



DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO COMO SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Nelson Rodrigues Silva^{*1}, Luis Gustavo Wesz da Silva¹, Marcelo Escobar de Oliveira¹, Ghunter Paulo Viajante¹, Hugo Xavier Rocha¹

¹IFG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Resumo - Este artigo apresenta uma metodologia robusta e eficiente para o problema de restauração de sistemas de distribuição radiais. O modelo para resolver o problema de restauração em um sistema radial deve ter como objetivo principal restaurar o máximo de carga possível da região afetada em um curto prazo de tempo, garantindo confiabilidade e qualidade do serviço. O problema de restauração é de origem combinatória e originalmente é modelado como um problema de programação não linear inteira mista. A restauração é essencial para garantir a confiabilidade e qualidade do serviço além de reduzir o tempo de interrupção. O algoritmo desenvolvido é composto pela meta-heurística Busca Tabu e utiliza o conceito de grafos, lista de adjacência, para manter a topologia do sistema. Os testes são realizados utilizando o sistema de 53 barras da literatura e os resultados são apresentados e avaliados.

Palavras-Chave – Busca Tabu, Sistema de Distribuição de Energia, Meta-Heurística.

RESTORATION OF RADIAL DISTRIBUTION SYSTEMS BASED ON TABU SEARCH

Abstract - This article presents a robust and efficient methodology for the problem of restoring radial distribution systems. The model for solving the restoration problem in a radial system must have as main objective to restore the maximum possible load from the affected region in a short period of time, ensuring reliability and quality of service. The restoration problem is of combinatorial origin and is originally modeled as a mixed integer nonlinear programming problem. Restoration is essential to guarantee the reliability and quality of the service, as well as reducing the interruption time. The developed algorithm is composed by the meta-heuristic Tabu Search and uses the concept of graphs, adjacency list, to maintain the system topology. The tests are performed using the system of 53 bars of the literature and the results are presented and evaluated.

Keywords - Tabu Search, Energy Distribution System, Meta-Heuristic.

^{*}nelson.silva@academico.ifg.edu.br

NOMENCLATURAS

1-6 Chave entre as seções 1 e 6;

DEC Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;

FEC Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

I. INTRODUÇÃO

As interrupções no fornecimento de energia elétrica são imprevisíveis e ocasionadas por diversos fatores, geralmente ocorrem após uma falta em alguma seção do sistema. Para que o reparo seja efetuado pelos técnicos é necessário que se isole a região com defeito, porém isto demanda tempo, e devido a topologia radial dos sistemas aéreos de distribuição radiais, todos clientes localizados a jusante desta falta estarão consequentemente sem energia elétrica. A restauração destas partes desenergizadas é extremamente importante para as concessionárias, para garantir a confiabilidade e qualidade do serviço além de reduzir o tempo de interrupção. Essas interrupções são prejudiciais para a concessionária pois além de deixar de vender energia temporariamente, também deve compensar o cliente em caso do descumprimento dos índices coletivos de continuidade DEC e FEC [1].

Na literatura existem diversas técnicas baseadas em meta-heurísticas, heurísticas e otimização clássica como solução para o problema de restauração [2]. A solução para o problema de restauração consiste em reconfigurar a topologia do sistema de modo a garantir a continuidade do serviço restabelecendo a maior parcela possível do sistema desenergizado, cumprindo as restrições operacionais e físicas às quais a rede elétrica está sujeita.

Através de uma lógica combinatória o algoritmo desenvolvido, por meio de chaves que podem ser Normalmente Abertas (*NA*) ou Normalmente Fechadas (*NF*) que permitem a alteração da topologia do sistema, rearranjará estas chaves de forma a restaurar as áreas desenergizadas, levando-se em consideração a topologia radial do sistema e as restrições existentes, tais como fluxo de potência (de acordo com as leis de Kirchhoff), capacidade de corrente dos

condutores, limite de tensões nas barras, quantidade de chaveamentos e a velocidade.

