



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA**

**RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS  
QUANDO EXISTE UM NÚMERO REDUZIDO DE CHAVES DE  
MANOBRA**

Ilha Solteira

2018

GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA

**RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS  
QUANDO EXISTE UM NÚMERO REDUZIDO DE CHAVES DE  
MANOBRA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Orientador

Ilha Solteira

2018



FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P977r      Puerta, Gabriel Figueiredo.  
Restauração de sistemas de distribuição radiais quando existe um número  
reduzido de chaves de manobra / Gabriel Figueiredo Puerta. -- Ilha Solteira:  
[s.n.], 2018  
53 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia . Área de conhecimento: Automação, 2018

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro  
Inclui bibliografia

1. Modelagem matemática. 2. Otimização exata. 3. Sistemas de distribuição  
radiais. 4. Problema de restauração.


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

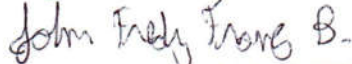
**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Restauração de Sistemas de Distribuição Radiais Quando Existe um Número Reduzido de Chaves de Manobra

**AUTOR: GABRIEL FIGUEIREDO PUERTA**

**ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus Experimental Rosana

  
Prof. Dr. BENVIDOO RODRIGUES PEREIRA JÚNIOR  
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 23 de agosto de 2018

À minha família, em especial à minha falecida avó Lindaura, aos meus pais  
Rubéns e Valquíria, à minha irmã Daniely e aos meus amigos,  
por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo o amor, o suporte, o conforto, a atenção, o carinho e os aprendizados que me ofereceram. Agradeço aos meus pais por toda a atenção e preocupação comigo. Agradeço especialmente a minha irmã, por sempre me inspirar e sempre me esforçar a dar o meu melhor. Agradeço também a Prima por sua companhia agradável, pela paciência em me ensinar coisas corriqueiras, pelas várias conversas aleatórias e por sempre me socorrer nas horas que eu mais preciso.

Agradeço aos meus amigos: Douglas, "Julibreja", Thainara, Tainá, Carol, "Chichi", "Lolo", Momesso, "Vini", "Sulfite", "Aninha 18", "Carolison", "Alineson", "Testasis", "Mari", "Vida", "Olguinha", "Cidinha", João, "Maria Rafaela", "Jaqueta de Couro", Pena, "Juninho", Márian, "Zé" e Heitor, por todas as conversas jogadas fora, pelos encontros semanais, pelas várias festas, pelo intenso incentivo e principalmente, pelo amor e carinho para com a minha natureza mais bruta. Agradeço também à professora Dra. Daniela pela calorosa recepção em Ilha Solteira e o apoio inicial que serviu de base para toda a minha trajetória. Agradeço também a minha amiga e professora Dra. Bruna pela minha iniciação acadêmica e por sempre me auxiliar nas decisões mais difíceis. Agradecimentos especiais à equipe da Pinheiral, pelo amadurecimento e pelo incentivo concedidos.

Agradeço a todos da equipe do LAPSEE, em especial ao professor Rubén Romero pelo acolhimento, aprendizado e exemplo de dedicação durante a orientação. Agradeço também à Eliane, pelo conhecimento transmitido e pela paciência. Agradeço também aos meus colegas do laboratório, em especial, "Patiola", Hugo, Bruna, Letícia, Tayenne, Cindy, Cleberton, Laura e Esaú, pelos vários momentos de descontração, pelos vários cafés tomados e pelos vários churrascos realizados.

Agradeço aos funcionários da UNESP, por todos os serviços prestados.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior- Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro- Código de Financiamento 001, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte através do Projeto Temático n. 2015/21972-6.

“Certifique-se que as estrelas são o que você pretende,  
entretanto permita-se cometer erros.”

Onika Tanya Maraj

## RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um modelo matemático especializado para a otimização do problema da restauração de redes de distribuição de energia elétrica radiais quando existem poucas chaves manobráveis. A existência de um número reduzido de chaves seccionadoras na rede de distribuição é uma característica típica de sistemas reais. O problema da restauração de redes de distribuição consiste em obter um plano de restauração que restabeleça o máximo possível de cargas presentes na parcela do sistema que foi desenergizada após a ocorrência de uma falta permanente. O plano de restauração deve ser obtido o mais rápido possível. O modelo matemático proposto possui como objetivo maximizar o restabelecimento de energia àqueles setores de carga que estão desenergizados e minimizar o número total de chaveamentos necessários para que a restauração aconteça. O modelo matemático resultante é de programação cônica de segunda ordem inteira mista e é resolvido através de solucionadores comerciais que se baseiam em técnicas de otimização clássicas. Os testes considerando faltas permanentes foram simulados em sistemas de distribuição testes de 53 e 84 barras. Os sistemas foram adaptados e transportados para a problemática do trabalho e os resultados adquiridos qualificam a robustez e a eficácia do modelo matemático especializado proposto para a resolução do problema.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática. Otimização exata. Sistemas de distribuição radiais. Problema de restauração.



## ABSTRACT

This work proposes an specialized mathematical model for the optimization of the restoration problem in radial electric power distribution systems with few manageable switches. The existence of a reduced number of switches in the distribution systems it's a typical characteristic of real systems. The restoration problem in radial electric power distribution systems is to obtain a restoration plan that reestablishes the maximum amount of present loads in the system portion that has been de-energized after the occurrence of a permanent fault. The elaboration of the restoration plan must be as soon as possible. The proposed mathematical model aims at maximizing the power re-establishment to the de-energized load sectors and at minimizing the total amount of operated switches that are required for the restoration happen. The resulting mathematical model is a mixed-integer second-order conic programming problem and it's solved through commercial solves that use classical optimization techniques as base. The tests considering permanents faults were simulated in 84 and 53-bus distribution systems. The systems were adapted and transported to the work's problematic and the acquired results show the robustness and the effectiveness of the proposed specialized mathematical model for the problem resolution.

**Keywords:** Mathematical modelling. Exact optimization. Radial distribution systems. Restoration problem.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas do problema de restauração em redes de distribuição . . . . .	14
Figura 2	Exemplo de setor de carga . . . . .	27
Figura 3	Topologia inicial do sistema de 53 barras . . . . .	33
Figura 4	Configuração proposta para o caso de falta no setor 3 . . . . .	37
Figura 5	Topologia inicial do sistema de 84 barras . . . . .	38
Figura 6	Configuração proposta para o caso de falta no setor 77 . . . . .	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Identificação dos setores de carga no sistema de 53 barras . . . . .	32
Tabela 2	Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 53 barras . . . . .	32
Tabela 3	Resultados obtidos para o sistema de 53 barras . . . . .	34
Tabela 4	Identificação dos setores de carga no sistema de 84 barras . . . . .	39
Tabela 5	Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 84 barras . . . . .	40
Tabela 6	Resultados obtidos para o sistema de 84 barras . . . . .	41
Tabela 7	Comparativo entre os tempos de processamento dos modelos para o sistema de 53 barras . . . . .	45
Tabela 8	Comparativo entre os tempos de processamento dos modelos para o sistema de 84 barras . . . . .	45
Tabela 9	Dados de capacidade de carregamento das subestações do sistema de 53 barras . . . . .	51
Tabela 10	Dados de impedância das linhas do sistema de 53 barras . . . . .	52
Tabela 11	Dados de demanda das barras do sistema de 53 barras . . . . .	53
Tabela 12	Dados de ramos do sistema de 84 barras . . . . .	54
Tabela 13	Dados de demanda das barras do sistema de 84 barras . . . . .	55

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AMPL	<i>Modeling Language for Mathematical Programming</i>
ENS	Energia Não Suprida
HCF-ACO	<i>Hyper-Cube Framework Ant Colony Optimization</i>
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
PCSOIM	Programação Cnica de Segunda Ordem Inteira Mista
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
PQIM	Programação Quadrática Inteira Mista
RTS	<i>Reactive Tabu Search</i>
SD	Sistema de Distribuico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	13
1.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	14
1.3	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS NA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	14
1.4	REVISÃO DA LITERATURA ESPECIALIZADA EM RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	15
<b>2</b>	<b>PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICA QUANDO EXISTE UM NÚMERO REDUZIDO DE CHAVES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO</b>	<b>21</b>
2.1	MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO	21
<b>2.1.1</b>	<b>Descrição do modelo matemático utilizado</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Adaptações realizadas no modelo matemático</b>	<b>26</b>
2.2	MODELO MATEMÁTICO ESPECIALIZADO PROPOSTO	27
<b>2.2.1</b>	<b>Descrição do modelo matemático utilizado</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>31</b>
3.1	SISTEMA DE 53 BARRAS	31
3.2	SISTEMA DE 84 BARRAS	36
3.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	43
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>
	<b>ANEXO A - Dados dos Sistemas Testados</b>	<b>51</b>
A.1	Sistema de 53 barras	51



## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica atualmente é considerada de grande necessidade para a qualidade de vida e é indispensável para vários setores, sejam eles institucionais, industriais, corporativos e especialmente setores medicinais. Com o aumento da demanda de energia elétrica e a evolução tecnológica desses setores, a necessidade de se ter um sistema de distribuição de energia elétrica de alta qualidade e confiabilidade cresceu consideravelmente. O sistema de distribuição (SD) é responsável por estabelecer conexão direta entre as concessionárias de energia elétrica e esses setores. Em virtude da operação radial e aérea, o sistema de distribuição está susceptível a faltas e contingências por forças naturais e/ou erros humanos. Após o aparecimento de uma falta ou contingência no sistema de distribuição deve-se restabelecer o fornecimento de energia aos setores que ficaram desenergizados. Esse processo de restabelecimento de energia elétrica é o que caracteriza um problema de restauração de sistemas de distribuição.

