1	32,9	27	89	1	13.3
	57	84	1	26.7	74	89	1	14.6
	55	84	2	53.3	56	81	1	32.9
	56	57	1	62.6	55	57	1	46.8
	55	62	2	142.0	55	84	1	26.7
	27	64	1	6.8	56	57	1	62.6
	19	66	1	9.3	1	59	1	6.2
	73	74	1	58.3	3	71	2	5.2
	62	73	1	73.2	55	62	2	71.0
	45	81	1	13.3	40	42	1	5.2
	64	74	1	13.3	69	70	1	6.2
	19	82	1	13.3	16	21	1	6.9
	82	85	1	89.9	18	58	1	5.7
	68	86	1	8.28	18	21	1	7.5
	Total		18	650.4	Total		30	786.4

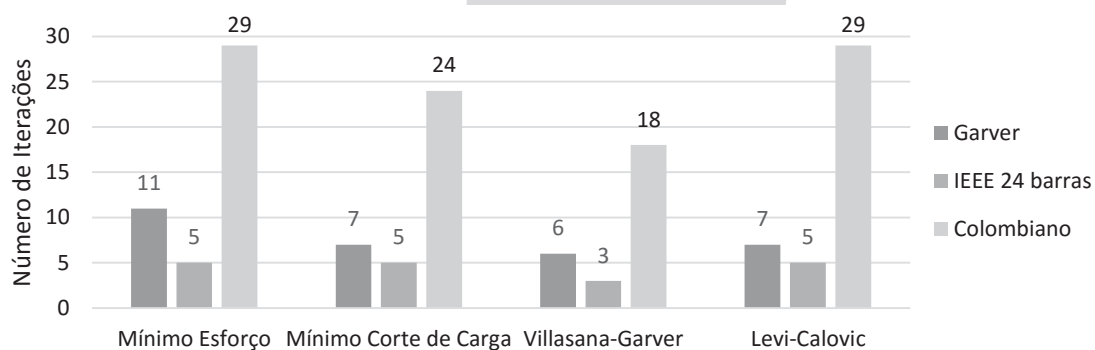


Figura 10 - Comparativo entre as diferentes heurísticas em relação ao número de iterações

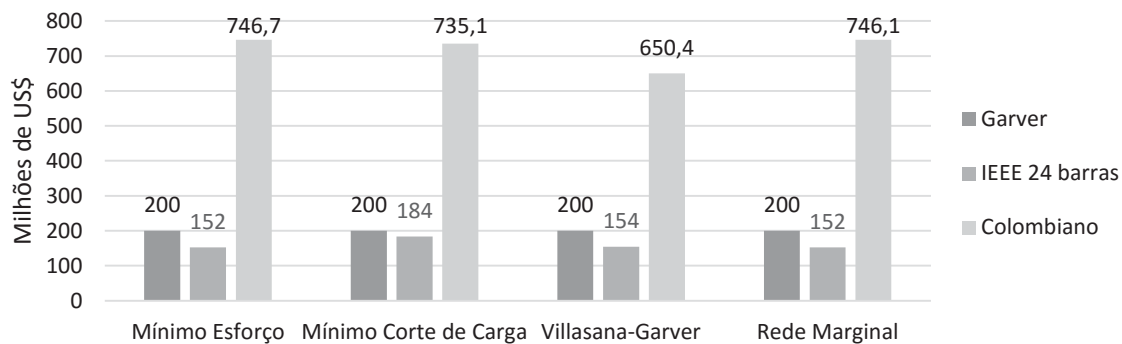


Figura 11 - Comparativo do investimento em relação as diferentes heurísticas.

5. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados quatro algoritmos heurísticos construtivos: Mínimo Esforço; Mínimo Corte de Carga; Villasana-Garver e Levi-Calovic. Também foi demonstrado o comportamento iterativo do sistema Garver de 6 barras, para o algoritmo de Mínimo Corte de Carga. Neste, foram apresentados os parâmetros que o levaram a escolher quais linhas devem ser adicionadas.

Os algoritmos foram testados em sistemas de pequeno porte (6 barras de Garver), médio (IEEE 24 barras) e grande (Colombiano de 93 barras). Desta forma, verificou-se a versatilidade destes algoritmos. Para o sistema de pequeno porte, os quatro algoritmos encontraram a mesma solução. No geral, o algoritmo de Villasana-Garver apresentou o comportamento mais satisfatório (número de iterações e custo de investimento). Apenas não obteve a melhor resposta para o IEEE 24 barras, com a diferença de apenas 1.3%. Na fase construtiva, foi verificado que os algoritmos podem adicionar circuitos redundantes. Sendo assim, a fase da poda mostrou-se necessária para encontrar uma resposta satisfatória (menor custo de investimento).

