

# Redução do Espaço de Busca de Redes de Distribuição Reconfiguráveis Utilizando Grafos

Leroy U. Ramos\*, Niraldo R. Ferreira\*, Fernando A. Moreira\*, Huilman S. Sanca, e Benemar. A. de Souza†

\*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia - (UFBA)

Rua Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630, Salvador, Bahia, Brazil

†Universidade Federal de Campina Grande - (UFCG)

Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brazil

Emails: leroy.umasi@gmail.com, niraldo@ufba.br, moreira@ufba.br, huilman.sanca@gmail.com, benemar@ieee.org

**Resumo**—Este artigo traz um estudo sobre a redução do espaço de busca na reconfiguração de uma rede interligada de forma esparsa com o objetivo de minimizar as perdas na operação de sistemas de distribuição de energia. Atualmente nos sistemas de distribuição tem-se que lidar com sistemas em larga escala, sua natureza combinatória é responsável pelo crescimento exponencial do custo computacional em função do número de chaves da rede. Para reconfigurar a rede em tempo real é preciso reduzir o espaço de busca do algoritmo é descartar as opções que não cumprem com as condições de operação. O algoritmo de fluxo de carga MSP é utilizado para calcular a perda ativa de cada etapa. Logo, se o sistema for de escala mediana procura-se a configuração ótima em todo o espaço de busca utilizando a força bruta, se for um sistema grande utilizam-se outras metodologias sob os grafos reduzidos, como pode ser o algoritmo das formigas, um algoritmo heurístico ou adaptativo, etc.

**Index Terms**—

Sistemas de Distribuição Radial, Sistemas de energia elétrica, Teoria de Grafos, Otimização combinatoria, Heurística

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente, tem havido grande interesse na integração de um grande número de pequenas usinas de geração distribuída de energia elétrica. Isso vai exigir novas estratégias de controle em tempo real para o desempenho eficiente do sistema. O desenvolvimento da humanidade está intimamente ligado ao uso da energia em suas diversas formas. Consolidar este desenvolvimento significa, entre outras coisas, garantir que as fontes de energia estejam disponíveis em níveis suficientes e, de igual forma, acessíveis para garantir a demanda de energia que sustenta o desenvolvimento da sociedade moderna. A reconfiguração em tempo real é uma necessidade para otimizar os recursos na rede elétrica e atender a demanda dependendo do horário e necessidades específicas. A reconfiguração da rede, quando feita de modo eficiente, pode reduzir os custos da operação e postergar investimentos para a expansão da capacidade de fornecimento de energia do sistema, investimentos esses que seriam feitos na construção de novos alimentadores e subestações[1].

## II. OBJETIVO

O objetivo é reduzir o espaço de busca da rede física para configurar uma rede de distribuição radial. Aplica-se

posteriormente um algoritmo de fluxo de carga e um método de busca para obter uma configuração ótima da rede. Os objetivos específicos são:

- Identificar os super-ramos e super-linhas da rede.
- Identificar os *loops* na rede.
- Pre-cálculo aproximado das perdas da rede.
- Estabelecer a melhor escolha da configuração de abertura das chaves.
- Determinar ramos críticos da rede elétrica.

## III. TÉCNICAS DE RECONFIGURAÇÃO

### A. Heurísticas

Em 1988 foi proposta a heurística conhecida como “troca de ramos” (*branch-exchange*).[2] Este mecanismo é a dedução de uma expressão matemática, utilizada para encontrar a redução da perda ( $\Delta P$ ) de potência através da transferência de carga. O método realiza uma busca a procura de um melhor chaveamento sem a necessidade de resolver problemas de fluxo de carga adicionais, utilizando apenas a equação[3]:

$$\Delta P = Re \left\{ 2 \left( \sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (1)$$

Sendo:

- $D$  conjunto de barras que são desconectadas do alimentador 2 e conectadas ao alimentador 1;
- $m$  barras do alimentador 1 nas quais as cargas do alimentador 2 serão conectadas;
- $n$  barras do alimentador 2 que serão conectadas a barra  $m$  através de uma chave de interconexão;
- $I_i$  corrente complexa na barra  $i$ ;
- $R_{loop}$  resistência série do ramo de conexão das duas barras de interconexão dos alimentadores 1 e 2 através do fechamento da chave de interconexão especificada;

$E_m$  componente de  $E = R_{bus} I_{bus}$  correspondente a barra  $m$ .  $R_{bus}$  e a matriz de resistência nodal do alimentador 1 antes da transferência de carga.  $I_{bus}$ , é o vetor de correntes das barras para o alimentador 1;

$E_n$  análogo a  $E_m$ , porém definido para a barrando alimentador 2;

$R_e, *, ||$  parte real, conjugado complexo e valor absoluto, respectivamente.