Neste trabalho o problema de restauração de sistemas de distribuição é abordado e se aplica em sistemas de distribuição que operam de forma radial e onde existem poucas chaves de manobras, o que caracteriza um sistema de distribuição real. Um modelo matemático especializado para a restauração em sistemas com essa característica é proposto, implementado no ambiente de programação matemática AMPL (*A Mathematical Programming Language*) e resolvido através de solucionadores comerciais. Dois sistemas de distribuição de 53 e 84 barras foram utilizados nos testes e os resultados obtidos qualificam a robustez e a eficiência da metodologia proposta.

Este documento está estruturado da seguinte forma: neste primeiro capítulo o problema da Restauração de Sistemas de Distribuição é estudado e definido, assim como, a sua respectiva modelagem matemática e as diferentes abordagens de otimização do problema na literatura. No segundo capítulo o modelo matemático especializado proposto é apresentado e discutido detalhadamente, o modelo utilizado como base para o desenvolvimento do modelo matemático especializado também é apresentado e discutido neste capítulo. No terceiro capítulo o modelo matemático é resolvido e os testes feitos nos sistemas de distribuição de 53 e 84 barras são apresentados, analisados e discutidos. Por fim, no quarto capítulo, as conclusões finais do trabalho desenvolvido são apresentadas.

## 1.1 O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição possui um papel importante no sistema elétrico, ele estabelece a conexão direta entre as concessionárias e os consumidores e pode ser dividido em Rede de Distribuição Primária e Rede de Distribuição Secundária. A rede de distribuição primária é responsável pelo atendimento de consumidores primários (indústrias de porte médio, centros comerciais, unidades hospitalares, entre outros) e dos transformadores de distribuição secundária. A rede de distribuição secundária, diferente da primária que atende consumidores de média e alta tensão, atende consumidores de baixa tensão.

Segundo Wu e Monticelli (1988) o sistema elétrico possui três estados operativos: O estado normal, o emergencial e o restaurativo. O sistema opera em estado normal quando tanto as restrições de carga quanto as restrições operativas são satisfeitas. O sistema entra em estado emergencial quando há a ocorrência de alguma falta, o que implica na violação das restrições operacionais. Caso aconteça alguma falta permanente, as restrições de carga são violadas e o sistema elétrico entra em estado restaurativo. Uma vez nesse estado, para que o sistema elétrico volte ao seu estado operativo normal é necessário obter um plano de restauração que restabeleça o fornecimento de energia à parcela que estava desenergizada.

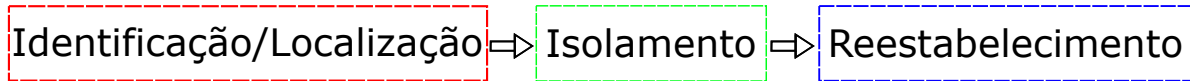
Mesmo com os grandes avanços tecnológicos e pesquisas sobre dispositivos de segurança de sistemas de distribuição e sobre prevenção de faltas e/ou contingências em sistemas de distribuição, ainda assim o sistema está susceptível a faltas e/ou contingências ocasionadas por forças naturais, erros humanos ou até mesmo defeitos em equipamentos. O aparecimento de uma falha ou um curto-circuito em qualquer ponto do sistema de distribuição dispara o funcionamento dos dispositivos de segurança que, por sua vez, resulta no não fornecimento de energia a toda a parcela que se encontra à jusante do local da falha.

É nesse cenário de ocorrência de falta permanente que o problema de restauração em redes de distribuição radiais se encontra. Segundo Sedano (2005) a restauração do sistema de distribuição baseia-se na reconfiguração do sistema em estado restaurativo almejando restabelecer o fornecimento de energia ao maior montante possível de cargas que estavam desenergizadas através do menor número possível de chaveamentos. O processo inicial na restauração em redes de distribuição radiais de energia elétrica é a identificação e localização da falta na rede. Uma vez que a falta foi identificada, então, inicia-se o processo de isolamento da área afetada pela falta permanente e depois, elabora-se um plano de manobras, também chamado de plano de restauração, que contém as indicações de manobras de chaveamentos necessários para que o fornecimento de energia seja restabelecido à parcela que está desenergizada. O objetivo do plano de restauração é restabelecer o fornecimento de energia elétrica à maior quantidade de carga possível que foi desenergizada em virtude do isolamento de uma área afetada por uma falta permanente. Este último processo é conhecido na literatura como *restauração*. A Figura 1



ilustra todos os processos do problema de restauração em redes de distribuição.

Figura 1 - Etapas do problema de restauração em redes de distribuição



Fonte: Adaptado de Mathias Neto (2011)

## 1.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O problema da restauração de sistemas de distribuição é definido por Ciric e Popovic (2000) como um problema combinatório de natureza não-linear e multiobjetivo. A multiobjetividade do problema se dá pela necessidade de restaurar a maior área possível a partir da mínima alteração topológica. Além desses dois objetivos, outros critérios também podem ser considerados, como a priorização de cargas, a priorização de chaves automáticas, a minimização de perdas elétricas, o balanceamento de carga dos alimentadores e a minimização da energia não suprida (ENS).

As redes elétricas operam sob o cumprimento de dois conjuntos de restrições: restrições operacionais e restrições de carga. Wu e Monticelli (1988) definem que o conjunto composto pelas restrições de carga impõe que a demanda tem que ser atendida e que o conjunto composto pelas restrições operacionais impõe as condições necessárias para que a rede elétrica opere normalmente: limites de capacidade das subestações, limites de corrente nas linhas, limites de quedas de tensão nas barras de carga, as leis de Kirchhoff e os fluxos de potência ativa e reativa. Outra restrição de grande importância para o funcionamento da rede elétrica é a restrição de radialidade e, de todas as restrições, a restrição de radialidade é a que mais sofreu mudanças na forma como é matematicamente representada durante os anos. Segundo Schmidt et al. (2005), a restrição comumente utilizada para representar a radialidade é necessária porém não é suficiente por si só para que a radialidade seja cumprida. Essa restrição foi representada de forma completa em Lavorato et al. () e desde então inserida em vários modelos matemáticos. A não-linearidade do problema da restauração de sistemas de distribuição aumenta a complexidade e a dificuldade de resolução do problema, porém, o modelo matemático pode facilmente ser linearizado como acontece em Souza (2014).

## 1.3 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO USADAS NA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Hsu et al. (1991) definem o problema da Restauração de Sistemas de distribuição como um problema de otimização combinatória complicado e pode demorar bastante tempo para

encontrar um plano de restauração que seja factível e satisfatório. Dessa forma, são encontradas na literatura o uso de diversas técnicas de otimização diferentes para resolver o problema de restauração.

Na década de 80, os Sistemas Especialistas e outras técnicas que utilizam do conhecimento do operador da rede de distribuição passaram a ser utilizadas para resolver o problema de restauração. Um pouco mais tarde, na década de 90, as técnicas heurísticas começaram a aparecer. Pela alta complexidade do problema e pela difícil representação fiel das restrições, as heurísticas se tornaram uma escolha viável, uma vez que as restrições são representadas de maneira menos explícita. A facilidade de se obter uma solução que satisfaça a multiobjetividade imposta pelo problema de restauração de sistemas de distribuição se tornou atrativa ocasionando o aparecimento de vários algoritmos genéticos e evolutivos na década de 2000.

Modelos matemáticos para a otimização clássica do problema da restauração de energia elétrica passaram a ser utilizados recentemente após uma representação coerente da restrição de radialidade do sistema elétrico em Lavorato et al. (). Antes, a utilização da otimização exata para a resolução do problema da restauração aparecia como ferramenta auxiliar de alguma outra técnica de otimização e isso acontecia pela falta de um modelo matemático completo que compreendesse e representasse o funcionamento da rede de distribuição durante o processo de restauração.

