

Estudo Comparativo entre Algoritmos Heurísticos Construtivos Baseados em Sensibilidade para o Planejamento de Sistemas de Transmissão

Sebastián Manrique, Alexandre Kida, Andrés Álvarez e Luis Alfonso Gallego Pareja

Abstract — Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre as técnicas heurísticas, para solucionar o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Foram utilizados algoritmos construtivos baseados em índices de sensibilidade como o algoritmo de Mínimo Esforço, Mínimo Corte de Carga, Villasana-Garver e de Levi-Calovic. Os modelos a serem solucionados são baseados no modelo DC. Os algoritmos heurísticos fornecem a topologia da rede, desta forma os modelos – originalmente não lineares - passam a serem lineares e o sistema pode ser solucionado via técnicas de programação linear. O estudo demonstrou que entre as quatro técnicas analisadas, o de Villasana-Garver apresentou a melhor resposta

Palavras-Chave — *Planejamento de sistema de transmissão (TEP), Programação linear, Algoritmos heurísticos (HÁ).*

I. INTRODUÇÃO

No problema do planejamento da expansão do 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 projetado no tempo

O problema de planejamento encontra-se na categoria dos problemas não-lineares inteiros mistos de difícil solução que para sistemas de transmissão de tamanho maior mediante técnicas exatas tomariam tempos de solução e quantidade de memória proibitivos. Mas o modelo do problema pode ser escrito de maneira tal que ele pode ser resolvido usando técnicas de programação linear sucessiva ou de programação linear inteira. No caso das técnicas lineares sucessivas, o processo é guiado por técnicas heurísticas.

Este problema tem sido resolvido nos sistemas no qual é possível encontrar a solução ótima, usando técnicas heurísticas, meta-heurísticas, exatas e combinações de todas as anteriores.

Garver [1] foi o primeiro que propôs um modelo baseado no conceito de fluxo de carga e também foi o primeiro em sugerir o uso de conceitos de otimização para resolver o problema.

Na literatura especializada tem sido proposto diferentes tipos de métodos para obter a solução ótima do problema, onde a maioria usam técnicas de otimização clássicas como programação linear [1]-[5], programação dinâmica [6], programação não-linear [7], e programação inteira mista [8]-[14].

Além das técnicas exatas, o problema do planejamento de sistemas de transmissão tem sido abordado pelas técnicas heurísticas, que buscam em lugar de usar otimização clássica, vai passo a passo, gerando, avaliando, e selecionando diferentes opções de expansão, para estas escolhas, as técnicas heurísticas desenvolvem buscas locais com ajuda de sensibilidades lógicas ou empíricas que permitem classificar as opções durante a busca, o processo heurístico é feito até que o algoritmo não é capaz de encontrar uma melhor resposta com os critérios estabelecidos, onde o critério mais comum trabalhado é adicionar novos circuitos mediante análises de sensibilidade [15]- [23].

Na atualidade tem sido implementado devido à complexidade do problema e o grande tamanho que apresenta o espaço solução, metodologias que procuram reduzir este espaço [24] - [27] mediante a seleção de variáveis principais para tentar que as técnicas convencionais apresentem um melhor desempenho.

Neste artigo foram utilizados os métodos heurísticos construtivos baseados em sensibilidades [28], e é apresentado a solução do planejamento da expansão do sistema de transmissão usando o modelo DC e suas diferentes representações, os quais são implementados no software MATLAB (MATrix LABoratory), e usados nos sistemas de prova Garver, IEEE 24 barras, e Colômbia. Para resolver o problema de programação linear foi utilizado a função linprog, do MATLAB.

II. MODELOS TEÓRICOS

Os quatro algoritmos heurísticos e seus modelos teóricos são apresentados a continuação baseado nos trabalhos [28], [29], os quais correspondem aos algoritmos heurísticos clássicos para o planejamento de sistemas de transmissão. Algumas outras

heurísticas tem sido propostas mas recentemente como a apresentada em [30], porém estas outras metodologias não serão tratadas neste artigo. Outros modelos e métodos de solução mais complexos como os apresentados em [31] também não serão considerados neste artigo.

A. Algoritmo de mínimo esforço

Proposto em 1982 [19], este algoritmo tem como objetivo solucionar, de forma iterativa, problemas de planejamento da transmissão. Este modelo é baseado no fluxo DC e o nome “mínimo esforço” vem do critério utilizado para adicionar novas linhas, durante o processo iterativo. Este critério é baseado no custo-benefício dos caminhos e pode ser encontrado em (1) e (2). A vantagem deste método é o seu baixo custo computacional e sua boa resposta [19]. O algoritmo pode ser dividido em duas fases: construção e poda. Na fase da construção, a cada iteração é adicionado um circuito n_{ij} e o modelo é solucionado ao realizar o fluxo DC (1), para esta nova configuração da rede. O circuito a ser adicionado é dependente do índice de sensibilidade, o qual pode ser usado o índice 1 (2) ou 2 (3). A primeira fase do algoritmo é executada até que o sistema trabalhe sem corte de carga. Já a fase de poda, como é comum aos quatro algoritmos, é citada separadamente na seção E.