Em 1989, Mesut E. Baran e Felix F. Wu propuseram modificações no algoritmo de Civanlar et al. (1988), formando uma nova metodologia utilizando equações de fluxo de carga simplificadas e realizando um cálculo aproximado das perdas nos ramos[4]:

$$\Delta P = r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (2)$$

### B. Algoritmos Genéticos

Na aplicação do algoritmo genético no problema de reconfiguração, os trabalhos descrevem um indivíduo do algoritmo genético como sendo uma solução para o problema de reconfiguração[5].

### C. Colônia de Formigas

Em 1992 surgiu uma nova metaheurística chamada colônia de formigas ou ACO do inglês “*ant colony optimization*”. As formigas são capazes de selecionar o menor caminho para uma determinada fonte de alimento de forma cooperativa, utilizando uma substância chamada feromônio [6]. A minimização das perdas de potência ativa é um problema não linear e de natureza combinatória em razão dos estados das chaves manobráveis. Outro aspecto que eleva a complexidade do problema são os requisitos da rede ser radial e conexa [7], as perdas ativas e reativas são calculadas por:

$$\Delta P_i = \frac{R_i (P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = \frac{X_i}{R_i} \Delta P_i \quad (4)$$

A formiga escolhe a próxima barra a ser visitada com base em seu próprio conhecimento (resistência das ligações entre a barra que está e as vizinhas) e no conhecimento coletivo (quantidade de feromônio depositado em cada uma dessas mesmas ligações). O conhecimento coletivo é cumulativo, sendo alterado sempre que uma nova configuração radial se completa.

### D. Redes Neurais Artificiais

No ano de 1993 pesquisadores coreanos propuseram a resolução do problema de reconfiguração através de Redes Neurais Artificiais do tipo Perceptron multicamadas, descrita por [8]. Em 2006 para resolver o problema de reconfiguração apresentaram uma rede neural artificial do tipo Perceptron Multicamadas [9].

### E. Otimização Clássica

Esta metodologia de resolução requer maior tempo computacional. Em 1975 foi realizada a resolução do problema de reconfiguração para um sistema de 10 barras, utilizando a técnica de programação inteira de *branch-and-bound*, encontrando uma configuração de boa qualidade com mínimas perdas[10]. No ano de 1990 o pesquisador Vlastimir Glamocanin resolveu o problema de reconfiguração, como um problema de transporte com custos quadráticos[11]. Várias modificações foram inseridas no problema de transporte com custo quadrático como limites de tensão e correntes no sistema[6].

## IV. METODOLOGIA

O número de combinações de rede possíveis na qual a solução ótima pode ser encontrada é dado pela expressão:

$$C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (5)$$

Onde:  $n$  é o número total de chaves e  $p$  é o número total de chaves NA (normalmente aberta).

No presente artigo trabalharemos com *super-nós* e *super-linhas*, as quais são as linhas e nós do grafo simplificado de um sistema de distribuição reconfigurável.

Na Figura 1 temos um sistema típico de rede de distribuição em configuração radial. O objetivo é reduzir o espaço de busca para encontrar a configuração ótima da rede abrindo chaves e dividindo a rede. Na Tabela I temos as matrizes de adjacência do sistema S5.

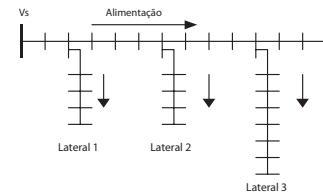


Figura 1. Sistema radial de distribuição típico.