#### 1.4 REVISÃO DA LITERATURA ESPECIALIZADA EM RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Liu, Lee e Venkata (1988) propuseram um sistema especialista para resolver o problema da restauração de sistemas a partir do conhecimento prévio do operador da rede de distribuição e de um conjunto de regras que compõe o sistema especialista. O sistema especialista desenvolvido pelos autores, possui dois blocos de regras chamados "*Restoration Planner*" e "*Loss Minimizer*". O primeiro bloco possui regras que geram e mostram um plano de restauração para o operador da rede e o segundo bloco gera uma proposta de reconfiguração que possui o objetivo de minimizar as perdas nas linhas, uma vez que o sistema opere em seu estado normal.

Ainda em 1988, outro sistema especialista baseado no conhecimento do operador foi proposto por Wu e Monticelli (1988) para a resolução do problema de restauração em redes de distribuição. O sistema especialista está integrado em um *framework* utilizado para monitorar a rede de distribuição e é composto por três blocos de regras que auxiliam na obtenção do plano de restauração. O primeiro bloco de regra analisa e recolhe as informações necessárias sobre a topologia da rede de distribuição, o segundo bloco de regra transforma as informações obtidas pelo primeiro bloco em fórmulas matemáticas utilizadas no terceiro bloco que, por sua vez, é encarregado de simular o fluxo de potência da sequência de chaveamento sugerida pelo sistema

especialista.

Aoki et al. (1989) propuseram um algoritmo que utiliza o conceito do método do gradiente efetivo e é composto por quatro etapas. A primeira etapa é onde acontece a transferência das cargas que foram desenergizadas, a jusante da falta permanente, ao transformador mais próximo chamado de "Alimentador de Auxílio Principal". Na segunda etapa, acontece a verificação das restrições nos alimentadores nos quais as cargas foram conectadas na etapa passada, caso haja alguma violação nas restrições, as cargas violadas são transferidas para outro alimentador, se possível. Caso a transferência das cargas não seja possível, então inicia-se a terceira etapa do algoritmo, nessa etapa as cargas que não conseguiram ser transferidas são desligadas da rede. Na última etapa, tenta-se reconectar as cargas desligadas na etapa anterior considerando possibilidades de transferência de cargas para outros alimentadores. O processo termina quando não há violações das restrições operacionais e quando não há restauração de cargas disponíveis.

Shirmohammadi (1992) propõe um conjunto de regras heurísticas. O objetivo principal do trabalho é realizar a restauração do sistema de distribuição minimizando o número de chaveamentos necessários para isso. Após isolar a falta, o autor propõe a criação de uma rede virtualmente malhada, a qual é a base do trabalho proposto. Um algoritmo de fluxo de potência de redes malhadas é executado e a chave que apresentar menor fluxo é aberta. Esse procedimento de abrir a chave que possui o menor fluxo se repete até que seja encontrada uma rede radial. Dessa forma, a restauração das cargas que estavam sem fornecimento de energia elétrica em consequência do isolamento da falta é realizada e, implicitamente, o número de chaveamentos necessários para a restauração é minimizado.

Augugliaro, Dusonchet e Sanseverino (1998) propuseram um algoritmo genético híbrido com dois objetivos: maximizar o total de cargas restauradas e minimizar as perdas. O algoritmo trabalha em duas situações diferentes: a primeira situação acontece quando a margem de potência (definida pelos autores como a diferença entre o total de potência disponível nas subestações e o total de demanda das cargas desconectadas) é maior que o menor valor de carga desconectada e já a segunda quando a margem de potência é menor que o menor valor de carga desconectada. Na primeira situação o algoritmo tenta restaurar a maior quantidade de carga desenergizada possível e na segunda situação o objetivo do algoritmo é reduzir as perdas.

Ciric e Popovic (2000) contribuíram para a literatura do problema de restauração propondo um algoritmo híbrido que combina técnicas heurísticas e programação inteira mista para a obtenção do plano de restauração. O trabalho proposto baseia-se em uma lista de propostas obtida a partir da manobra de uma única chave seccionadora. Com a lista formada, pode-se escolher um critério de otimização dentre cinco critérios disponíveis: minimizar o número de operações de chaveamento, maximizar a capacidade de reserva dos alimentadores, minimizar o desvio mínimo de tensão, tensão mínima aceitável e minimizar as perdas de potência ativa. Quando nenhuma solução da lista de propostas é factível, a solução é encontrada através de um

problema de otimização inteiro misto.

Watanabe e Nodu (2004) propuseram um algoritmo genético de duas fases para o problema de restauração de rede de distribuição de energia elétrica com foco em energia não-suprida (ENS). As restrições utilizadas pelo algoritmo são: radialidade, capacidade das subestações e corrente máxima nas linhas. O algoritmo é dividido em duas fases: a primeira possui o papel de criar uma topologia radial e a segunda visa obter uma sequência ótima de chaveamentos que minimize a ENS. A factibilidade da solução após os operadores genéticos de mutação e recombinação é preservada. O algoritmo de Kruskal é utilizado na geração de uma população inicial e o objetivo principal do trabalho é aumentar a confiabilidade da rede de distribuição durante o processo restaurativo.

Sedano (2005) propõe um algoritmo baseado em busca tabu reativa (*Reactive Tabu Search* - RTS) em conjunto com uma técnica heurística construtiva e com duas abordagens diferentes para o problema de restauração em redes de distribuição considerando priorização de cargas. A primeira considera a natureza multiobjetivo do problema através do uso da fronteira de Pareto e a segunda abordagem utilizada pelo autor considera a soma ponderada dos objetivos do problema. A técnica heurística construtiva utilizada consiste em selecionar uma seção que está sem fornecimento de energia para que a sua alimentação possa ser transferida para um alimentador vizinho que seja capaz de atender essa seção. No final da técnica heurística, uma configuração inicial é formada e a mesma é utilizada posteriormente no algoritmo de busca tabu reativa. Conforme os resultados apresentados pelo autor, o algoritmo de RTS que utiliza a fronteira de Pareto apresentou resultados mais adequados para o problema de restauração quando comparado ao algoritmo RTS com a soma ponderada dos objetivos.

O trabalho de Watanabe (2005) propõe um algoritmo baseado em *Ant Colony Optimization* (ACO) com o objetivo de obter uma sequência de chaveamentos ótima que restaure o sistema de distribuição levando em consideração a minimização da ENS, a restrição de radialidade e as restrições operacionais necessárias para que a rede de distribuição opere normalmente. Para adquirir a sequência ótima de chaveamentos, o autor utiliza as estratégias propostas por Blum, Roli e Dorigo (2001) devido a possibilidade de modelar o problema como se fosse um problema de agendamento. A aplicação do *Hyper-Cube Framework Ant Colony Optimization* (HCF-ACO) no problema de ENS qualificam as estratégias utilizadas e o algoritmo proposto pelo autor.

O trabalho de Kumar, Das e Sharma (2006) trata do problema de restauração de rede de distribuição de energia elétrica com cargas prioritárias através de um algoritmo genético monobjetivo. O trabalho leva em consideração faltas múltiplas e simples em redes de distribuição de tamanhos diferentes. Além de considerar cargas prioritárias, os autores também consideram a presença de chaves seccionadoras controladas remotamente. A função objetivo do trabalho é a hierarquização dos seguintes critérios: a minimização da área fora de serviço, a minimização

do número de chaveamentos remotos e a minimização das perdas nas linhas. A verificação da radialidade é feita de maneira iterativa, ou seja, em toda iteração verifica-se se a condição de radialidade está sendo cumprida e, caso não seja, altera-se o valor de uma das chaves seccionadores que ocasionou a violação da condição.

Kumar, Das e Sharma (2008) propõem um algoritmo genético para resolver o problema de restauração com uma abordagem multiobjetivo sem utilizar pesos para mensurar a importância de cada função objetivo. A metodologia proposta foi baseada no algoritmo apresentado em Deb et al. (2002) denominado *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II). A grande contribuição dos autores está representada por dois algoritmos NSGA-II que consideram faltas múltiplas, carga prioritária, chaves manuais e chaves automáticas. Os algoritmos propostos são denominados NSGA-II avançado e NSGA-II básico. A única diferença entre os algoritmos é o tempo de processamento: o NSGA-II avançado utiliza técnicas para a redução do tempo de processamento discutida em Jensen (2003) e obtém um tempo menor que o NSGA-II básico.

Tian et al. (2009) propuseram um algoritmo baseado no método de otimização binária por enxames de partículas (Binary Particle Swarm Optimization - BPSO) utilizado para resolver o problema de restauração de sistemas de distribuição. O algoritmo considera faltas múltiplas, a presença de cargas prioritárias e geração distribuída. O trabalho proposto pelos autores possui como objetivo restaurar o máximo possível de cargas que estão sem atendimento, priorizando cargas com alta importância na rede de distribuição e minimizando as perdas ativas do sistema após a restauração. Os critérios de otimização são representados de forma monobjetiva através da soma ponderada dos pesos atribuídos a cada critério. No final de cada iteração do algoritmo é executado um fluxo de carga com o objetivo de verificar as violações das restrições.