O modelo DC é um problema não-linear, mas neste algoritmo será tratado como linear, visto que as variáveis n_{ij} são conhecidas (saída do processo iterativo). Desta forma o problema vira é linear e pode ser resolvido via programação linear (PL).

$$\begin{aligned}
 \min w &= \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + \sum r_i \\
 \text{s.a.} \\
 Sf + g &= d \\
 f_{ij} - (\gamma_{ij}^0 - \gamma_{ij}^{eq})(\theta_i - \theta_j) &= 0 \\
 |f_{ij}| &\leq (\gamma_{ij}^{eq} + \gamma_{ij}^0) \bar{\phi}_{ij} \\
 0 &\leq g \leq \bar{g} \\
 0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 n_{ij} &\text{ inteiro} \\
 \gamma_{ij}^{eq} &\text{ discreto} \\
 f_{ij} &\text{ irrestrito} \\
 \theta_j &\text{ irrestrito}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde:

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 .
 f_{ij} : Fluxo de potência ativa entre as barras i e j .
 γ_{ij}^0 : Suptância do circuito original entre as barras i e j .
 $\gamma_{ij}^{eq} = n_{ij} X_{ij}$
 θ_i : Valor do ângulo na barra i .
 $\bar{\phi}_{ij} = \frac{f_{ij}^{max}}{\gamma_{ij}}$
 g : Vetor de geração nas barras.

f : Vetor de fluxos nas linhas do sistema atual.
 r : Vetor de corte de carga nas barras.
 d : Vetor de demanda nas barras.
 S : Matriz incidência nó ramo do sistema.

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

$$Sens_{ij}^2 = -\frac{1}{2}(\theta_i - \theta_j)^2 \frac{\gamma_{ij}}{c_{ij}} \tag{3}$$

B. Algoritmo de mínimo corte de carga

Este algoritmo foi apresentado pela primeira vez em [M1], e foi aplicado à solução do sistema sudeste Brasileiro. O algoritmo de mínimo corte de carga usa o modelo DC modificado usando geradores artificiais para contornar os problemas de operação durante o processo iterativo. Em cada iteração o algoritmo soluciona o modelo (4)

$$\begin{aligned}
 \min w &= \sum r_i \\
 \text{s.a.} \\
 B\theta + g + r &= d \\
 |\theta_i + \theta_j| &= \bar{\phi}_{ij} \\
 0 &\leq g \leq \bar{g} \\
 0 &\leq r \leq d \\
 \theta_j &\text{ Irrestrito}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Onde

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

Pode-se observar que as restrições representam o fluxo DC com geradores artificiais em cada barra que não podem superar o limite imposto pela demanda da barra associada. Após obter a solução do PL calcula-se o indicador de sensibilidade (5), o qual é a derivada parcial da função objetivo em relação à susceptância.

$$SI_{ij}^{mc} = \frac{\partial Z}{\partial \gamma_{ij}} = -(\theta_i - \theta_j)(\pi_i - \pi_j), \tag{5}$$

Onde

π_i : Multiplicadores de Lagrange associados as restrições $B\theta + g + r = d$.

Dividindo pelo custo da linha correspondente é possível ter uma outra variante do índice de sensibilidade, como se apresenta em (6).

$$SI_{ij}^{mcc} = \frac{SI_{ij}^{mc}}{c_{ij}} \tag{6}$$

Algumas outras considerações importantes em relação a esta heurística são:

Neste algoritmo, precisa-se do uso de redes artificiais com a

finalidade de encarar os problemas que aparecem quando tem-se sistemas não conexos.

A rede fictícia é formada por todos os caminhos candidatos onde não existe pelo menos uma linha na configuração atual. Coloca-se então um número pequeno ao circuito fictício.

Além disso, nas restrições de abertura angular associadas a esses caminhos, deve-se permitir uma abertura maior, o qual evita que as aberturas angulares nos laços fictícios modifiquem a resposta

C. Algoritmo Villasana - Garver

Em 1985, Villasana, Garver e Salon publicaram um trabalho [4], no qual é proposto uma heurística construtiva que utiliza, de forma combinada, os modelos do fluxo de potência DC e o modelo de transportes. Esta heurística é utilizada para resolver problemas do planejamento da transmissão. Neste modelo é solucionado duas redes: atual e artificial.

- Rede atual: esta rede consiste nos circuitos já adicionados, durante o processo iterativo, juntamente com a configuração base (inicial).
- Rede artificial: esta rede consiste em todos os circuitos que podem ser adicionados. O sistema elétrico deve resolver o problema da operação utilizando somente os circuitos existentes, e a utilização dos circuitos artificiais é restrita apenas quando os circuitos existentes sejam insuficientes.

Nesta formulação, ambas redes devem satisfazer a primeira lei de Kirchhoff, e apenas a rede atual deve satisfazer também a segunda lei de Kirchhoff. É uma formulação híbrida, pois a rede atual tem o modelo DC e a artificial, o de transportes. A formulação do problema é mostrada em(7). Como o fluxo DC, e o modelo de transportes são lineares (os n_{ij} são fornecidos pelo algoritmo), o modelo pode ser solucionado via PL.

O critério de sensibilidade é adicionar uma linha ao circuito artificial que transporta a maior quantidade de fluxo. O algoritmo se encerra quando o sistema conseguir resolver o problema da operação sem utilizar as redes artificiais.

$$\begin{aligned}
 \min w &= \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \\
 \text{s.a.} \\
 Sf + S^0 f^0 + g &= d \\
 f_{ij}^0 - \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i - \theta_j) &= 0, \forall (i, j) \in \Omega_0 \\
 |f_{ij}^0| &\leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_0 \\
 |f_{ij}| &\leq n_{ij} \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega \\
 0 &\leq g \leq \bar{g} \\
 0 &\leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \\
 -n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} &\leq f_{ij}^0 \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_0 \\
 \theta_j &\text{ irrestrito}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Onde:

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.

f_{ij} : Fluxo de potência ativa entre a barras i e j.