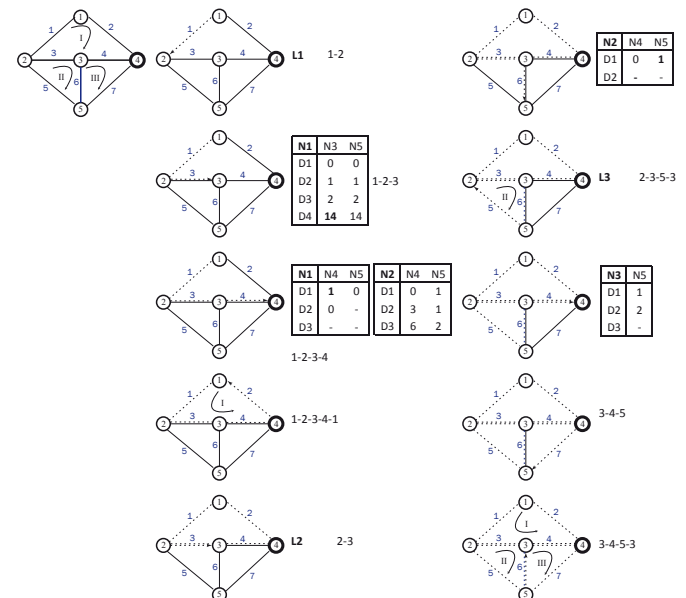


Figura 2. Loops do sistema S-5.

Tabela I  
MATRIZES DE ADJACÊNCIA S-5.

Adj <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>3</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>4</sup>	1	2	3	4	5	
1	0	1	0	1	0	1	2	0	2	0	2	1	0	6	2	6	2	1	12	4	14	4	14	14
2	1	0	1	0	1	2	0	3	1	3	1	2	6	2	7	2	7	2	4	20	11	20	11	18
3	0	1	0	1	1	3	2	1	3	1	2	3	2	7	4	7	5	3	14	11	19	11	18	18
4	1	0	1	0	1	4	0	3	1	3	1	4	6	2	7	2	7	4	4	20	11	20	11	18
5	0	1	1	1	0	5	2	1	2	1	3	5	2	7	5	7	4	5	14	11	18	11	19	19

N1	2	Adj <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>3</sup>	1	2	3	4	5
N2	3	1	0	0	2	0	2	1	0	3	2	3	2	1	8	4	8	4	8
N3	3	2	0	0	1	3	1	2	4	2	4	2	4	2	4	11	8	11	8
N4	3	3	2	1	0	1	2	3	2	4	4	4	2	3	10	8	10	8	12
N5	3	4	0	3	1	0	1	4	4	2	4	2	4	4	4	11	8	11	8
		5	2	1	2	1	0	5	2	4	2	4	4	5	10	8	12	8	10

Adj <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	Adj <sup>3</sup>	1	2	3	4	5
1	0	0	2	0	2	1	0	3	2	3	2	1	4	4	8	4	8
2	0	0	1	3	1	2	4	2	4	2	4	2	4	5	8	11	8
3	2	1	0	1	2	3	2	4	4	4	2	3	10	8	4	8	12
4	0	3	1	0	1	4	4	2	4	2	4	4	4	11	8	5	8
5	2	1	2	1	0	5	2	4	2	4	4	5	10	8	12	8	4

Na Tabela II temos o cálculo do espaço de busca do sistema S5. Com os dados de número de linhas de um laço (Lines), número de linhas adjacentes (N lateral) e um algoritmo iterativo se calcula o número total de combinações por iteração (All) e o número simplificado de combinações eliminando redundâncias (Result).

Tabela II  
ESPAÇO DE BUSCA S-5.

Loop	Lines	N lateral	All	Last	Result	Discount	Saving
1	4	0	4	4	4	0	0,00%
2	3	1	12	12	11	1	8,33%
3	3	2	36	33	25	4	24,24%

#### A. Algoritmo de simplificação de um sistema reconfigurável.

Dividimos o problema em duas partes:

- A partir dos dados de linha construir um grafo simplificado que represente o sistema reconfigurável.
- Em cada iteração da reconfiguração, para cada super-linha da rede, pré-calcular um valor aproximado das perdas a partir da soma de impedâncias.
- Finalmente em cada iteração para avaliar as configurações utilizar o método da soma de potência, Newton-Rapson ou qualquer outro método para calcular o fluxo de carga utilizando força bruta, estratégias modificadas do algoritmo de formigas, método de Monte Carlo, algoritmos genéticos, redes neurais ou heurísticos atuando sob o grafo reduzido.

O algoritmo para construir o grafo que represente o sistema é o seguinte:

- Extrair os vetores K e M de origem e fim das linhas de transmissão, ordenar ambos os vetores tanto no seu sentido direto como no inverso.
- Identificar as barras de derivação, as quais no grafo daremos o nome de super-nós, enumerar as barras vizinhas de cada barra para fazer o seguimento de cada super-linha para construir o grafo simplificado e para voltar ao sistema expandido.
- Utilizando os dados das barras vizinhas, fazer uma varredura sequencial nos vetores K-M ordenados para encontrar as super-linhas que partem e terminam num super-nó
- Simplificar a lista de super-linhas eliminando os vetores duplicados ou refletidos.
- Utilizando as super-linhas procurar os *loops* simples que partem e finalizam no mesmo super-nó.