Mathias Neto (2011) propôs um algoritmo baseado na meta-heurística GRASP para o problema da restauração de redes de distribuição de grande porte com geração distribuída. A metodologia tem abordagem multiobjetivo e possui como critérios de otimização a minimização do número de consumidores fora de serviço e a minimização do número de chaveamentos necessários para que aconteça a restauração. A meta-heurística GRASP possui duas etapas de procedimento: a etapa de construção e a etapa de melhoria local. Durante a fase de construção, o algoritmo altera o estado de operação de uma chave seccionadora aberta que está entre duas cargas desenergizadas. O algoritmo possui duas fases: a fase de construção e a fase de melhoria local. Durante a fase de construção o algoritmo almeja compor uma solução inicial factível de forma iterativa. O objetivo da fase de melhoria local é melhorar a qualidade da solução formada na fase de construção. A melhoria é feita a partir de uma busca em vizinhança por uma solução de melhor qualidade. A definição de vizinhança utilizada é a troca do estado de operação entre duas chaves seccionadoras desde que não impossibilite o abastecimento de seções que continuaram energizadas após o isolamento da falta. A abordagem possibilita a restauração de uma seção que se encontra desenergizada por um gerador distribuído pertencente à seção.

O trabalho de Wei et al. (2012) é um algoritmo genético que considera geração distribuída e priorização de cargas. Os critérios escolhidos como objetivos do trabalho são submetidos a técnicas de lógica nebulosa (*Fuzzy*) e ponderados em uma função *fitness* que é utilizada pelo algoritmo. A priorização acontece nos diferentes níveis de carregamentos que são adotados: quanto maior o valor do parâmetro associado à carga, maior a prioridade de atendimento que a mesma possui. Com ênfase em diminuir o espaço de busca e a memória que o algoritmo utiliza, os autores dividiram e classificaram três métodos de restauração diferentes: Restauração de Alimentador Direta, Restauração de Transferência de Carga e Restauração de Perda de Carga. Cada método de restauração possui um espaço de busca diferente o que, segundo os autores, reduz o tempo de processamento necessário para que o plano de restauração seja elaborado. Os resultados apresentados pelos autores comprovam a eficácia do algoritmo e, principalmente, a robustez da estratégia de diferenciar o método de restauração necessário para que o restabelecimento ocorra.

No trabalho de Souza, Leão e Romero (2014) é possível encontrar diferentes modelos matemáticos simplificados para a solução do problema de restauração do fornecimento de energia elétrica em redes de distribuição radiais. O primeiro modelo matemático exato apresentado é um modelo de programação não linear inteira mista (PNLIM) e possui como objetivo minimizar o índice de desbalanço de carga entre os alimentadores do sistema de distribuição. A função objetivo do modelo PNLIM foi modificada e, quando reintegrada ao modelo matemático, acaba levando o modelo a adotar aparência de um problema de programação quadrática inteira mista (PQIM). Para preservar a convergência e a qualidade dos resultados desse modelo, nenhuma outra alteração além da função objetivo foi realizada. Outro modelo é apresentado a partir de uma alteração na função objetivo e, por consequência, da incorporação de novas variáveis e restrições ao modelo matemático. Esse terceiro modelo apresentado é um problema de programação linear inteiro mista (PLIM) e, assim como os outros modelos, também consiste da minimização do índice de desbalanço de carga entre os alimentadores. Um quarto e último modelo PLIM é proposto para minimizar o número de operações de chaveamentos necessários para o restabelecimento de energia. Os resultados obtidos comprovam a eficácia dos modelos e ainda levanta uma discussão válida entre os dois objetivos abordados.

Romero et al. (2016) propuseram um modelo matemático AC completo para o problema da restauração em redes de distribuição radiais de energia elétrica. A modelagem matemática transforma a natureza não-linear do problema da restauração em um problema de programação cônica de segunda ordem inteira mista e possui uma abordagem mono-objetiva que hierarquiza quatro critérios diferentes em apenas uma função objetivo. Os critérios abordados pelo modelo são: minimizar o total de cargas não restauradas, minimizar o número de operações de chaveamentos necessários para a restauração, priorizar a operação de chaves seccionadoras controladas remotamente e priorizar o atendimento de cargas que necessitam atenção especial. O modelo integra as Leis de Kirchhoff, de forma completa e sem simplificações, e incorpora a restrição

de radialidade proposta em Lavorato et al. (). Outra grande contribuição do trabalho é a introdução do conceito de subestação fictícia e de ramos fictícios no modelo matemático. Os autores justificam que a introdução possui papel fundamental para o cumprimento das restrições de conectividade e radialidade da rede de distribuição e que o objetivo é manter intacta a natureza de operação das chaves presentes na área isolada da rede.

## 2 PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICA QUANDO EXISTE UM NÚMERO REDUZIDO DE CHAVES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se os modelos matemáticos utilizados para a resolução do problema de restauração de energia de redes de distribuição radiais que possuem um número reduzido de chaves seccionadas. Na seção 2.1, o modelo proposto por Romero et al. (2016) é adaptado passando a considerar que nem todos os ramos da rede de distribuição possui chave alocada, sendo assim, conduzido para a problemática do trabalho e na seção 2.1.1, o modelo é discutido e as adaptações efetuadas são analisadas. Na seção 2.2, o modelo matemático especializado para a restauração de sistemas de distribuição que tem um número reduzido de chaves de manobra é proposto e discutido.

### 2.1 MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO

Nesta seção todos os elementos e as relações matemática que compõe o modelo proposto por Romero et al. (2016) são discutidas e posteriormente as adaptações realizadas. O modelo matemático é apresentado nas relações (1)–(21).

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega_a} \beta_{i,j} x_{i,j} + \sum_{(i,j) \in \Omega_f} \mu_{i,j} (1 - x_{i,j}) + \sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i (P_{D_i} + Q_{D_i}) y_i \quad (1)$$

s.a :

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l} P_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l} (P_{i,j} + R_{i,j} I_{i,j}^{sqr}) + P_{G_i} = P_{D_i} (1 - y_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l} Q_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l} (Q_{i,j} + X_{i,j} I_{i,j}^{sqr}) + Q_{G_i} = Q_{D_i} (1 - y_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l \cup \Omega_h} H_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h} H_{i,j} + H_{G_i} = y_i \quad (4)$$

$$V_i^{sqr} - V_j^{sqr} = 2(P_{i,j} R_{i,j} + Q_{i,j} X_{i,j}) + Z_{i,j}^2 I_{i,j}^{sqr} b_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (5)$$

$$V_j^{sqr} I_{i,j}^{sqr} \geq P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2 \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (6)$$

$$(P_{G_i}^2 + Q_{G_i}^2) \leq \bar{S}_{G_i}^2 \quad \forall i \in \Omega_b, i \neq S^f \quad (7)$$

$$0 \leq I_{i,j}^{sqr} \leq \bar{I}_{i,j}^2 x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (8)$$

$$|H_{i,j}| \leq M x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (9)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{sqr} \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (10)$$

$$|b_{i,j}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) (1 - x_{i,j}) \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (11)$$



$$H_{G_i} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, i \neq S^f \quad (12)$$

$$P_{G_i} = 0 \quad \forall i \in (\Omega_b - \Omega_S) \cup S^f \quad (13)$$

$$Q_{G_i} = 0 \quad \forall i \in (\Omega_b - \Omega_S) \cup S^f \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h} x_{i,j} = |\Omega_b| - |\Omega_S| \quad (15)$$

$$|P_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (16)$$

$$|Q_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (17)$$

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l \cup \Omega_h} x_{j,i} + \sum_{(i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h} x_{i,j} \geq 1 \quad (18)$$

$$|y_i - y_j| \leq (1 - x_{i,j}) \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (19)$$

$$x_{i,j} \in \{i, j\} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h \quad (20)$$

$$y_{i,j} \in \{i, j\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (21)$$

### 2.1.1 Descrição do modelo matemático utilizado

Nesta seção, as restrições, as variáveis, os parâmetros, os conjuntos e a função objetivo são explicados e detalhados, assim como as alterações feitas para que o modelo tenha desempenho esperado para redes de distribuição que não possuem chaves alocadas em todos os ramos, como acontece no modelo original.