γ_{ij}^0 : Suceptância do circuito original entre as barras i e j.

$\gamma_{ij}^{eq} = n_{ij} X_{ij}$

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.

f : Vetor de fluxos nas linhas do sistema atual.

f^0 : Vetor de fluxos nas linhas do sistema artificial.

S : Matriz incidência nó ramo do sistema atual.

S^0 : Matriz incidência nó ramo do sistema artificial.

D. Algoritmo de Rede Marginal de Levi-Calovic

Este algoritmo foi apresentado por primeira vez em [16]. Basicamente o algoritmo de rede marginal procurava decompor o problema de planejamento da expansão da transmissão em dois sub problemas, um associado à operação e um outro associado ao investimento. Assim, se resolvem dois modelos matemáticos correspondentes a duas redes diferentes em cada passo do algoritmo heurístico construtivo. O primeiro modelo matemático corresponde ao modelo DC para a chamada configuração corrente, isto é, verifica-se se o sistema opera adequadamente para a configuração corrente. O modelo para a configuração corrente é apresentado em(8):

$$\begin{aligned}
 \min w &= \sum r_i \\
 \text{s.a.} \\
 B_1 \theta + g + r &= d \\
 |\theta_i + \theta_j| &\leq \bar{\phi}_{ij} \\
 0 &\leq g \leq \bar{g} \\
 0 &\leq r \leq d \\
 \theta_j &\text{ Irrestrito}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Onde:

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

Caso o sistema não opere adequadamente para a configuração corrente, $w > 0$, procede-se a montagem do segundo modelo matemático conhecido com o nome de rede marginal, usando os resultados obtidos da solução do primeiro modelo matemático (8).

O primeiro passo é estabelecer quanta potência ainda pode-se transportar pelos circuitos existentes de acordo com a solução de (8), os quais são conhecidos como circuitos não saturados. O anterior, é expressado em fração de circuito e não em potência em p.u., de acordo com(9).

$$\bar{n}_{ij}' = 1 - \frac{f_{ij}'}{\bar{f}_{ij}} \tag{9}$$

Onde

f'_{ij} : Vetor de fluxo de potência disponível em cada circuito baseado na solução de (8).

\overline{n}_{ij}^T : 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 (10).

$$\begin{aligned} \min w &= \sum c_{ij} n_{ij}'' \\ \text{s.a.} \quad & Sf + g_m = d_m \\ & |F_{ij}| \leq F_{ij}(n_{ij}' + n_{ij}'') \\ & 0 \leq n_{ij}' \leq \overline{n}_{ij}' \\ & 0 \leq g_m \leq \overline{g}_m \\ & 0 \leq n_{ij}'' \\ & F_{ij} \text{ Irrestrito} \end{aligned} \quad (10)$$

Onde

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.

\overline{n}_{ij}^T : 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.

\overline{g}_m : Vetor de geração marginal nas barras.

Observe-se no modelo (10) que a fração de circuito que ainda está disponível da solução de (8), é usada na rede marginal sem nenhum custo. À rede corrente pode-se adicionar o circuito com maior fluxo ou com maior n_{ij}' . Desse jeito continua-se o processo iterativo até eliminar o corte de carga na solução de (8).

E. Fase Poda

Todos os anteriores algoritmos, depois de cumprir com seu critério de parada, devem passar por uma segunda fase comum para todos eles. Nesta fase, basicamente os circuitos adicionados são ordenados de maior custo a menor e começam a ser retirados da solução. A pós retirar um circuito, se verifica se a solução ainda é fatível ou não. Se for fatível o circuito é retirado ou se não, deve-se adicionar de novo o circuito que tentou-se retirar e continuar com o processo de poda até finalizar.

1 a 5 demonstram o comportamento iterativo dos índices de sensibilidade a cada iteração do algoritmo – para o sistema de 6 barras. Nestas tabelas, os valores em negritos correspondem aos índices de sensibilidade escolhido pelo algoritmo para adicionar uma nova linha. Quando existem dois ou mais índices de sensibilidades críticos, o algoritmo escolhe (entre estes índices) aleatoriamente qual caminho terá uma nova linha. Verificou-se que o algoritmo de mínimo esforço colocou mais linhas na Fase I, que os demais. Os algoritmos de mínimo corte de carga, Villasana-Garver e Levi-Calovic apresentaram a mesma configuração de linhas adicionadas, porém a ordem na qual estas foram adicionadas foram diferentes para cada algoritmo.

TABELA 1: ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA FASE I PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO ESFORÇO, ITERAÇÕES 1 A 7.