- Expandir os *loops* com os dados das super-linhas e numerá-los a pertencência de cada linha e super-linha.

Para utilizar a informação anterior para a reconfiguração da rede, o número de chaves a serem abertas são iguais ao número de *loops* mais um.

#### B. Cálculo de Fluxo de Carga em distribuição:

Para a determinação do estado de uma rede radial, podem ser utilizados outros métodos de fluxo de carga bem menos onerosos do ponto de vista computacional, e com igual eficiência. Existem duas linhas básicas de pesquisa no desenvolvimento de métodos eficientes de cálculo de fluxo de carga para redes de distribuição:

- Modificações do método de Newton (e de suas versões)
- Back-forward sweep A grande maioria dos métodos exploram o fato de que as redes de distribuição operam de forma radial, sendo que alguns admitem a existência de poucas malhas na rede (weakly meshed systems).[1]

O método da soma de potência – MSP é um método de cálculo de fluxo de carga iterativo nas variáveis perdas de potência ativa e reativa do tipo *forward-backward*. Ou seja, se começa supondo que as perdas em todos os trechos são nulas (ou tenha outro valor qualquer) e em cada iteração as estimativas dessas perdas vão melhorando. Com as perdas consideradas nulas, se calcula a tensão em todas as barras ligadas diretamente à barra da subestação, na qual a tensão é dada. Depois, se calculam as tensões em todas as barras ligadas àquelas que estão ligadas diretamente à subestação (cujas tensões já foram calculadas) e assim por diante. Findo esse primeiro estágio (*forward*) se tem valores aproximados de todas as tensões de barra. Aproximados porque foram calculados supondo que as perdas eram nulas. Com os valores de tensão conhecidos, se calculam as perdas em todos os trechos e então se corrigem os fluxos em um processo *backward*. O processo completo (*forward-backward*) continua enquanto a variação nas perdas totais for maior que uma tolerância previamente escolhida ou se eventualmente o limite de iterações for excedido.[7]

#### C. Cálculo de fluxo de carga e perdas

Na primeira etapa utilizaremos uma aproximação das perdas desenvolvida em[7]. Na próxima etapa será utilizada o método de Newton-Raphson para cada sub-rede radial em desenvolvimento. O cálculo das perdas ativas e reativas são os seguintes:

$$\Delta P_i = \frac{R_i (P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = \frac{X_i}{R_i} \Delta P_i \quad (7)$$

## V. RESULTADOS

#### A. Sistema 16 barras.

Na Figura 3 temos um sistema típico da literatura de sistemas de distribuição reconfiguráveis, S-16. Ao ser um sistema com laço único e dois barras de alimentação, pode-se resolver visualmente, precisamos abrir duas linhas para ter um sistema radial.

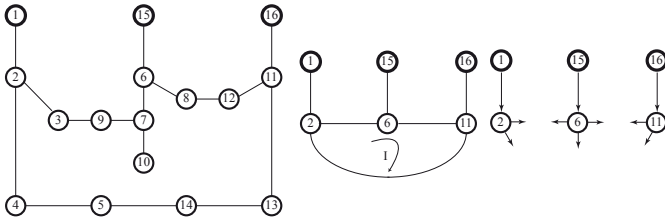


Figura 3. Loops do sistema S-16.

**B. Sistema 12 barras.**

Utilizaremos o sistema reconfigurável de 12 barras da Figura 4. Na Tabela III são apresentados os dados de rede[7]. A Tabela IV é a representação dos vetores utilizados para identificar os super-nós no sentido direto como no inverso.

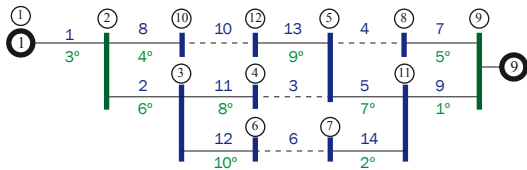


Figura 4. Sistema de 12 barras.