As descrições referentes a cada conjunto presente no modelo matemático são expostas a seguir:

- $\Omega_b$  é o conjunto composto por todas as barras disponíveis para participar do processo de restauração da rede de distribuição. As barras de subestação também estão contidas no conjunto. É válido ressaltar que as barras que foram indicadas como locais de falta são isoladas e, sendo assim, não participam do processo de restauração;
- $\Omega_S$  é o conjunto composto pelas barras de subestação e pela barra de subestação fictícia  $S^f$ ;
- $\Omega_a$  é o conjunto de chaves seccionadoras normalmente abertas disponíveis na rede de distribuição;
- $\Omega_f$  é o conjunto de chaves seccionadoras normalmente fechadas disponíveis na rede de distribuição;
- $\Omega_h$  é o conjunto de ramos fictícios que foram integrados ao problema. Existe um ramo normalmente aberto entre a subestação fictícia  $S^f$  e cada barra de carga da rede de distribuição;

- $\Omega_l$  é o conjunto de ramos reais disponíveis para o processo restaurativo, os conjuntos  $\Omega_a$  e  $\Omega_f$  estão contidos em  $\Omega_l$ . Todos os ramos utilizados para isolar o setor em falta e os ramos presentes no setor não fazendo parte do conjunto;

Quanto aos parâmetros pertencentes ao modelo matemático, pode-se dizer:

- $S^f$  representa a barra de subestação fictícia que foi integrada ao problema e inserida no conjunto de subestações  $\Omega_S$ ;
- $P_{D_i}$  e  $Q_{D_i}$  representam, respectivamente, as demandas de potência ativa e reativa na barra  $i$ ;
- $\bar{S}_{G_i}$  representa a capacidade de potência aparente da subestação real  $i$ ;
- $R_{i,j}$ ,  $X_{i,j}$  e  $Z_{i,j}$ , representam, respectivamente, a resistência, a reatância e a impedância referentes ao ramo  $i - j$ ;
- $\bar{I}_{i,j}$  representa o limite de corrente que é permitido no ramo  $i - j$ ;
- $M$  representa o valor máximo de fluxo de potência artificial que é permitido pelos ramos reais e fictícios que estão ativos na parcela desenergizada;
- $\underline{V}$  e  $\bar{V}$  são, respectivamente, os valores de magnitude de tensão mínimo e máximo permitidos no sistema elétrico.
- $\beta_{i,j}$ ,  $\mu_{i,j}$  e  $\alpha_i$  representam os pesos agregados, respectivamente, aos valores de custo de operação da chave seccionadora  $i - j$  normalmente aberta, aos valores de custo de operação da chave seccionadora  $i - j$  normalmente fechada e ao custo de desconectar a barra  $i$  por unidades demandadas de carga;

Quanto às variáveis presentes no modelo matemático, as descrições são encontradas a seguir:

- $x_{i,j}$  é a variável binária associada à decisão sobre o estado operativo do ramo  $i - j$  na rede de distribuição. Sendo assim,  $x_{i,j} = 1$  indica que o ramo em questão encontra-se fechado e  $x_{i,j} = 0$  indica que o ramo encontra-se aberto;
- $y_i$  é a variável binária associada a decisão de energizar ou desenergizar a barra  $i$ . Dessa forma,  $y_i = 0$  indica que a barra  $i$  está sendo energizada e  $y_i = 1$  indica que a barra está desenergizada;
- $P_{i,j}$ ,  $Q_{i,j}$ ,  $H_{i,j}$  e  $I_{i,j}^{sqr}$  representam, respectivamente, o fluxo de potência ativa, o fluxo de potência reativa, o fluxo de potência artificial e o quadrado da magnitude de corrente presente no ramo  $i - j$ ;

- $P_{G_i}$ ,  $Q_{G_i}$  e  $H_{G_i}$  são, respectivamente, a geração de potência ativa, de potência reativa e de potência artificial na barra  $i$ ;
- $V_i^{sqr}$  representa o quadrado da magnitude de tensão pertinente à barra  $i$ ;
- $b_{i,j}$  é a variável que auxilia no cumprimento da segunda lei de Kirchhoff quando o ramo  $i - j$  está aberto, uma vez que, um ramo aberto não está sujeito ao cumprimento da Lei de Tensões de Kirchhoff e, nesse caso, a variável auxiliar assume o valor necessário para satisfazer a igualdade na equação referente a lei. Caso o ramo  $i - j$  esteja fechado ( $x_{i,j} = 1$ ) a variável auxiliar assume valor nulo.

A relação (1) representa a função objetivo do modelo matemático. A abordagem utilizada possui natureza multi-critério porém, conforme pode ser observado, os critérios são hierarquizados e representados em uma única função monobjetivo. A primeira parcela e a segunda parcela da função são referente ao custo de operação, respectivamente, de uma chave seccionadora normalmente aberta e de uma chave seccionadora normalmente fechada. Juntas, a primeira e a segunda parcela compreendem o critério de minimizar o número de operações de chaves necessário para que a restauração do sistema elétrico ocorra. A terceira parcela é referente ao critério de minimização do total de corte de carga. Os valores dos pesos associados a cada parcela da função objetivo podem apresentar valores diferentes para representar a existência de chaves de manobra telecomandadas e/ou cargas prioritária no sistema elétrico.

As relações (2)–(4) são as responsáveis pelo cumprimento, respectivamente, do balanço de potência ativa, do balanço de potência reativa e do balanço de potência artificial em cada barra do sistema elétrico. O cumprimento da primeira Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para Correntes) também é imposto por essas relações. Nessas restrições, o valor da variável  $y_i$  implica em como as demandas de cada barra  $i$  deverá ser atendida. Quando a barra está desenergizada, ou seja, quando  $y_i = 1$ , apenas a demanda de potência artificial deverá ser atendida, conforme a relação (4), pela subestação artificial através de ramos reais e artificiais. Quando  $y_i = 0$ , a barra  $i$  está energizada e, conforme (2) e (3), suas demandas de potência ativa e reativa deverão ser atendidas pela subestação em que a barra está conectada diretamente ou indiretamente.

A segunda Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para Tensões) é cumprida através de (5) e (6) nos laços fundamentais do sistema de energia elétrica (laço fundamental é o laço formado através da conexão das barras  $i$  e  $j$  à terra, uma vez que o circuito  $i - j$  esteja ativo). O cumprimento da segunda lei de Kirchhoff só interessa quando o ramo  $i - j$  está energizado, quando  $x_{i,j} = 0$  o ramo está desenergizado e a lei não é aplicada. Dessa forma, a variável auxiliar  $b_{i,j}$  assume o valor necessário para que a igualdade da relação (5) seja cumprida. O valor assumido pela variável auxiliar provém de (11), que possui como objetivo contribuir com o cumprimento de (5). A relação (6) além de complementar o cálculo do quadrado da magnitude de corrente utilizado na relação (5) que representa a aplicação da segunda lei também faz com que o mo-

delo assuma uma aparência cônica. A restrição, originalmente, era uma relação de igualdade e o modelo matemático assumia natureza não-linear. Após a aproximação da relação, o modelo passou a assumir a aparência de um problema de programação cônica de segunda ordem inteira mista (PCSOIM). A formulação cônica é assumida com o objetivo de tornar a formulação do problema menos complexa para que a resolução seja feita de forma mais eficaz através dos métodos de otimização clássica conhecidos que, por sua vez, interfere diretamente no tempo de processamento que os solucionadores comerciais levam para resolver o modelo.

Os limites físicos e operacionais da rede de distribuição de energia elétrica são cumpridos através das relações (7)–(10). O cumprimento é indispensável para que se obtenha um plano de restauração de alta qualidade, confiabilidade e viabilidade. A relação (7) é a responsável por estabelecer o limite de capacidade de geração de potência aparente das subestações reais presentes no sistema elétrico. A subestação fictícia  $S^f$  não é submetida a essa restrição, uma vez que não há geração de potência aparente na subestação. Os limites de fluxo de corrente máxima permitidos nas linhas são cumpridos e impostos através da relação (8) e quando  $x_{i,j} = 0$  o fluxo de corrente no ramo  $i - j$  deverá ser nulo. A relação (9) limita o fluxo de potência artificial no sistema elétrico. Apenas os ramos fictícios ativos e os ramos reais ativos e presentes na parcela desenergizada estão sujeitos a cumprimento da restrição. O fluxo de potência artificial  $H_{i,j}$  de um ramo inativo deverá ser nulo. O parâmetro  $M$  deve ser estritamente calibrado para não impedir que as barras desenergizadas possam ser conectadas à subestação fictícia. Um valor considerado adequado para o parâmetro  $M$  é o número de barras de carga disponíveis para o processo restaurativo. A relação (10) é responsável por limitar o módulo da tensão elétrica de cada barra do sistema elétrico aos limites mínimo e máximo permitidos.

As relações (11)–(14) são consideradas restrições complementares e possuem a principal função de auxiliarem o cumprimento de outras restrições. A relação (11) contribui com a atribuição do valor da variável auxiliar  $b_{i,j}$  utilizada na relação (5) quando o ramo em questão está desenergizado ( $x_{i,j} = 0$ ). A relação (12) auxilia a restrição referente ao fluxo de potência artificial (4) limitando que apenas a subestação fictícia pode gerar potência artificial. De forma análoga, as relações (13) e (14) são complementares às relações (2) e (3) e possuem o papel de limitar que a geração de potência ativa e reativa só acontece nas subestações reais.

A relação (15) juntamente com as relações (2)–(4) impõem as condições necessárias para que o sistema elétrico seja integralmente conexo e radial. A relação (15) limita o total de circuitos fechados que são necessários para o cumprimento da radialidade. O limite compreende tanto os circuitos fechados na parcela que está desenergizada quanto na que está sendo normalmente abastecida.