Fonte: Próprio autor

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o problema de restauração, em [3] é citada algumas recomendações tais como desconsiderar objetivos externos como balanceamento de carga entre alimentadores e perdas de energia, e que o processo tem como objetivo fundamental restaurar a demanda máxima de energia da região afetada o mais rápido possível. Entende-se que o problema de restauração é complexo e da natureza combinatória, abaixo estarão listados o modelo matemático e as metodologias utilizadas.

A. Modelo Matemático

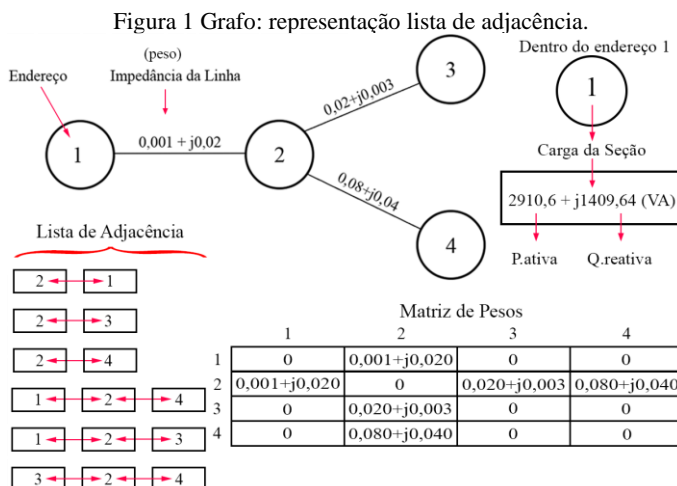
Minimizar {Número de chaveamentos & Cargas fora de serviço}.

Restrições consideradas:

- 1) Topologia radial do sistema;
- 2) O fluxo de potência de acordo com as leis de Kirchhoff;
- 3) Corrente máxima nas linhas;
- 4) Limites de tensão nas barras;
- 5) A quantidade máxima de chaveamentos realizados.

B. Grafo – Lista de Adjacência

Para manter a topologia do sistema foi utilizado o conceito de grafo representado por lista de adjacência (Figura 1), nesta estrutura, é possível manter para cada nó (seção) uma lista de todos os outros vértices com os quais ele tem uma aresta, e essa aresta pode ter um peso que é armazenado em um ponteiro duplo alocado de acordo com o número total de vértices dentro da estrutura, nas posições referentes aos nós, e ao mesmo tempo os números identificadores dos nós são posições, que também estão alocados dentro da estrutura porém em um ponteiro que opera como um vetor. A lista de adjacência pode ser empregada em diversas áreas da proteção, encontrando arestas e nós de interesse. Repare na Figura 1 que nas posições 1-2 e 2-1 da matriz está o peso, impedância de $0,001 + j0,020$ que também simboliza a existência de uma aresta entre estes nós, e que dentro da posição 1 está a carga referente a seção 1. Caso o grafo fosse dígrafo o peso estaria armazenado somente na posição do sentido existente [4].

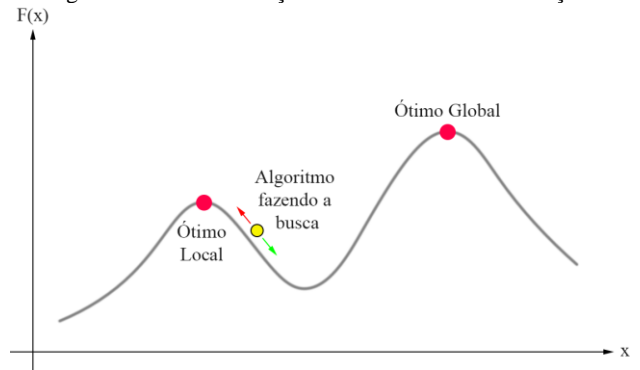


C. Busca Tabu

O algoritmo de pesquisa tabu (Tabu Search), proposto por Glover, 1986, a partir de uma solução inicial tentará avançar para um vizinho que apresente uma solução de melhor qualidade que a anterior até que satisfaça o critério de parada (Figura 2). A Lista Tabu armazena os atributos das configurações que já foram visitadas, para evitar que o algoritmo retorne para uma solução já visitada [5].