Linha	Índice de sensibilidade 2 (x1000)						
	Iterações						
	1	2	3	4	5	6	7
1-2	-0.03	-0.31	-0.38	-0.38	-0.49	-0.49	-0.54
1-3	-0.22	-0.78	-0.90	-0.90	-0.29	-0.29	-0.29
1-4	0.00	-0.14	-0.24	-0.24	-0.28	-0.28	-0.28
1-5	-1.82	-0.31	-0.19	-0.19	-0.32	-0.32	-0.36
1-6	-1.09	-1.73	-1.82	-1.82	-1.96	-1.96	-1.93
2-3	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.14	-0.14	-0.20
2-4	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
2-5	-1.17	-1.17	-1.17	-1.17	-1.61	-1.61	-1.79
2-6	-4.62	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-4.68
3-4	-0.05	-0.04	-0.01	-0.01	-0.04	-0.04	-0.04
3-5	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-2.52	-2.52	-2.63
3-6	-1.23	-1.36	-1.36	-1.36	-2.42	-2.42	-2.37
4-5	-0.24	-0.28	-0.36	-0.36	-0.47	-0.47	-0.48
4-6	-5.00	-5.00	-4.36	-4.36	-4.43	-4.43	-4.34
5-6	-2.58	-2.72	-2.72	-2.72	-3.04	-3.04	-3.04

TABELA 2: ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA FASE I PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO ESFORÇO, ITERAÇÕES 8 A 11.

Linha	Índice de sensibilidade 2(x1000)			
	Iterações			
	8	9	10	11
1-2	-0.84	-0.79	-0.72	-0.96
1-3	-0.29	-0.23	-0.06	-0.05
1-4	-0.27	-0.51	-0.52	-0.50
1-5	-0.60	-0.87	-0.81	-1.04
1-6	-1.79	-1.66	-1.69	-1.60
2-3	-0.65	-0.77	-1.57	-2.36
2-4	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01
2-5	-2.84	-3.07	-2.82	-3.69
2-6	-3.26	-3.02	-3.28	-2.44
3-4	-0.03	-0.18	-0.34	-0.33
3-5	-3.25	-3.37	-1.82	-2.09
3-6	-2.15	-2.11	-2.74	-2.61
4-5	-0.55	-0.96	-0.94	-0.99
4-6	-3.93	-2.23	-2.27	-2.12
5-6	-3.04	-3.04	-3.04	-3.04

III. ANÁLISE ITERATIVA DOS ALGORITMOS PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS DE GARVER

De modo a ilustrar o comportamento a cada iteração – dos quatro algoritmos – foram realizadas as Tabelas 1 a 5. Para obter uma melhor visualização, foi escolhido o sistema-teste de Garver de 6 barras [1] mostrado no Apêndice A. Tendo em vista que a Fase II é a mesma para todos os métodos, apenas o comportamento iterativo da Fase I foi considerada. As Tabelas

TABELA 3: ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA FASE I PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO CORTE DE CARGA.

Linha	Índice de sensibilidade						
	Iterações						
	1	2	3	4	5	6	7
1-2	-0.02	0.00	0.00	0.00	-2.17	9.35	-5.89
1-3	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03	14.31	-1.44
1-4	-0.08	-0.05	0.00	0.00	7.67	9.71	10.88
1-5	0.02	-0.01	0.00	0.00	1.54	9.06	2.54
1-6	314.59	52.92	41.44	41.44	36.35	30.98	41.21
2-3	0.00	0.01	0.02	0.02	1.98	-4.96	-2.89
2-4	-0.02	-0.09	0.00	0.00	2.14	0.30	0.68
2-5	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	35.73	-7.07
2-6	726.16	123.97	68.00	68.00	68.00	22.59	68.00
3-4	-0.02	-0.06	0.01	0.01	-1.80	-1.15	8.40
3-5	0.01	0.04	0.06	0.06	7.91	68.00	-2.20
3-6	425.52	70.32	35.39	35.39	31.30	0.00	55.49
4-5	-0.04	-0.09	0.00	0.00	11.60	22.64	18.16
4-6	806.63	68.15	68.00	68.00	23.31	11.74	23.84
5-6	342.66	77.66	50.16	50.16	50.16	60.64	60.57

TABELA 4: ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA FASE I PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO ESFORÇO, ITERAÇÕES 8 A 11.

Linha	Índice de sensibilidade (x1000)						
	Iterações						
	1	2	3	4	5	6	7
1-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-5	0.17	0.17	0.16	0.17	0.14	0.16	0.00
1-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-6	-3.02	-2.16	-2.04	-1.24	-0.57	-0.25	0.00
3-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-5	0.23	0.23	0.24	0.23	0.26	0.24	0.00
3-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-6	-2.43	-2.29	-1.41	-1.21	-0.88	-0.20	0.00
5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABELA 5: ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA FASE I PARA O SISTEMA DE 6 BARRAS COM O ALGORITMO DE REDE MARGINAL.

Linha	Índice de sensibilidade						
	Iterações						
	1	2	3	4	5	6	7
1-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-5	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00
2-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2-5	0.48	0.05	0.57	0.36	0.00	0.00	0.00
2-6	2.93	2.64	2.07	1.78	0.65	0.18	0.22
3-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-5	0.00	0.22	0.00	0.35	0.50	0.67	0.00
3-6	0.50	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-6	2.02	1.81	1.21	0.67	0.80	0.28	0.52
5-6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

IV. RESULTADOS

Os quatro algoritmos foram testados no sistema Garver de 6 barras, IEEE 24 barras e o Colombiano de 93 barras. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 1 a 4. Nestas estão contabilizados o número de linhas adicionadas no caminho entra as barras i e j, bem como quais caminhos receberão estas linhas. Também é mostrado o custo da instalação das linhas, por pátio e o custo total do sistema planejado. Uma abordagem comparativa entre as 4 técnicas foi realizada na próxima secção.