As relações (16)–(19) são restrições consideradas substitutas e possuem o objetivo de reduzir o espaço de busca, melhorando o tempo de processamento necessário para obter-se um plano de restauração de qualidade. Essas restrições são geradas a partir do conhecimento sobre

o problema da restauração e do funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica. O objetivo das relações (16) e (17) é de limitar o valor do fluxo de potência ativa e reativa do ramo  $i - j$ . Quando o ramo está ativo ( $x_{i,j} = 1$ ) o fluxo deve atender ao limite máximo permitido no ramo e quando o ramo está inativo ( $x_{i,j} = 0$ ) o fluxo deverá ser nulo. A equação (18) determina que toda barra esteja presente em pelo menos um circuito ativo, o que já é uma verdade, uma vez que até mesmo as barras que estão desenergizadas são conectadas e atendidas pelas subestação fictícia. A equação (19) por sua vez associa os valores de duas variáveis de decisão  $y_i$  e  $x_{i,j}$ . A relação obriga que duas barras conectadas por um circuito real ativo ( $x_{i,j} = 0$ ) tenham o mesmo valor de  $y_i$ , ou sejam, que ambas estejam energizadas ( $y_i = y_j = 0$ ) ou desenergizadas ( $y_i = y_j = 1$ ).

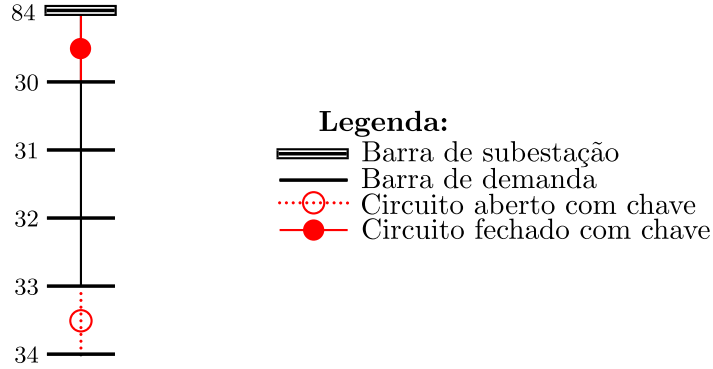
Por último, as relações (20) e (21) impõem a natureza binária das variáveis de decisão  $x_{i,j}$  e  $y_i$ .

No modelo matemático, a subestação fictícia possui como objetivo auxiliar o cumprimento da radialidade dos setores de cargas que ficaram sem abastecimento de energia. Esses setores são conectados à subestação fictícia e passam a demandar potência artificial. O chaveamento de chaves fictícias a fim de conectar esses setores reais à subestação fictícia não é considerado na função objetivo.

### 2.1.2 Adaptações realizadas no modelo matemático

Para que o modelo matemático considere que nem todos os ramos do sistema de distribuição possuem chaves de manobra alocadas, algumas adaptações são necessárias. Em um sistema de distribuição com poucas chaves de manobras disponíveis, as cargas podem ser agrupadas em setores de carga ou ilhas de carga, o que facilita os cálculos e diminui o tempo de processamento, uma vez que o setor inteiro pode ser compreendido como uma carga só. Dessa forma, é necessário que os valores referentes à variável de decisão sobre o estado operativo de circuitos ativos dentro de um mesmo setor de carga sejam fixados, ou seja, todo ramo que estiver conectando duas barras de carga pertencente ao mesmo setor deverá assumir obrigatoriamente  $x_{i,j} = 1$ . Por exemplo, na Figura 2 as barras 30, 31, 32 e 33 possuem em seus extremos chaves alocadas em ramos, dessa forma, toda a área delimitada entre as chaves 30-84 e 33-34 compõe o setor de carga 30. Sendo assim, o valor das chaves 32-33, 31-32 e 30-31 é fixado em 1 ( $x_{32,33} = x_{31,32} = x_{30,31} = 1$ ).

Figura 2 - Exemplo de setor de carga



Fonte: Elaboração do autor

## 2.2 MODELO MATEMÁTICO ESPECIALIZADO PROPOSTO

Nesta seção, o modelo matemático especializado é apresentado e todos os elementos que compõem o modelo são discutidos e analisados. O modelo matemático é apresentado nas relações (22)–(48).

$$\min v = \sum_{(i,j) \in \Omega_a} \beta_{i,j} x_{i,j} + \sum_{(i,j) \in \Omega_f} \mu_{i,j} (1 - x_{i,j}) + \sum_{i \in \Omega_b} \alpha_i (P_{D_i} + Q_{D_i}) y_i \quad (22)$$

s.a :

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l} P_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l} (P_{i,j} + R_{i,j} I_{i,j}^{sqr}) + P_{G_i} = P_{D_i} (1 - y_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (23)$$

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l} Q_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l} (Q_{i,j} + X_{i,j} I_{i,j}^{sqr}) + Q_{G_i} = Q_{D_i} (1 - y_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (24)$$

$$\sum_{(j,i) \in \Omega_l \cup \Omega_h} H_{j,i} - \sum_{(i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h} H_{i,j} + H_{G_i} = y_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (25)$$

$$V_i^{sqr} - V_j^{sqr} = 2(P_{i,j} R_{i,j} + Q_{i,j} X_{i,j}) + Z_{i,j}^2 I_{i,j}^{sqr} + b_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (26)$$

$$V_i^{sqr} - V_j^{sqr} = 2(P_{i,j} R_{i,j} + Q_{i,j} X_{i,j}) + Z_{i,j}^2 I_{i,j}^{sqr} \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (27)$$

$$V_j^{sqr} I_{i,j}^{sqr} \geq P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2 \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \quad (28)$$

$$(P_{G_i}^2 + Q_{G_i}^2) \leq \bar{S}_{G_i}^2 \quad \forall i \in \Omega_S, i \neq S^f \quad (29)$$

$$I_{i,j}^{sqr} \leq \bar{I}_{i,j}^2 x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (30)$$

$$I_{i,j}^{sqr} \leq \bar{I}_{i,j}^2 \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (31)$$

$$|H_{i,j}| \leq M x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \cup \Omega_h \quad (32)$$

$$|H_{i,j}| \leq M \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (33)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{sqr} \leq \bar{V}^2 \quad \forall (i,j) \in \Omega_b \quad (34)$$

$$|b_{i,j}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - x_{i,j}) \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (35)$$

$$H_{G_i} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, i \neq S^f \quad (36)$$

$$P_{G_i} = 0 \quad \forall i \in (\Omega_b - \Omega_S) \cup S^f \quad (37)$$

$$Q_{G_i} = 0 \quad \forall i \in (\Omega_b - \Omega_S) \cup S^f \quad (38)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \cup \Omega_h} x_{i,j} = |\Omega_b| - |\Omega_S| - |\Omega_{SC}| \quad (39)$$

$$|P_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (40)$$

$$|P_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (41)$$

$$|Q_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} x_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (42)$$

$$|Q_{i,j}| \leq \bar{V} \bar{I}_{i,j} \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (43)$$

$$|y_i - y_j| \leq (1 - x_{i,j}) \quad \forall (i,j) \in \Omega_a \cup \Omega_f \quad (44)$$

$$y_i = y_j \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (45)$$

$$y_j = y_i \quad \forall (i,j) \in \Omega_{SC} \quad (46)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \Omega_l \cup \Omega_h \quad (47)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (48)$$

### 2.2.1 Descrição do modelo matemático utilizado

O modelo matemático especializado possui restrições, conjuntos e variáveis já utilizados no modelo matemático proposto por Romero et al. (2016) que foi adaptado na Seção 2.1. A grande diferença entre os modelos matemáticos é que o modelo apresentado nas relações (22) a (48) considera que nem todos os ramos da rede de distribuição possuem chaves de manobra alocadas. Devido a essa diferença, alguns conjuntos e restrições foram modificados e restrições novas foram adicionadas para que o modelo matemático possa impor todas as restrições necessárias para o funcionamento de uma rede de distribuição em estado restaurativo de operação.

Começando pelos conjuntos utilizados no modelo matemático, o conjunto de barras disponíveis para o processo de restauração ( $\Omega_b$ ), o conjunto de barras de subestação ( $\Omega_S$ ), o conjunto de chaves seccionadoras normalmente abertas ( $\Omega_a$ ) e o conjunto de chaves seccionadoras normalmente fechadas ( $\Omega_f$ ) não sofreram alterações, já os conjuntos  $\Omega_l$  e  $\Omega_h$  sofreram alterações devido a inserção dos conjuntos  $\Omega_{SC}$  e  $\Omega_{bs}$ . O conjunto  $\Omega_{SC}$  compreende todos os ramos que não possuem chaves alocadas e passa a fazer parte do conjunto  $\Omega_l$  que compreende todas os ramos que participam da restauração. É válido lembrar que todos os ramos e barras indicados como locais de falta são isoladas e, dessa forma, não fazem parte do processo de restauração. O conjunto  $\Omega_{bs}$  compreende todas as barras que representam setores, para cada setor de carga delimitado por chaves de manobra, uma barra é escolhida para representá-lo e essa barra, por

sua vez, compõe o conjunto  $\Omega_{bs}$ . Para cada barra pertencente ao conjunto  $\Omega_{bs}$  existe um ramo fictício pertencente ao conjunto de ramos fictícios  $\Omega_h$ . Quanto aos parâmetros e às variáveis presentes no modelo matemático, as descrições são as mesmas apresentadas na Seção 2.1.2.