Para evitar que o algoritmo não fique preso em um ótimo local devido à falta de vizinhos de melhor qualidade, se permite que o algoritmo passe para uma solução vizinha de pior qualidade e continue explorando, consequentemente descobrindo novas soluções [5].

Figura 2 Curva das soluções: Problema de Maximização.



Fonte: Próprio autor

D. Fluxo de Potência

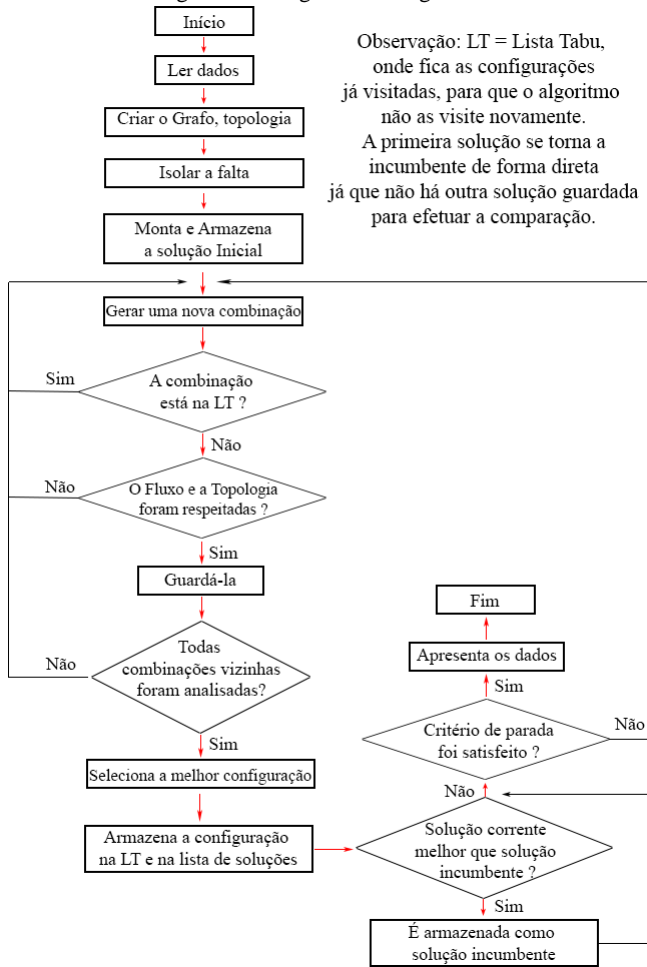
O estudo do fluxo de potência em redes elétricas consiste basicamente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e das injeções de potências ativa e reativa nas barras, dentre outras grandezas de interesse. Fluxo de carga ou fluxo de potência trata-se de um problema matemático baseado nas leis de Kirchhoff, composto por um grupo de equações diferenciais parciais, cuja solução permite determinar os valores de potência e tensão em cada um dos pontos, barras, do sistema em estudo. Este modelo matemático nos permite analisar todas as soluções geradas pelo algoritmo, pois os limites de tensão nas barras e a máxima corrente suportada pelos condutores não devem ser excedidos [6]. No caso das linhas de distribuição e transformadores os componentes são ligados entre as barras dos sistemas, nos testes realizados todas as barras serão consideradas como seções que simbolizam os consumidores alocados entre duas chaves do sistema. O estudo do fluxo de potência se torna extremamente necessário quando se trata de realocação de cargas, para evitar problemas na rede.

III. ALGORITMO DESENVOLVIDO

O objetivo mais importante do sistema é atender a maior demanda possível, de forma rápida, executando todos os chaveamentos necessários. Inicialmente o algoritmo monta uma boa solução inicial através da heurística conhecida como Algoritmo Guloso [7], e ela deverá ser armazenada na lista tabu e também como a solução incumbente (melhor solução encontrada até o momento), sempre que uma nova solução é

encontrada ela é comparada com a solução incumbente e caso ela seja de melhor qualidade ela à substituirá, em seguida o programa irá de forma recursiva e inteligente varrer todas boas combinações vizinhas a esta solução inicial até encontrar uma nova solução e reiniciar o ciclo até que o critério de parada seja atingido; um alto número de combinações aumenta as chances do algoritmo devolver uma excelente solução, em contraparte aumenta o tempo necessário. Para um melhor entendimento o fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 3.