Coincidentemente, os quatro algoritmos apresentaram (após a Fase II) a mesma resposta para o sistema de 6 barras. Porém, ao analisar as Tabelas 6 a 9, verificou-se que os algoritmos de mínimo corte de carga, Villasana-Garver e Levi-Calovic apresentaram a mesma configuração no final da Fase I (a Fase II não foi necessária, visto que nessa configuração nenhuma linha pode ser retirada) porém, as linhas foram adicionadas em iterações diferentes. Ao analisar os resultados das Tabelas 1 e 2 e confrontar com a Tabela 6, verificou-se que o algoritmo de mínimo esforço colocou linhas redundantes durante a fase I, e após a Fase II o algoritmo convergiu para a mesma resposta dos demais três métodos - para o sistema de 6 barras.

TABELA 6. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO ESFORÇO

Sistema	Barra i	Barra j	Número	Custo
Garver	2	6	4	120
	4	6	1	20
	5	6	2	60
	Total		7	200
IEEE 24 Barras	3	24	1	50
	7	8	2	32
	9	12	1	50
	14	16	1	54
	15	24	1	72
	1	8	1	35
	6	7	1	50
	Total		8	343
	52	88	1	34.2
	57	81	2	117.8
Colombia 93 Barras	27	89	1	13.3
	73	89	1	66.7
	8	67	1	29.2
	15	18	1	7.9
	55	57	1	46.8
	55	84	1	26.7
	55	62	2	142.0
	67	68	2	44.1
	62	73	1	73.2
	45	81	1	13.3
	19	82	1	13.3
	83	85	1	13.3
	82	85	1	89.9
	68	86	2	16.5
	Total		20	748.2

TABELA 7. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DE MÍNIMO CORTE DE CARGA

Sistema	Barra i	Barra j	Número	Custo
Garver	2	6	4	30
	3	5	1	20
	4	6	2	30
	Total		7	200
IEEE 24 Barras	6	10	1	16
	7	8	2	16
	10	12	1	50
	Total		4	98
Colombia 93 Barras	43	88	2	39,6
	57	81	2	58,9
	27	89	1	13,3
	74	89	1	14,6
	15	18	1	7,9
	57	84	1	26,7
	55	84	2	26,7
	59	67	1	16,7
	59	62	1	71
	66	69	1	17,1
	9	69	3	15,7
	27	29	1	5,1
	19	66	1	9,3
	73	74	1	58,3
	62	73	1	73,2
	45	81	1	13,3
	19	82	1	13,3
	82	85	1	89,9
	68	86	1	8,3
	Total		24	735,5

TABELA 8. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DE VILLASANA-GARVER

Sistema	Barra i	Barra j	Número	Custo
Garver	2	6	4	120
	3	5	1	20
	4	6	2	60
	Total		7	200
IEEE 24 Barras	3	24	1	50
	14	16	1	54
	6	7	1	50
	Total		3	154
Colombia 93 Barras	43	88	1	39,6
	15	18	1	7,9
	56	81	1	32,9
	57	84	1	26,7
	55	84	2	53,3
	56	57	1	62,6
	55	62	2	142,0
	27	64	1	6,8
	19	66	1	9,3
	73	74	1	58,3
	62	73	1	73,2
	45	81	1	13,3
	64	74	1	13,3
	19	82	1	13,3
	82	85	1	89,9
	68	86	1	8,28
	Total		18	650,41

TABELA 9. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO DE REDE MARGINAL.

Sistema	Barra i	Barra j	Número	Custo
Garver	2	6	4	30
	3	5	1	20
	4	6	2	30
	Total		7	200
IEEE 24 Barras	6	10	1	16
	7	8	2	16
	10	12	1	50
	14	16	1	54
	Total		5	152
Colombia 93 Barras	52	88	1	34,2
	43	88	2	39,6
	27	89	1	13,3
	74	89	1	14,6
	56	81	1	32,9
	55	57	1	46,8
	55	84	1	26,7
	56	57	1	62,6
	1	59	1	6,2
	3	71	2	5,2
	55	62	2	71
	40	42	1	5,2
	69	70	1	6,2
	16	21	1	6,9
	18	58	1	5,7
	18	21	1	7,5
	27	29	4	5,1
	19	66	1	9,3
	73	74	1	58,3
	62	73	1	73,2
	45	81	1	13,3
	19	82	1	13,3
	82	85	1	89,9
	68	86	1	8,3
	Total		30	786,4

A. Comparação dos algoritmos em relação aos resultados obtidos nos 3 sistemas testados

A efetividade dos algoritmos foi comparada em relação ao número de iterações que o algoritmo precisou para dar a resposta e em relação ao valor do investimento de acordo com a resposta achada.

A primeira comparação é apresentada na Fig. 1, onde se observa que o número de iterações difere de um caso para outro, principalmente nos sistemas de maior porte, enquanto que nos sistemas menores o número de iterações pode-se dizer que é praticamente o mesmo. O algoritmo de mínimo esforço apresentou o pior desempenho em relação as interações, enquanto o algoritmo de Villasana-Garver foi o de melhor comportamento em este aspecto.