A relação (22) representa a função objetivo do modelo matemático. A função objetivo é a mesma representada por (1) e a descrição da relação é a mesma apresentada na Seção 2.1.2. O cumprimento da Primeira Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para Correntes) é imposto por (23)–(25) e suas respectivas descrições são as mesmas que as relações (2)–(4) que foram apresentadas na Seção 2.1.2.

As relações (26)–(28) são as responsáveis por impor o cumprimento da Segunda Lei de Kirchhoff (Lei de Kirchhoff para Tensões) nos laços fundamentais do sistema de energia elétrica. O cumprimento da Segunda Lei de Kirchhoff é necessário apenas quando o ramo  $i - j$  está energizado, quando o ramo estiver desenergizado ( $x_{i,j} = 0$ ) a lei não é aplicada e a variável  $b_{i,j}$  assume o valor necessário para que a igualdade (26) seja estabelecida. As relações (26) e (27) correspondem ao cálculo da queda de tensão em cada circuito com chave e sem chave, respectivamente. Além de auxiliar o cumprimento da segunda lei, (28) também auxilia o modelo a assumir uma aparência cônica, assim como (6), discutida na Seção 2.1.2.

As restrições referentes aos limites físicos e operacionais da rede de distribuição de energia elétrica são impostos por (29)–(34). Essas restrições são de extrema importância para que o plano de restauração obtido seja de alta qualidade, confiabilidade e viabilidade. A relação (29) estabelece o limite de capacidade de geração de potência aparente das subestações reais presentes no sistemas elétrico. O limite máximo de corrente permitido nas linhas é imposto pelas relações (30) e (31). Quando um ramo com chave está aberto ( $x_{i,j} = 0$ ), a relação (30) limita que o fluxo de corrente seja nulo. Quando um ramo sem chave alocada que está presente na parcela desenergizada do sistema, o seu fluxo de corrente deverá ser nulo e a relação (31) é a responsável por impor esse limite. De forma análoga à relação (9) discutida na Seção 2.1.2, as relações (32) e (33) limitam o fluxo de potência artificial permitido no sistema elétrico. O limite do módulo da tensão elétrica de cada barra do sistema elétrico é imposto pela relação (34) assim como acontece no modelo anterior através da relação (10).

As relações (35)–(38) são restrições consideradas complementares e possuem a função de auxiliar o cumprimento de outras restrições. A relação (35) fornece o valor necessário da variável auxiliar  $b_{i,j}$  utilizado na relação (26) quando o ramo  $i - j$  está desenergizado. As relações (36)–(38) auxiliam o fluxo de potência artificial, potência ativa e potência reativa efetuado pelas relações (25)–(24), respectivamente. A relação (36) limita que a geração de potência artificial só pode acontecer na barra de subestação fictícia. As relações (37) e (38) limitam que apenas as barras de subestações reais podem gerar potência ativa e potência reativa, respectivamente.

As condições necessárias para que o sistema elétrico opere de forma integralmente conexa e radial são impostas por (39) que possui a mesma descrição que (15) discutida na Seção 2.1.2.



As relações (40)–(46) são consideradas restrições substitutas e possuem grande importância, pois reduzem o espaço de busca do problema com a integralidade relaxada e ajudam no processo de sondagem do algoritmo *branch and bound* normalmente usado na resolução de problemas de programação com variáveis inteiras. Assim como as relações (16)–(19) do modelo anterior, essas restrições foram geradas a partir do conhecimento sobre o problema de restauração e sobre o funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica. As relações (40) e (41) limitam o valor do fluxo de potência ativa do ramo  $i - j$ . Quando o ramo está ativo ( $x_{i,j} = 1$ ) o fluxo deve atender ao limite máximo permitido na linha e quando o ramo está inativo ( $x_{i,j} = 0$ ) o fluxo deve ser nulo. O fluxo de potência reativa no ramo  $i - j$  é limitado por (42) e (43) devendo atender ao limite máximo permitido na linha quando o ramo está ativo ( $x_{i,j} = 1$ ) e nulo quando o ramo estiver inativo ( $x_{i,j} = 0$ ). A relação (44) é similar a (19) e sua descrição é discutida na Seção 2.1.2. As restrições (45) e (46) impõem que o valor da variável referente ao estado operativo da barra  $i$  e da  $j$  para todo ramo  $i - j$  que não possui chave alocada sejam o mesmo valor.

Por último, (47) e (48) impõem a natureza binária das variáveis de decisão  $x_{i,j}$  e  $y_i$ .

### 3 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, o modelo matemático especializado apresentado no Capítulo 2 é testado e os resultados obtidos são discutidos. O modelo matemático foi desenvolvido no ambiente de modelagem matemática AMPL e resolvido com a ajuda do solver comercial especialista em problemas de programação, cônico de segunda ordem e linear CPLEX. O computador utilizado para realizar os testes possui sistema operacional de 64 bits, processador IntelCorei7-4790 com 3,60 GHz e memória RAM de 4 GB.

A princípio, os sistemas testes consideram que todos os ramos possuem chaves seccionadoras alocadas, uma vez que o modelo matemático utilizado é especializado para a restauração em redes de distribuição radiais de energia elétrica que possuem poucas chaves de manobra alocadas, é necessário adaptar os sistemas testes, alocando chaves de manobra apenas em pontos estratégicos do sistema. As adaptações realizadas, assim como, as características de cada sistema teste e os resultados da resolução do modelo matemático para cada caso de falta são apresentados.

#### 3.1 SISTEMA DE 53 BARRAS

O primeiro sistema utilizado para realizar os testes é o mesmo de Romero et al. (2016). Esse sistema de distribuição possui 53 barras, sendo 3 subestações e 50 barras de cargas, e 61 ramos. Uma vez que o modelo matemático apresentado assume que nem todos os ramos possuem chaves alocadas é necessário realizar pequenas adaptações na topologia da rede de distribuição, sendo assim, dos 61 ramos no sistema, considera-se que apenas 27 ramos possuem chaves alocadas conforme pode ser visto na Figura 3. A alocação dessas chaves implica que algumas barras de carga podem ser agrupadas em setores de carga. Cada setor de carga agrupado é delimitado por chaves seccionadoras normalmente fechadas e/ou por chaves seccionadoras normalmente abertas passando a existir 16 setores de cargas diferentes no sistema elétrico. A numeração adotada para cada setor de carga e as barras de carga que o compõe são apresentados na Tabela 1. Dessa forma, por exemplo, observando a Tabela 1 e a Figura 3, o setor 1 é composto pelas barras 1, 2, 9 e 17, sendo delimitado pelas chaves de manobra 101-1, 10-9 e 22-9 e também pela chave de interconexão 18-17.

O sistema teste, em condições operativas normais, possui uma demanda de potência aparente de 50.742,95 kVA, sendo 45.664,70 kW e 22.118,24 kVAr. A tensão nominal do sistema é de 13,8 kV e os limites mínimo e máximo de tensão permitidos são, respectivamente, de 0,95

e 1,0 pu. Os demais dados, como os dados de demanda de cada barra e os dados físicos dos ramos do sistema teste podem ser encontrados no Apêndice A.1.

De acordo com a topologia inicial apresentada na Figura 3, foram simulados 16 casos diferentes de falta e as informações de cada cenário de falta são apresentados na Tabela 2. Os setores identificados por um asterisco (\*) apontam cenários em que a falta se encontra em setores terminais. Nesses casos, como pode ser observado na tabela, a isolamento do setor de falta não implica que algum setor de carga fique desenergizado, isto é, não existe demanda para restaurar. Dessa forma, não há restauração de cargas que foram desenergizadas e a solução é trivial.