Figura 3 Fluxograma do Algoritmo.



Fonte: Próprio autor

Para elaborar uma solução é preciso que o algoritmo, através de combinações das chaves *NA* e *NF*, onde 0 significa aberta e 1 fechada, remodele a topologia do sistema visando de encontrar uma combinação que ofereça um maior número de cargas conectadas, para isso o algoritmo faz com que uma chave *NA* do sistema seja fechada, em seguida ele entra em um laço onde abrirá cada chave *NF* do sistema (vizinhança), uma por vez até achar a melhor combinação *NA* e *NF*, sempre que uma nova configuração é executada a sua topologia e o fluxo de potência são avaliados, esse processo se repete até que o algoritmo sature, ou seja, e nenhuma nova combinação consiga fornecer um número maior de cargas conectadas, isso significa que o programa encontrou uma possível solução para o problema. No fim, quando o critério de parada for atingido a melhor solução será fornecida como

resposta final ao problema, juntamente com os chaveamentos realizados, o tempo necessário e a potência total restaurada.

Também são criadas seções fictícias nas extremidades do sistema com apenas uma conexão *NF* de modo que sua abertura não gere outras desconexões, a aberturas dessas chaves não contam como chaveamentos e essas seções não possuem cargas, ou seja, elas não têm impacto nenhum sobre o sistema. Elas têm como função apenas de auxiliar o processo de chaveamento de forma que o algoritmo consiga abrir uma chave *NF* sem desconectar carga do sistema, aumentando as possibilidades de combinações.

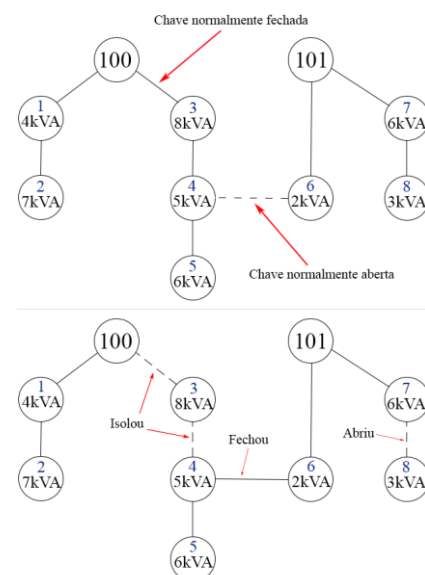
A. Exemplos simplificados

Para demonstrar a metodologia desenvolvida é montado dois exemplos utilizando um sistema teste contendo dois alimentadores (100 e 101) com capacidade máxima de 35 kVA e oito seções, listadas em azul com cargas em kVA. O primeiro teste é realizado sem a inserção de seções fictícias.

Teste 1: Supondo uma falta na seção 3 (Figura 4). O primeiro passo é isolar a seção com defeito, para isso as chaves 3-100 e 3-4 devem ser abertas de forma a isolar a seção 3. O segundo passo é realocar a carga desenergizada a jusante para outro alimentador vizinho, através do fechamento da chave *NA* 4-6, porém, note que foi necessário a abertura da chave 7-8 desconectando a seção 8 do sistema, mesmo com o alimentador 101 conseguindo suprir sua carga.

A desconexão foi realizada pois o algoritmo precisa fechar uma chave *NA* e abrir outra chave *NF* para remodelar a topologia do sistema, visando manter a maior carga possível a seção 8 foi liberada no lugar da seção 2 que possui uma maior carga. Para resolver este problema são criadas seções fictícias que auxiliam este processo de chaveamento, como ilustrado no próximo teste.

Figura 4 Sistema teste: representação de uma falta na seção 3.