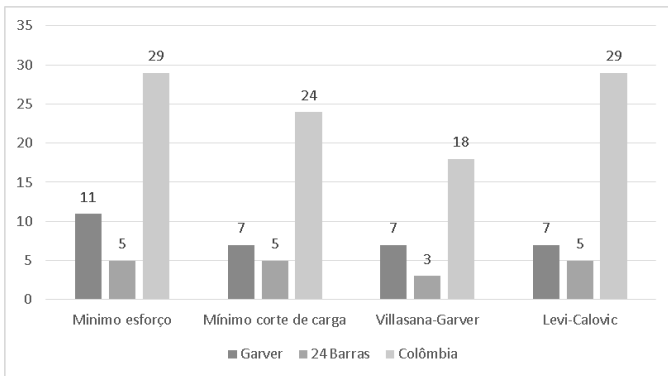


Fig 1. Comparação entre as diferentes heurísticas em relação ao número de iterações.

Em relação ao valor de investimento obtido observa-se na Fig 2 que para o sistema de 6 barras, todos os algoritmos conseguiram obter a resposta ótima. Desta forma, destaca-se a vantagem em se testar os algoritmos em sistemas maiores, para não tirar conclusões errôneas (como por ex: todos algoritmos convergem para a solução ótima). Com exceção do sistema IEEE de 24 barras, o algoritmo de Villasana-Garver obteve sempre as melhores respostas em relação ao investimento. Com os algoritmos de mínimo esforço e Levi-Calovic foram obtidos resultados muito similares nos três sistemas de teste.

Em geral, o algoritmo de Villasana-Garver teve um melhor desempenho em relação aos outros.

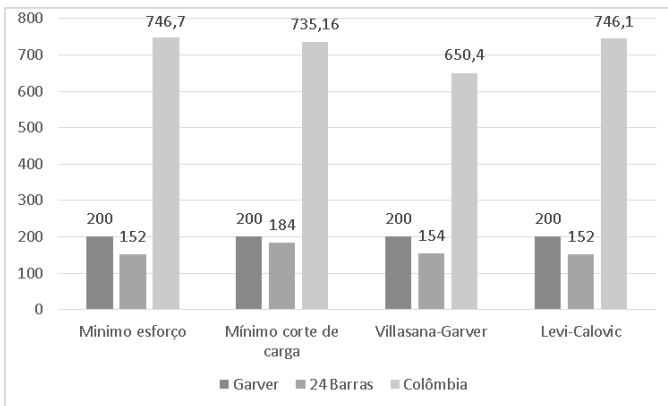


Fig 2. Comparação entre as diferentes heurísticas em relação ao valor do investimento da resposta achada

V. CONCLUSÕES

Os algoritmos construtivos, permitem encontrar soluções factíveis dos sistemas, mas para sistemas maiores as respostas ficam muito longe das ótimas reportadas na literatura especializada. Desse jeito, é evidente que estes algoritmos podem ficar presos em pontos ótimos locais.

Os algoritmos construtivos mostraram necessitar da fase de Poda, dado que normalmente estes índices de sensibilidade adicionam muitos caminhos redundantes. A forma como seja implementada a fase de poda, pode afetar a solução achada pelo algoritmo.

Os algoritmos construtivos podem ser úteis para obter populações iniciais para outras técnicas de solução baseadas em

algoritmos meta-heurísticos como *simulated annealing*, algoritmos genéticos, busca tabu entre outros.

Além disso os algoritmos heurísticos construtivos têm a vantagem que são modelos matemáticos lineares, para os quais tem-se muitas ferramentas de solução que podem facilitar sua implementação.

REFERÊNCIAS

- [1] L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-89, pp. 1688–1697, Sept./Oct. 1970.
- [2] R. S. Chanda and P. K. Bhattacharjee, "Application of computer software in transmission expansion planning using variable load structure," Electric Power Systems Research, no. 31, pp. 13–20, 1994.
- [3] K. J. Kim, Y. M. Park, and K. Y. Lee, "Optimal long term transmission expansion planning based on maximum principle," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, pp. 1494–1501, Nov. 1988.
- [4] R. Villasana, L. L. Garver, and S. L. Salon, "Transmission network planning using linear programming," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-104, pp. 349–356, Feb. 1985.
- [5] J. C. Kaltenbatch, J. Peshon, and E. H. Gehrig, "A mathematical optimization technique for the expansion of electrical power transmission systems," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-89, pp. 113–119, Feb. 1970.
- [6] Y. P. Dusonchet and A. H. El-Abiad, "Transmission planning using discrete dynamic optimization," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-92, pp. 1358–1371, July 1973.
- [7] H. K. Youssef and R. Hackam, "New transmission planning model," IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 9–18, Feb. 1989.
- [8] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp. 560–565, Aug. 2001.
- [9] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, and R. Romero, "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model," Proc. Inst. Elect. Eng.—Gen. Transm. Dist., vol. 147, pp. 149–156, May 2000.
- [10] A. Seifu, S. Salon, and G. List, "Optimization of transmission line planning including security constraints," IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 1507–1513, Oct. 1989.
- [11] A. Santos, P. M. França, and A. Said, "An optimization model for longrange transmission expansion planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, pp. 94–101, Feb. 1989.
- [12] A. Sharifnia and H. Z. Aashtiani, "Transmission network planning: A method for synthesis of minimum-cost secure

networks,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-104, pp. 2026–2034, Aug. 1985.