Tabela III  
SISTEMA 12 BARRAS - DADOS.

trecho	barra		resist. Ω	reat. Ω	barra		
	K	M			carga		
					MW	Mvar	
1	1*	2	2	3	2	0,4	0,6
2	2	3	3	4	3	0,6	0,5
3	5	4	3	4	4	0,6	0,4
4	8	5	4	3	5	0,8	0,2
5	11	5	3	4	6	0,9	0,1
6	6	7	4	5	7	0,8	0,2
7	9*	8	2	3	8	0,7	0,1
8	2	10	3	2	10	0,7	0,4
9	9	11	2	3	11	0,8	0,2
10	10	12	3	2	12	0,6	0,5
11	3	4	1	1			
12	6	3	1	2			
13	5	12	2	1			
14	11	7	2	2			

Num Bus K: 2 5 9 11  
Num Bus M: 3  
Super-Nós: 2, 3, 5, 9, 11

Tabela IV  
SISTEMA 12 BARRAS - VETORES.

K	M	K	M
1	2	1	2
2	3	2	3
2	10	7	3
3	4	3	4
5	4	5	4
5	12	8	5
6	7	11	5
7	3	11	6
8	5	6	7
9	8	9	8
9	11	2	10
10	12	9	11
11	5	5	12
11	6	10	12

Fazendo o seguimento das linhas de um super-nó a outro super-nó, na Tabela V temos o conjunto simplificado de super-linhas. Na Tabela VI temos o conjunto simplificado de loops simples, de super-nó a super-nó. Na Figura 5 temos o grafo simplificado, identificamos os loops temos um exemplo de configuração radial do sistema.

Tabela V  
SISTEMA 12 BARRAS - SIMPLIFICAÇÃO.

Super Linhas				Final	
1	2			1	2
2	3			2	3
2	10	12	5	2	5
3	7	6	11	3	11
5	4	3		5	3
9	8	5		9	5
9	11			9	11
11	5			11	5

Tabela VI  
SISTEMA 12 BARRAS - Loops, SIMPLIFICADO E EXPANDIDO.

Laços							
L1	2	10	12	5	4	3	2
L2	5	8	9	11	5		
L3	3	4	5	11	6	7	3

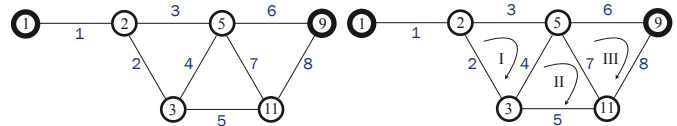


Figura 5. Sistema 12 barras, grafo.

Na Figura 4 temos 12 barras e 4 loops, então pela equação 5 temos:

$$C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!} = 495 \quad (8)$$

Utilizando o grafo simplificado da Figura 6 o espaço de busca fica reduzido a 15. A utilização da simplificação por grafos reduz os cálculos num fator de 33. Na Figura 6 temos um exemplo de solução de configuração utilizando super-nós do sistema de 12 barras. Na Figura 7 temos o universo de busca simplificado do sistema S12, são 24 configurações.

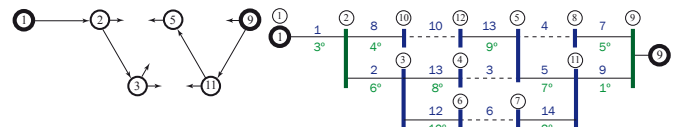


Figura 6. Sistema 12 barras, configuração utilizando grafos.

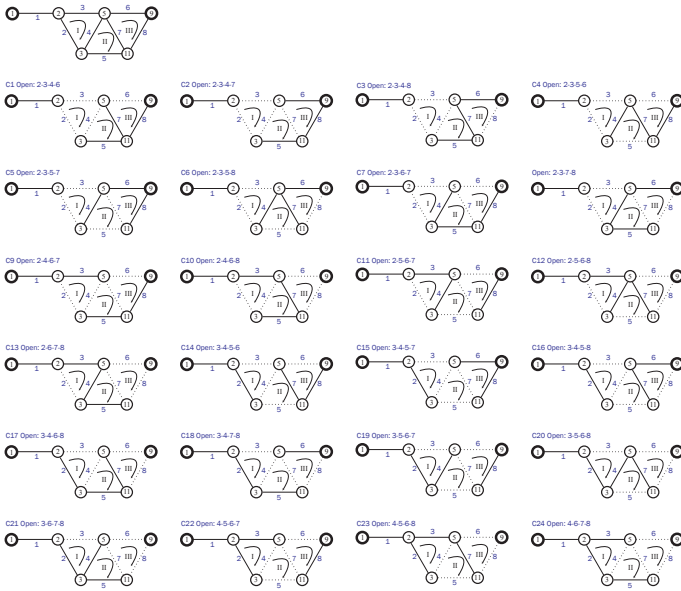


Figura 7. Loops do sistema S-12.