Os algoritmos heurísticos construtivos podem ser úteis para obter populações iniciais para outras técnicas de solução, como os algoritmos metaheurísticos. Além disso, os algoritmos heurísticos construtivos têm a vantagem de serem modelos matemáticos lineares, o que facilita sua solução.

Agradecimentos

A CAPES/CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Bahiense, L., Oliveira, G. C., Pereira, M. e Granville, S.** (2001), A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 560–565.
- Bennon, R. J. Juves, J. A. e Meliopoulos, A. P.** (1982), Use of sensitivity analysis in automated transmission planning, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 53–59.
- Dechamps, C. e Jamouille, E.** (1980), Interactive computer program for planning the expansion of meshed transmission networks, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 2, pp. 103–108.
- Duque, A. Escobar, Melchor, L. J. e Escobar, A.** (2013), Identificación de variables principales en el planeamiento de redes de transmisión usando técnicas heurísticas basadas en PLE y PNLE, *Scientia et Technica*, vol. 18, pp. 42-50.
- Dusonchet Y. P. e El-Abiad, A. H.,** (1973), Transmission planning using discrete dynamic optimization, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, pp. 1358–1371.
- Ekwue, A. O. e Cory, B. J.** (1984), Transmission system expansion planning by interactive methods, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 1583–1591.
- Ekwue, A. O.** (1984), Investigations of the transmission systems expansion problem, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 6, pp. 139–142.

- Garver, L. L.** (1970), Transmission network estimation using linear programming, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 1688–1697.
- Kim, K. J., Park Y. M., e Lee, K. Y.** (1988), Optimal long term transmission expansion planning based on maximum principle, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, pp. 1494–1501.
- Kaltenbatch, J. C., Peshon, J. e Gehrig, E. H.** (1970), A mathematical optimization technique for the expansion of electrical power transmission systems, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, pp. 113–119.
- Lee, S. T., Hocks, K. L. e Hnylicza, E.** (1974), Transmission expansion using branch-and-bound integer programming with optimal cost-capacity curves, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, pp. 1390–1400.
- Levi, V.A. e Calovic, M.S.** (1991), A new decomposition based method for optimal expansion planning of large transmission networks, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.6, no.3, pp.937,943.
- Melchor, J. N., Escobar, L.M., Duque, A. e Escobar, A. H.** (2014), Planeamiento de la expansion de redes de transmission usando restricciones especializadas basadas en areas, *Épsilon* (22), pp. 129-149.
- Meliopoulos, A. P. Webb, R. P. Bennon, R. J. e Juves, J. A.** (1982), Optimal long range transmission planning with AC load flow, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 4156–4163.
- Monticelli, A., Santos, A., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H. F., Parker, B. J. e Praça, J. C. G.** (1982), Interactive transmission network planning using a least-effort criterion, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 3919–3925.
- Pareja, L. A. G., Romero, R. A. e Lezama, J. M. L.** (2009), Planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión considerando contingencias y demanda incierta, *Rev. Fac. Ing.*, pp. 188–200.
- Pereira, M. V. e Pinto, L. M. V. G.** (1985), Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 381–389.
- Romero, R.; Monticelli, A.; Garcia, A.; Haffner, S.,** (2002). Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings* , vol.149, no.1, pp.27,36.
- Rubén, R. e Monticelli, A.** (2000), Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, vol. 8. Campinas.
- Santos, A., França, P. M. e Said, A.** (1989), An optimization model for long range transmission expansion planning, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 94–101.
- Seifu, A., Salon, S. e List, G.** (1989), Optimization of transmission line planning including security constraints, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 1507–1513.
- Serna, C. Durán, J. e Camargo, A.** (1978), A model for expansion planning of transmission systems, a practical application example, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-97, pp. 610–615.
- Sharifnia A. e Aashtiani, H. Z.** (1985), Transmission network planning: A method for synthesis of minimum-cost secure networks, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 2026–2034.
- Villasana, R., Garver, L. L. e Salon, S. L.** (1985), Transmission network planning using linear programming, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 349–356.
- Youssef H. K. e Hackam, R.** (1989), New transmission planning model, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 9–18.
- Zeinadini-Maymand, M., Rashidinejad, M., Mohammadian, M., Mahmoudabadi, A., Khorasani, H. e Rahmani, M.** (2011), An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning, *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1–5.