[13] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb, R. J. Bennon, and J. A. Juves, “Optimal long range transmission planning with AC load flow,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101, pp. 4156–4163, Oct. 1982. 944 IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003

[14] S. T. Lee, K. L. Hocks, and E. Hnyilicza, “Transmission expansion using branch-and-bound integer programming with optimal cost-capacity curves,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-93, pp. 1390–1400, July 1974

[15] L. M. V. G. Pinto and A. Nunes, “A model for the optimal transmission expansion planning,” in Proc. 10th Power Syst. Comput. Conf., 1990, pp. 16–23.

[16] M. V. Pereira and L. M. V. G. Pinto, “Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-104, pp. 381–389, Feb. 1985.

[17] A. O. Ekwue and B. J. Cory, “Transmission system expansion planning by interactive methods,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-103, pp. 1583–1591, July 1984.

[18] A. O. Ekwue, “Investigations of the transmission systems expansion problem,” Electrical Power and Energy Systems, vol. 6, pp. 139–142, July 1984.

[19] A. Monticelli, A. Santos Jr, M. V. F. Pereira, S. H. F. Cunha, B. J. Parker, and J. C. G. Praça, “Interactive transmission network planning using a least-effort criterion,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101, pp. 3919–3925, Oct. 1982.

[20] R. J. Bennon, J. A. Juves, and A. P. Meliopoulos, “Use of sensitivity analysis in automated transmission planning,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101, pp. 53–59, Jan. 1982.

[21] H. D. Limmer, “Long-Range Transmission Expansion Models,” TPS 79–728 EPRI EL1569, 1980.

[22] C. Dechamps and E. Jamouille, “Interactive computer program for planning the expansion of meshed transmission networks,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 2, pp. 103–108, Apr. 1980.

[23] C. Serna, J. Durán, and A. Camargo, “A model for expansion planning of transmission systems, a practical application example,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-97, pp. 610–615, Mar./Apr. 1978

[24] A.H. Dominguez, “Planeamiento de la expansion de redes de transmission basado en cambio de tension (Tesis de pregrado),” Pereira, Universidad Tecnologica de Pereira, 2012

[25] A. Duque, L. Escobar, J. Melchor and A. Escobar, “Identificacion de variables principales en el planeamiento de redes de transmission usando tecnicas heuristicas basadas en PLE y PNLE,” Scientia et Technica, 18 (1), 42-50, 2013.

[26] G. A. Gallego, “Algoritmos GRASP y simulated annealing como inicializadores de Branch and Bound en la solucion de planeamiento estatico de sistemas de transmission tension (Tesis de pregrado),” Pereira, Universidad Tecnologica de Pereira, 2008.

[27] J. N. Melchor, L.M. Escobar, A.Duque and A. H. Escobar “Planeamiento de la expansion de redes de transmission usando restricciones especializadas basadas en areas,” Épsilon (22), 129-149, 2014.

[28] R. Rubén and A. Monticelli, *Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica*, vol. 8. Campinas, 2000.

[29] R. Romero, a. Monticelli, A. V Garcia, and S. Haffner, “Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning,” IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 149, pp. 27–36, 2002.

[30] M. Zeinaddini-Maymand, M. Rashidinejad, M. Mohammadian, a. Mahmoudabadi, H. Khorasani, and M. Rahmani, “An application of a modified constructive heuristic algorithm to transmission expansion planning,” 2011 IEEE Trondheim PowerTech, pp. 1–5, 2011

[31] L. A. Gallego Pareja, R. A. Romero, and J. M. López Lezama, “Planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión considerando contingencias y demanda incierta,” Rev. Fac. Ing., pp. 188–200, 2009

[32] V.A. Levi and M.S. Calovic, "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, Aug 1991
doi: 10.1109/59.119232

APÊNDICE: SISTEMAS TESTADOS

A. Garver de 6 Barras.

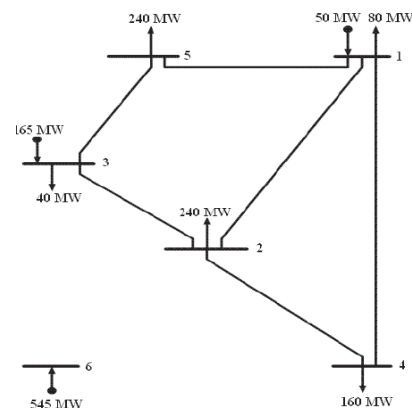


Fig 7. Configuração inicial para o Sistema de 6 Barras

TABELA 5. DADOS DAS BARRAS DO SISTEMA GARVER 6 BARRAS

Barra	Tipo Barra	Geração	Demanda
1	3	50	80
2	0	0	240
3	0	165	40
4	0	0	160
5	0	0	240
6	0	545	0

TABELA 6. DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA GARVER 6 BARRAS

Ni	Nj	Nij	Xij	FijMax	Custo	NijMax
1	2	1	0.4	100	40	5
1	3	0	0.38	100	38	5
1	4	1	0.6	80	60	5
1	5	1	0.2	100	20	5
1	6	0	0.68	70	68	5
2	3	1	0.2	100	20	5
2	4	1	0.4	100	40	5
2	5	0	0.31	100	31	5
2	6	0	0.3	100	30	5
3	4	0	0.59	82	59	5
3	5	1	0.2	100	20	5
3	6	0	0.48	100	48	5
4	5	0	0.63	75	63	5
4	6	0	0.3	100	30	5
5	6	0	0.61	78	61	5