Tabela VII  
SISTEMA 70 BARRAS - DADOS.

Barras N°	K	M	R (Ω)	IR (Ω)	PL (kW)	QL (kVAr)	Barras N°	K	M	R (Ω)	IR (Ω)	PL (kW)	QL (kVAr)
1	1	2	1,097	1,074	100	90	41	39	40	0,540	0,367	60	35
2	2	3	1,463	1,432	60	40	42	40	41	1,080	0,734	120	70
3	3	4	0,731	0,716	150	130	43	41	42	1,836	1,248	90	60
4	4	5	0,366	0,358	75	50	44	42	43	1,296	0,881	18	10
5	5	6	1,828	11,790	15	9	45	40	44	1,188	0,807	16	10
6	6	7	1,097	1,074	18	14	46	44	45	0,540	0,367	100	50
7	7	8	0,731	0,716	13	10	47	42	46	1,080	0,734	60	40
8	8	9	0,731	0,716	16	11	48	35	47	0,540	0,367	100	50
9	4	10	1,080	0,734	20	10	49	47	48	1,080	0,734	85	55
10	10	11	1,620	1,101	16	9	50	48	49	1,080	0,734	100	70
11	11	12	1,080	0,734	50	40	51	49	50	1,080	0,734	140	90
12	12	13	1,350	0,917	105	90	52	70	51	0,366	0,358	60	40
13	13	14	0,100	0,550	25	15	53	51	52	1,463	1,432	20	11
14	14	15	1,944	1,321	40	25	54	52	53	1,463	1,432	40	30
15	7	68	1,080	0,734	100	60	55	53	54	0,914	0,895	36	24
16	68	69	1,620	1,101	40	25	56	54	55	1,097	1,074	30	20
17	1	16	1,097	1,074	60	30	57	55	56	1,097	1,074	43	30
18	16	17	0,366	0,358	40	25	58	52	57	0,270	0,183	80	50
19	17	18	1,463	1,432	15	9	59	57	58	0,270	0,183	240	120
20	18	19	0,914	0,895	13	7	60	58	59	0,810	0,550	125	110
21	19	20	0,804	0,787	30	20	61	59	60	1,296	0,881	25	10
22	20	21	1,133	1,110	90	50	62	55	61	1,188	0,807	10	5
23	21	22	0,475	0,465	50	30	63	61	62	1,188	0,807	150	130
24	17	23	2,214	1,505	60	40	64	62	63	0,810	0,550	50	30
25	23	24	1,620	1,110	100	80	65	63	64	1,620	1,101	30	20
26	24	25	1,080	0,734	80	65	66	62	65	1,080	0,734	130	120
27	25	26	0,540	0,367	100	60	67	65	66	0,540	0,367	150	130
28	26	27	0,540	0,367	100	55	68	66	67	1,080	0,734	25	15
29	27	28	1,080	0,734	120	70	69	9	50	0,908	0,726	-	-
30	28	29	1,080	0,734	105	70	70	9	38	0,381	0,244	-	-
31	70	30	0,366	0,358	80	50	71	15	46	0,681	0,544	-	-
32	30	31	0,731	0,716	63	40	72	22	67	0,254	0,203	-	-
33	31	32	0,731	0,716	13	8	73	29	64	0,254	0,203	-	-
34	32	33	0,804	0,787	16	9	74	45	60	0,254	0,203	-	-
35	33	34	1,170	1,145	50	30	75	43	38	0,454	0,363	-	-
36	34	35	0,768	0,752	40	28	76	39	59	0,454	0,363	-	-
37	35	36	0,731	0,716	60	40	77	21	27	0,454	0,363	-	-
38	36	37	1,097	1,074	40	30	78	15	9	0,681	0,544	-	-
39	37	38	1,463	1,432	30	25	79	67	15	0,454	0,363	-	-
40	32	39	1,080	0,734	150	100							

C. Sistema 70 barras.

Utilizaremos o sistema reconfigurável de 70 barras da Figura 8.