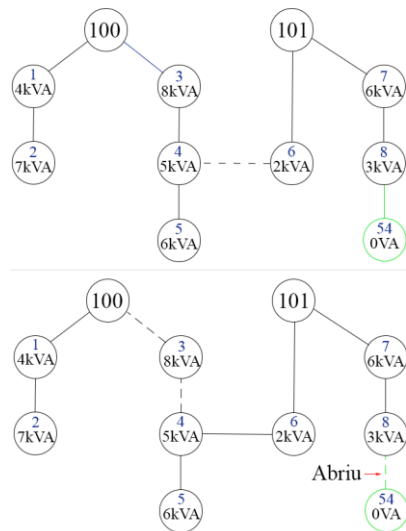


Fonte: Próprio autor

Teste 2: Neste exemplo note que uma seção fictícia, listada em verde, foi inserida na extremidade do sistema (Figura 5). Estas seções são inseridas de forma que possuam apenas uma conexão *NF* e não possuem carga, para assegurar

que sua abertura não gere impacto no sistema, sua quantidade depende do número máximo de barras do sistema.

Figura 5 Sistema teste: Solução da falta na seção 3.



Fonte: Próprio autor

De maneira semelhante a seção 3 foi isolada e em seguida a chave NA foi fechada para realocar a carga, porém, neste caso a seção fictícia, que não possui carga, foi liberada no lugar da seção 8 em conformidade com a metodologia.

É notável que a inserção da seção fictícia resolveu o problema de desconexões desnecessárias, e aumentou o número de combinações possíveis.

IV. TESTES E RESULTADOS

Nos testes foi utilizado um computador com as respectivas configurações: Processador Intel(R) Core(TM) i5-7400, CPU @ 3GHz, 3001 Mhz, 4 Núcleo(s), 4 Processador(es) lógico(s), Memória física (RAM) Instalada 8 GB, Memória virtual total 13 (GB), placa de vídeo da Asus Radeon RX 470 OC 4GB GDDR5 ROG STRIX 256-BIT.

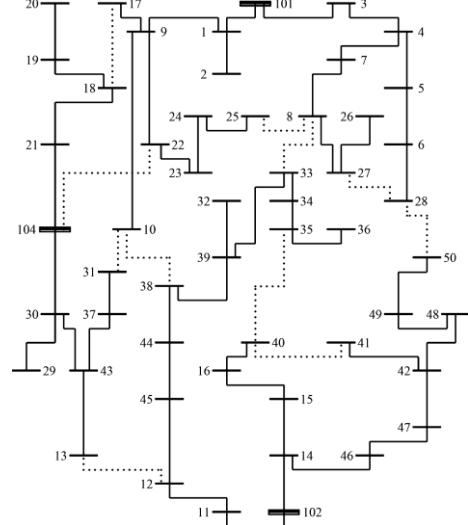
Nos testes um tempo notável na casa dos segundos é necessário visto que se trata de um problema complexo pois qualquer chave do sistema pode ser aberta ou fechada e qualquer seção pode ser desconectada. Nos testes foi considerado a existência de apenas chaves manuais entre as seções, e também não houve distinção entre cargas prioritárias e não prioritárias.

A metodologia desenvolvida foi validada utilizando o sistema teste de 53 barras (seções) e 61 linhas (chaves) apresentado na Figura 6, que em condições normais apresenta uma demanda de 50,743 MVA sendo 45,668 MW de potência ativa e 22,118 MVar de reativa [3]. O fluxo de potência adotado, foi baseado na referência [3] que utiliza o fluxo proposto por Shirmohammadi, que é amplamente utilizado devido sua eficiência computacional e robustez. Os cálculos foram realizados utilizando a potência aparente, e os limites inferior e superior de tensão foram de 0,95 p.u e 1,00 p.u.

Nos testes realizados as seções fictícias estão listadas em verde nas Figuras 7, 8 e 9, nas extremidades do sistema em

conformidade a metodologia adotada, e as seções isoladas, devido à falta, listadas em vermelho.

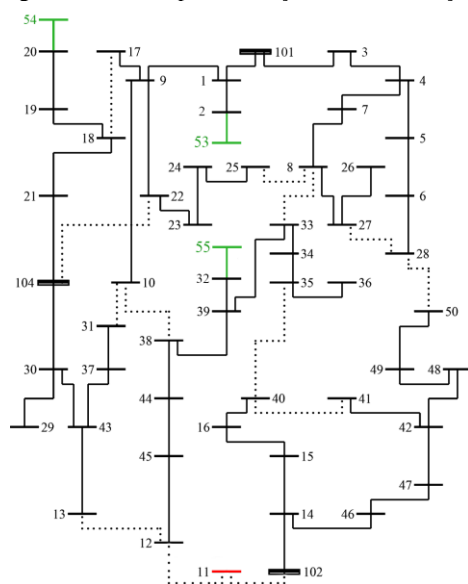
Figura 6 Sistema 53 barras utilizado [3].