TABELA 7. DADOS DAS BARRAS DO SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS

Barra	Tipo Barra	Geração	Demanda
1	0	576	324
2	0	576	291
3	0	0	540
4	0	0	222
5	0	0	213
6	0	0	408
7	0	900	375
8	0	0	513
9	0	0	525
10	0	0	585
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	1773	795
14	0	0	582
15	0	645	951
16	0	465	300
17	0	0	10
18	0	1200	999
19	0	0	543
20	0	0	384
21	0	1200	0
22	0	900	0
23	1	1980	0
24	0	0	0

B. IEEE de 24 Barras

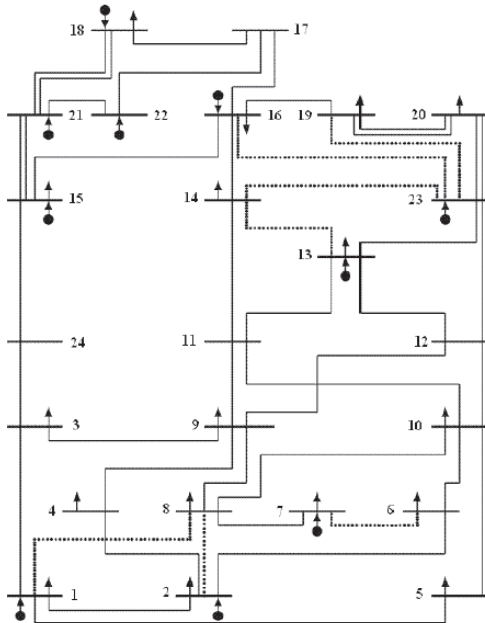


Fig 8. Configuração inicial para o Sistema IEEE de 24 barras

TABELA 8. DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS

Ni	Nj	Nij	Xij	FijMax	Custo	NijMax
1	2	1	0,0139	175	3	5
1	3	1	0,2112	175	55	5
1	5	1	0,0845	175	22	5
2	4	1	0,1267	175	33	5
2	6	1	0,192	175	50	5
3	9	1	0,119	175	31	5
3	24	1	0,0839	400	50	5
4	9	1	0,1037	175	27	5
5	10	1	0,0883	175	23	5
6	10	1	0,0605	175	16	5
7	8	1	0,0614	175	16	5
8	9	1	0,1651	175	43	5
8	10	1	0,1651	175	43	5
9	11	1	0,0839	400	50	5
9	12	1	0,0839	400	50	5
10	11	1	0,0839	400	50	5
10	12	1	0,0839	400	50	5
11	13	1	0,0476	500	66	5
11	14	1	0,0418	500	58	5
12	13	1	0,0476	500	66	5
12	23	1	0,0966	500	134	5
13	23	1	0,0865	500	120	5
14	16	1	0,0389	500	54	5
15	16	1	0,0173	500	24	5
15	21	2	0,049	500	68	5
15	24	1	0,0519	500	72	5
16	17	1	0,0259	500	36	5
16	19	1	0,0231	500	32	5
17	18	1	0,0144	500	20	5
17	22	1	0,1053	500	146	5
18	21	2	0,0259	500	36	5
19	20	2	0,0396	500	55	5
20	23	2	0,0216	500	30	5
21	22	1	0,0678	500	94	5
1	8	0	0,1344	500	35	5
2	8	0	0,1267	500	33	5
6	7	0	0,192	500	50	5
13	14	0	0,0447	500	62	5
14	23	0	0,062	500	86	5
16	23	0	0,0822	500	114	5
19	23	0	0,0606	500	84	5

C. Sistema Colombiano de 93 Barras

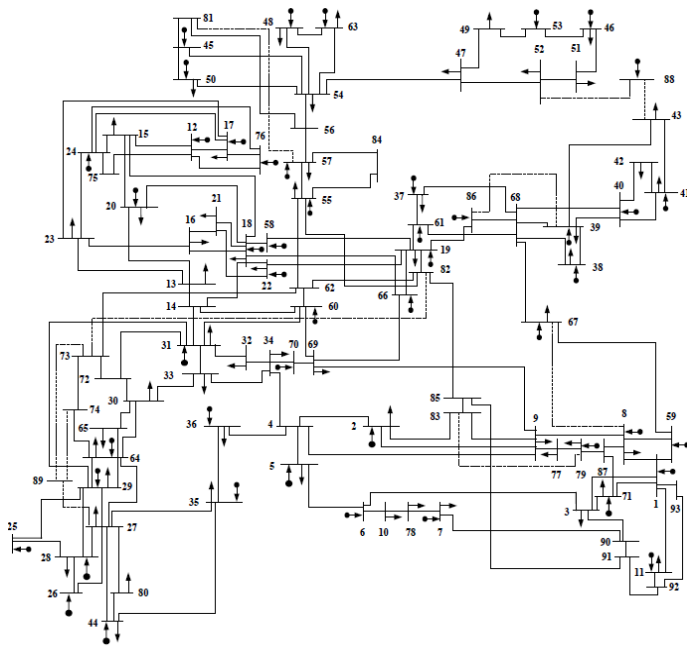


Fig 9. Configuração inicial para o Sistema Colombiano de 93 barras