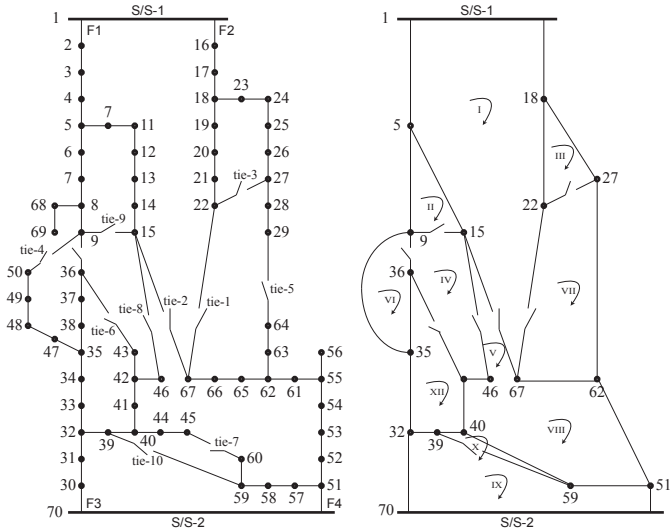


Figura 8. Sistema de 70 barras e Grafo equivalente.

Na Tabela VIII identificam-se 20 super-nó ou nós 20 barra de derivação, 16 no caminho de ida e 4 no caminho de volta. A Tabela VIII é a representação dos vetores utilizados para identificar os super-nós no sentido direto como no inverso.

Num Bus K: 1, 4, 7, 9, 15, 17, 21, 32, 35, 39, 40, 42, 52, 55, 62, 70.

Num Bus M: 27, 38, 59, 67.

Super-Nós: 1, 4, 7, 9, 15, 17, 21, 27, 32, 35, 38, 39, 40, 42, 52, 55, 59, 62, 67, 70.

Tabela VIII  
SISTEMA 70 BARRAS - VETORES.

K	M	K	M	K	M	K	M
1	2	33	34	1	2	37	38
1	16	34	35	2	3	43	38
2	3	35	36	3	4	32	39
3	4	35	47	4	5	39	40
4	5	36	37	5	6	40	41
4	10	37	38	6	7	41	42
5	6	39	40	7	8	42	43
6	7	39	59	8	9	40	44
7	8	40	41	15	9	44	45
7	68	40	44	4	10	15	46
8	9	41	42	10	11	42	46
9	38	42	43	11	12	35	47
9	50	42	46	12	13	47	48
10	11	43	38	13	14	48	49
11	12	44	45	14	15	9	50
12	13	45	60	67	15	49	50
13	14	47	48	1	16	70	51
14	15	48	49	16	17	51	52
15	9	49	50	17	18	52	53
15	46	51	52	18	19	53	54
16	17	52	53	19	20	54	55
17	18	52	57	20	21	55	56
17	23	53	54	21	22	52	57
18	19	54	55	17	23	57	58
19	20	55	56	23	24	39	59
20	21	55	61	24	25	58	59
21	22	57	58	25	26	45	60
21	27	58	59	21	27	59	60
22	67	59	60	26	27	55	61
23	24	61	62	27	28	61	62
24	25	62	63	28	29	62	63
25	26	62	65	70	30	29	64
26	27	63	64	30	31	63	64
27	28	65	66	31	32	62	65
28	29	66	67	32	33	65	66
29	64	67	15	33	34	22	67
30	31	68	69	34	35	66	69
31	32	70	30	35	36	7	68
32	33	70	51	36	37	68	69
32	39			9	38		

Na Tabela VII são apresentados os dados de rede[12].

Fazendo o seguimento das linhas de um super-nó a outro super-nó, na Tabela IX identifica-se um conjunto de superlinhas. Na Tabela X temos o conjunto simplificado e a lista expandida de cada *loop*. Na Figura 9 temos o grafo simplificado do sistema de 70 barras, a lista dos *loops* encontrados, e um exemplo de uma alternativa de configuração radial. Na Figura 4 temos 9 *loops*, então pela equação 5  $C_n^p = 3,9 \times 10^{11}$ , mas se for utilizado o grafo simplificado o espaço de busca fica reduzido a:  $C_n^p = 3 \times 10^7$ . A utilização da simplificação por grafos reduz os cálculos num fator de 12500 aproximadamente.

Tabela IX  
SISTEMA 70 BARRAS - SUPERLINHAS.