A. Teste 1: Falta na seção 11

O primeiro passo do algoritmo é isolar a seção com defeito, no caso a 11, para isso é necessário que se abra as chaves NF 11-12 e 11-102, após o isolamento as seções 12, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 44 e 45 ficaram desenergizadas (Figura 7). O sistema ficou operando com 43 seções e uma potência aparente de 40,425 MVA.

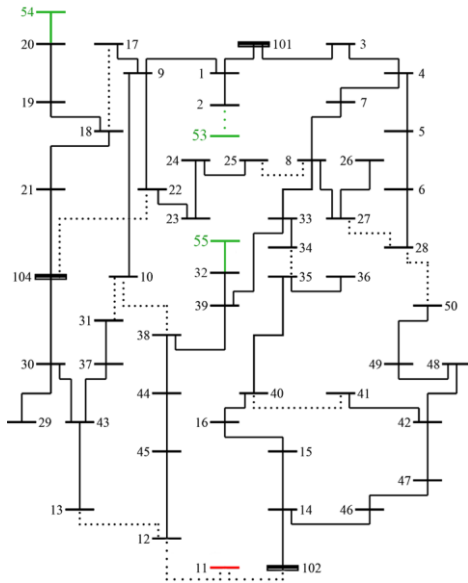
Figura 7 Sistema após a isolação da falta na seção 11.



Neste caso foi possível energizar todas seções com exceção da seção com defeito. Os chaveamentos necessários foram: a chave 8-33 foi fechada e a 34-35 foi aberta, em seguida a chave 35-40 foi fechada e a seção fictícia 53 foi liberada do sistema abrindo a chave 2-53, totalizando 3 chaveamentos (Figura 8). A potência final do sistema foi de 50,512 MVA, totalizando uma carga restaurada de aproximadamente 10MVA. Após a restauração (Figura 8) nota-se que o sistema opera com uma configuração radial

com 52 seções. A solução foi encontrada em 21,13s, o menor nível de tensão do sistema foi de 0,953 p.u, e a topologia final respeita todas as leis de Kirchhoff.

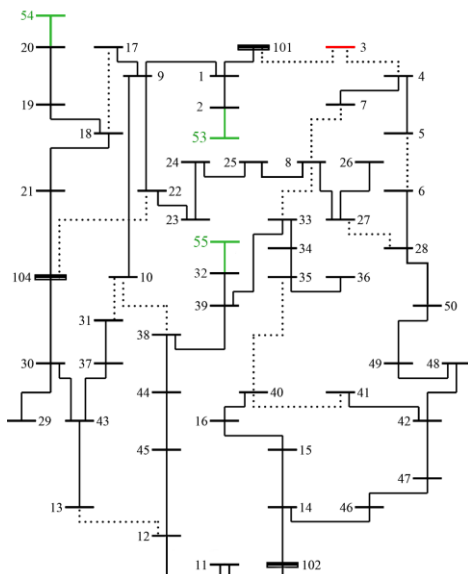
Figura 8 Sistema resultado, solução da falta na seção 11.



B. Teste 2: Falta na seção 3

Primeiramente a seção 3 foi isolada abrindo as chaves *NF* 3-4 e 3-101, com ela isolada o sistema ficou trabalhando com 45 seções e uma potência de 41,965MVA. Os chaveamentos necessários foram: as chaves *NF* 5-6 e 7-8 foram abertas e as *NA* 8-25 e 28-50 fechadas. Neste caso as cargas 3, 4, 5, 7 ficaram desenergizadas, pois os alimentadores vizinhos não conseguiam suprir a demanda destas seções. Após a restauração o sistema ficou operando com uma topologia radial, 49 seções e uma potência de 46,585MVA (Figura 9). Houve uma restauração de aproximadamente 4,600 MVA. O menor nível de tensão foi de 0,952 p.u e a solução foi encontrada em 12s.