Super Linhas										Final	
1	2	3	4							1	4
1	16	17								1	17
4	5	6	7							4	7
4	10	11	12	13	14	15				4	15
7	8	9								7	9
7	68	69								7	69
9	38									9	38
9	50	49	48	47	35					9	35
15	9									15	9
15	46	42								15	42
15	67									15	67
17	18	19	20	21						17	21
17	23	24	25	26	27					17	27
21	22	67								21	67
21	27									21	27
32	33	34	35							32	35
32	39									32	39
35	36	37	38							35	38
38	43	42								38	42
39	40									39	40
39	59									39	59
40	41	42								40	42
40	44	45	60	59						40	59
52	53	54	55							52	55
52	57	58	59							52	59
55	56									55	56
55	61	62								55	62
62	63	64	29	28	27					62	27
62	65	66	67							62	67
70	30	31	32							70	32
70	51	52								70	52

Tabela X  
SISTEMA 70 BARRAS - Loops.

Laços									
L1	1	4	15	67	21	17	1		
L2	4	7	9	15	4				
L3	9	15	42	38	9				
L4	9	38	35	9					
L5	15	42	40	59	52	55	62	67	15
L6	17	21	27	17					
L7	21	27	62	67	21				
L8	32	35	38	42	40	39	32		
L9	32	39	59	52	70	32			
L10	39	40	59	39					

Laços																					
L1	1	2	3	4	10	11	12	13	14	15	67	22	21	20	19	18	17	16	1		
L2	4	5	6	7	8	9	15	14	13	12	11	10	4								
L3	9	15	46	42	43	38	9														
L4	9	38	37	36	35	47	48	49	50	9											
L5	15	46	42	41	40	44	45	60	59	58	57	52	53	54	55	61	62	65	66	67	15
L6	17	18	19	20	21	27	26	25	24	23	17										
L7	21	27	28	29	64	63	62	65	66	67	22	21									
L8	32	33	34	35	36	37	38	43	42	41	40	39	32								
L9	32	39	59	58	57	52	51	70	30	31	32										
L10	39	40	44	45	60	59	39														

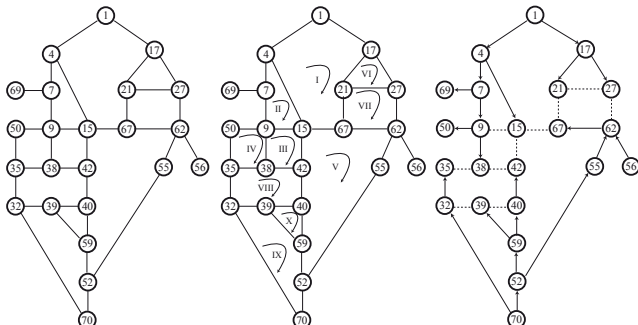


Figura 9. Sistema 70 barras, grafo.

## VI. CONCLUSÕES

Uma nova metodologia para reduzir o espaço de busca de soluções para redes reconfiguráveis foi proposta. Isto torna mais rápido para avaliar a rede em tempo real e se necessário reconfigurar ou fazer um reforço no sistema. Com um sistema simples de 12 barras de uma rede configurável e outro sistema de tamanho médio de 70 barras também configurável diminuímos o espaço de busca em 33 e 12500 vezes respectivamente. Foram identificados três *loops* no sistema de 12 barras e nove *loops* no sistema de 70 barras. Ambos trabalhando com duas barras de geração. O resultado promissor deste teste numérico incentiva o desenvolvimento desta linha de trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Guimarães, "Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, April 2005.
- [2] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 3, pp. 1217–1223, July 1988.
- [3] W. Zvietovich, "Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando metaheurística busca em vizinhança variável," Master's thesis, Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita Filho - UNESP, August 2006.
- [4] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [5] J. Z. Zhu, "Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 62, no. 1, pp. 37–42, 2002, lausanne.
- [6] F. S. Pereira, "Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.
- [7] B. Souza, J. Silva, and N. Ferreira, "Configuração Ótima de redes de distribuição aplicando um algoritmo colônia de formigas," *IEEE PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 1–6, 2010.
- [8] H. Kim, Y. Ko, and K. H. Jung, "Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1356–1366, 1993, new York.
- [9] H. Salazar, R. Gallego, and R. ROMERO, "Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1735–1742, 2006, new York.
- [10] A. Merlin and H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," *5th Power System Computation Conference (PSCC)*, vol. 1, pp. 1–18, September 1975, cambridge.
- [11] V. Glamocanin, "Optimal loss reduction of distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 72, no. 3, pp. 774–782, 1990, new York.
- [12] S. Das and D. Ghosh, "An efficient algorithm for loss minimization via network reconfiguration," *Electric Power Components and Systems*, vol. 31, no. 8, pp. 791–804, August 2003.