Figura 9 Sistema resultado, solução da falta na seção 3.



C. Teste 3: Falta na seção 14

Neste caso para isolar a seção 14 foi necessário abrir as chaves *NF* 14-15, 14-46 e 14-102, após isso o sistema ficou operando com 42 seções e uma potência de 40,964MVA. Os chaveamentos necessários foram: as chaves *NF* 15-16 e 46-47 foram abertas e as *NA* 28-50 e 35-40 fechadas. As cargas 14, 15 e 46 ficaram desenergizadas. O sistema final ficou trabalhando com uma topologia radial com 50 seções e uma potência de 46,585MVA, ou seja, houve uma restauração de aproximadamente 47,510 MVA. O menor nível de tensão foi de 0,951 p.u. e a solução foi encontrada em 11,1s.

D. Comentários sobre os testes

A partir dos testes apresentados, podemos realizar algumas observações:

Para a falta na seção 11, foi obtida uma solução de boa qualidade, restaurando todas cargas e retirando a 11 onde se encontra a falta, a solução obtida foi de mesma qualidade da encontrada em [3], neste caso não houve desconexão e a resposta encontrada necessitou de um número menor de chaveamentos.

Analisando a solução encontrada mediante a falta na seção 3, foi de pior qualidade em termos de quantidade de carga restaurada, mas apresentou menor quantidade de chaveamentos quando comparada a solução encontrada em [3], neste caso houve cargas desenergizadas remanescentes.

Para o teste realizado na seção 14, obteve-se uma solução de qualidade melhor quando comparada com [3], restaurando uma maior carga com menos chaveamentos, esta solução também apresentou cargas desenergizadas.

Em todos testes realizados não houve violação dos limites de tensão.

Analisando os testes nos quais não houve a possibilidade de restauração de todas seções, isso ocorreu devido ao fato dos alimentadores/subestações do sistema teste de 53 barras utilizado, já estarem operando próximo a sua capacidade máxima.

Tabela 1: Resultados dos testes

caso	Potência Restaurada (KW)	Potência Desenergizada (KW)	Chaves Abertas	Chaves Fechadas
Falta seção 3	4158,0	3742,2	3	2
Falta seção 11	9078,3	207,9	4	2
Falta seção 14	4435,2	2910,6	5	2

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma solução abrangente para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica foi apresentada. Nos testes realizados, o método mostrou-se eficiente e robusto para a aplicação no problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica, entregando boas soluções com um baixo número de chaveamentos em um curto período de tempo, aumentando a satisfação dos consumidores e consequentemente evitando gastos desnecessários por parte da concessionária.

REFERÊNCIAS

- [1] Aneel (2016). Indicadores Coletivos de Continuidade – PRODIST. Acedido em 16 de Setembro de 2020, em: www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2.
- [2] J. Roberto, L. Gustavo, “Desenvolvimento de uma metodologia para restauração automática de redes de distribuição”, Ilha Solteira - SP, Fevereiro de 2015.
- [3] R. Romero, J.F. Franco, F.B. Leão, M.J. Rider, E.S. Souza, “A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems”, IEEE Transactions on power systems, vol. 31, no. 2, March 2016.
- [4] J. A. Bondy, U.S.R. Murty, “Graph Theory with applications”. Great Britain by the Macmillan Press Ltd, 1976.
- [5] F. Glover, M. Laguna, “Tabu Search”, Kluwer Academic Publishers, vol. 3, no. 4, pp. 621-757, 1998.
- [6] A. J. Monticelli (1946), “Fluxo de carga em redes de Energia Elétrica”, CEPEL Edgard Blucher LTDA, 1983.
- [7] A. Rocha, L. B. Dorini, “Algoritmos gulosos: definições e aplicações”, Campinas, Abril de 2004.
- [8] P. M. Anderson, “Power system protection”. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [9] F. Glover, “Tabu search-part I”. ORSA Journal on Computing, v. 1, n 3, p. 190-206, 1989.
- [10] S. S. Ćurčić, C. S. Ozveren, L. Crowe, and P. K. L. Lo, “Electric power distribution network restoration: A survey of papers and a review of the restoration problem,” Elect. Power Syst. Res., vol. 35, pp. 73–86, 1996.

APÊNDICES

Apêndice I

Tabela 2: Dados das barras [3].

Barras	Potência Reativa (kW)	Potência Reativa (kVr)	Barras	Potência Reativa (kW)	Potência Reativa (kVr)
101	0,00	0,00	25	673,70	302,07
102	0,00	0,00	26	831,60	402,78
104	0,00	0,00	27	1039,50	503,42
1	2910,60	1409,64	28	485,10	234,93
2	1039,50	503,43	29	970,20	469,85
3	485,10	234,93	30	1801,80	872,64
4	762,30	369,22	31	485,10	234,93
5	1801,80	872,64	32	1178,10	570,57
6	485,10	234,93	33	2009,70	973,36
7	693,00	335,64	34	831,60	402,79
8	1316,70	637,71	35	623,70	302,07
9	831,60	402,79	36	207,90	100,72
10	2009,70	973,36	37	1455,30	704,86
11	207,90	100,72	38	762,30	369,21
12	1247,40	604,14	39	693,00	335,64
13	762,30	369,22	40	970,20	469,85
14	693,00	335,64	41	623,70	302,07
15	970,20	469,85	42	831,60	402,79
16	1316,70	637,71	43	900,90	436,36
17	485,10	234,93	44	970,20	468,85
18	831,60	402,79	45	554,40	268,50
19	970,20	469,85	46	1247,40	604,14
20	554,40	268,50	47	693,00	335,64
21	1247,40	604,14	48	554,40	268,50
22	762,30	369,22	49	346,50	167,78
23	693,00	335,64	50	554,40	268,50
24	346,50	167,78			

Apêndice II

Tabela 3: Dados das linhas [3].

Barra Inicial	Barra Final	Resistência (mΩ)	Reatância (mΩ)	Limite de Corrente (A)
101	1	54,3	67,5	600
101	3	42,1	52,4	600
4	3	60,3	74,9	600
7	4	48,3	60,0	600
5	4	147,2	149,9	250
8	7	60,3	74,9	600
6	5	117,9	120,1	250
9	1	66,3	82,4	600
2	1	147,2	149,9	250
10	9	338,8	344,9	250
102	14	72,5	90,1	600
15	14	176,9	180,2	250
16	15	132,6	135,0	250
102	11	54,3	67,5	600
12	11	60,3	74,9	600
13	12	319,4	220,2	150
20	19	228,1	157,2	150
19	18	182,8	126,0	150
18	17	296,8	204,6	150
17	9	125,6	106,0	400
21	18	147,2	149,9	250
104	21	73,0	61,7	400
104	22	176,9	180,2	250
22	9	220,8	224,8	250
23	22	250,7	172,9	150
24	23	205,4	141,6	150
25	24	159,4	109,9	150
8	25	205,4	141,6	150
27	8	176,9	180,2	250
26	27	250,7	172,9	150
28	27	228,1	157,2	150
28	6	365,5	252,0	150
104	30	54,3	67,5	600
29	30	228,1	157,2	150
43	30	191,6	195,0	250
37	43	182,8	126,0	150
31	37	136,7	94,2	150
10	31	228,1	157,2	150
43	13	109,5	92,5	400
45	12	48,3	60,0	600
44	45	42,1	52,4	600
38	44	60,3	74,9	600
39	38	80,9	82,4	500
32	39	296,8	204,6	150
33	39	132,6	135,0	250
8	33	220,8	224,8	250
33	34	136,7	94,2	150
34	35	159,4	109,9	150
35	36	159,4	109,9	150
40	41	274,1	189,0	150
16	40	182,8	126,0	150
42	41	274,1	189,0	150
48	42	182,8	126,0	150
49	48	274,1	189,0	150
50	49	159,4	109,9	150
47	42	91,1	76,9	400
46	47	147,2	149,9	250
14	46	100,2	84,6	400
35	40	130,1	89,7	150
10	38	182,8	126,0	150
28	50	112,6	77,6	150