Tabela 1 - Identificação dos setores de carga no sistema de 53 barras

<b>Setor</b>	<b>Barras no setor</b>	<b>Setor</b>	<b>Barras no setor</b>
1	1, 2, 9, 17	15	15, 16, 40
3	3, 4, 5	18	18, 19, 20, 21
6	6, 28	22	22, 23, 24, 25
7	7, 8, 26, 27	31	31, 37
10	10	32	32, 33, 38, 39
11	11, 12, 44, 45	34	34, 35, 36
13	13, 29, 30, 43	41	41
14	14, 46, 47	42	42, 48, 49, 50

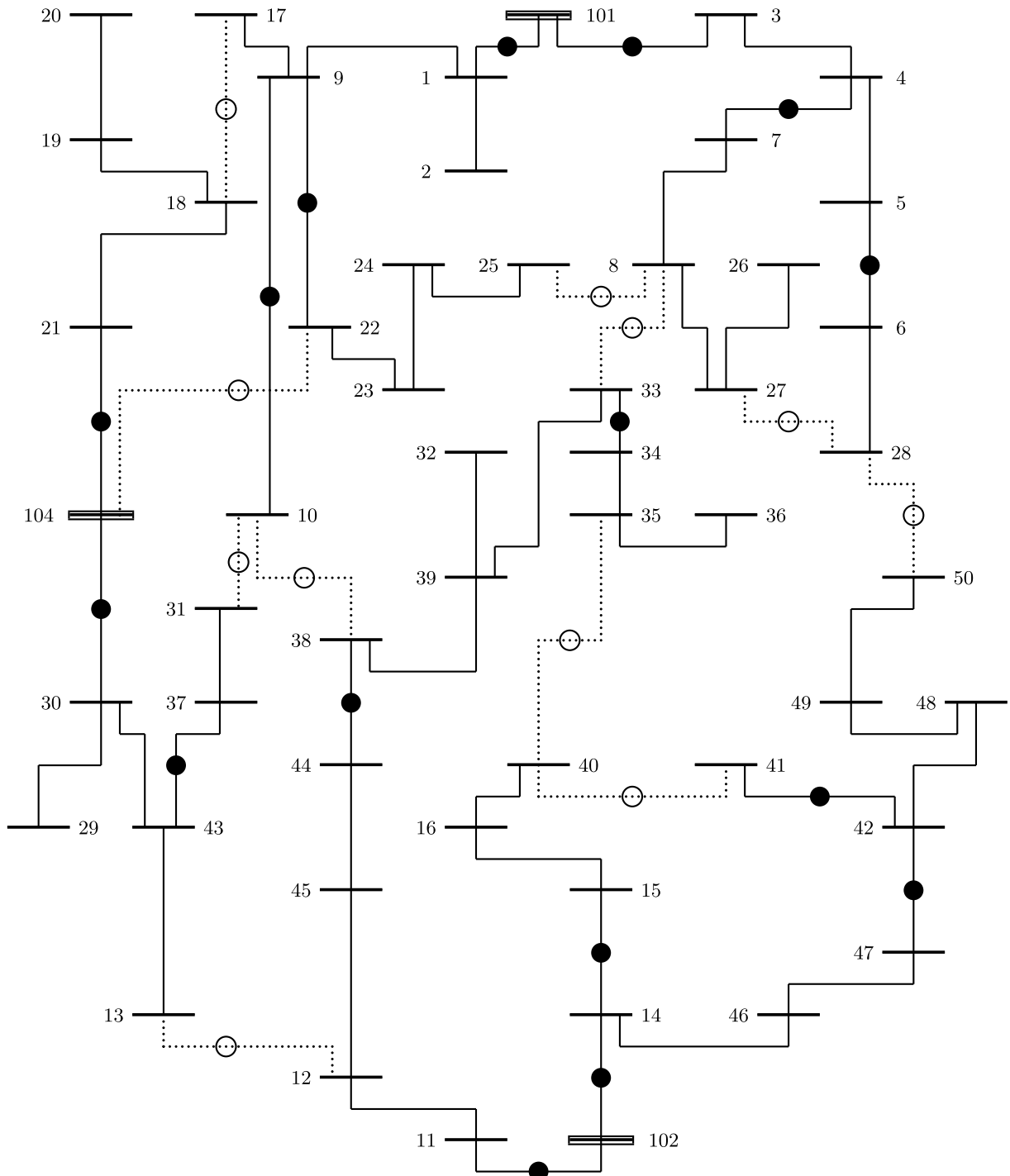
Fonte: Elaboração do autor

Tabela 2 - Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 53 barras

<b>Setor Isolado</b>	<b>Chaves usadas para o isolamento</b>	<b>Setores desconectados</b>	<b>Cargas não atendidas (kVA)</b>
1	101-1, 10-9, 22-9, 18-17	10, 22	4.928,00
3	101-3, 7-4, 6-5	6, 7	5.389,99
6*	6-5	-	-
7*	7-4	-	-
10*	10-9	-	-
11	102-11, 13-12, 38-44	32, 34	7.007,03
13	104-30, 13-12, 37-43	31	2.156,00
14	102-14, 15-14, 47-42	15, 41, 42	6.852,96
15*	15-14	-	-
18*	104-21	-	-
22*	22-9	-	-
31*	37-43	-	-
32	38-44, 10-38, 8-33, 34-33	34	1.848,02
34*	34-33	-	-
41*	42-41	-	-
42	47-42, 42-41, 28-50	41	693,00

Fonte: Elaboração do autor

Figura 3 - Topologia inicial do sistema de 53 barras

**Legenda:**

- ▬▬▬ Barra de subestação
- Barra de demanda
- ⋯○⋯ Circuito aberto com chave
- Circuito fechado com chave

Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Os resultados obtidos após a aplicação e a implementação do modelo matemático apresentado no Capítulo 2 são apresentados na Tabela 3 e discutidos a seguir:

Tabela 3 - Resultados obtidos para o sistema de 53 barras

Setor Isolado	Chaves indicadas para operação			Setores Desconectados	Total de cargas (kVA)		Tempo (s)
	Abertura; Fechamento	Total	Fictícias		Cortadas	Restauradas	
1	- ; 104-22, 10-38	2	0	0	0	4.928,00	1
3	- ; 28-50	1	$S^f$ -26	7	4.312,00	1.077,99	6
11	34-33 ; 8-33, 35-40	3	0	0	0	7.007,03	1
13	- ; 10-31	1	0	0	0	2.156,00	1
14	42-41 ; 28-50	2	$S^f$ -15, $S^f$ -41	15, 41	4.311,97	6.852,96	1
32	- ; 35-40	1	0	0	0	1.848,02	1
42	- ; 40-41	1	0	0	0	693,00	1

Fonte: Elaboração do autor

- Falta no setor 1:** Nesse cenário de falta, o setor 1 (composto pelas barras 1, 2, 9 e 17) é isolado, portanto, as chaves de fronteira utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 101-1, 10-9, 22-9 e 18-17) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores 10 (composto pela barra 10) e 22 (compostos pelas barras 22, 23, 24 55) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração proposto, o setor de carga 10 (totalizando 2.233,01 kVA) passa a ser abastecido pela subestação 102 através do fechamento da chave 10-38 e o setor de carga 22 (totalizando 2.694,99 kVA) passa a ser abastecido pela subestação 104 através do fechamento da chave 104-2. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9666 pu na barra 36.
- Falta no setor 3:** Nesse cenário de falta, o setor 3 (composto pelas barras 3, 4 e 5) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 101-3, 7-4 e 6-5) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores de carga 6 (composto pelas barras 6 e 28) e 7 (composto pelas barras 7, 8, 26 e 27) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 6 (totalizando 1.077,99 kVA) passa a ser atendido pela subestação 102 através do fechamento da chave 28-50, e o setor 7 permanece sem abastecimento. Nesse cenário foram restaurados 20% do total de carga restaurável. O corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do sistema seja completamente atendida. Na reconfiguração proposta pelo plano de restauração, a barra 6 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9707 pu. A topologia final do sistema, após ser realizado a restauração proposta, pode ser observada na Figura 4.
- Falta no setor 11:** Nesse cenário de falta, o setor de carga 11 (composto pelas barras 11, 12, 44 e 45) é isolado, portanto, as chaves de fronteira utilizadas para o isolamento

(as chaves 102-11, 13-12 e 38-44) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores de carga 32 (composto pelas barras 32, 33, 38 e 39) e 34 (composto pelas barras 34, 35 e 36) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, os setores 32 (totalizando 5.159,01 kVA) e 34 (totalizando 1.848,02 kVA) passam a ser abastecidos pelas subestações 101 e 102, respectivamente. Para que o restabelecimento aconteça, é necessário abrir a chave 34-33, que conecta os setores entre si, e fechar as chaves 8-33 e 35-40, que são as responsáveis pelo restabelecimento dos setores. Nesse caso de falta não houve corte de carga, todas as cargas desenergizadas foram restabelecidas e o menor módulo de tensão registrado é de 0,9679 pu na barra 32.

- **Falta no setor 13:** Nesse cenário de falta, o setor de carga 13 (composto pelas barras 13, 29, 30 e 43) e as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 13-12, 37-43 e 104-30) são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 31 (composto pelas barras 31 e 37) ficou desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, para que o setor de carga 31 (totalizando 2.156,00 kVA) seja restabelecido, é necessário fechar a chave seccionadora 10-31 e, por consequência da manobra de chaveamento, o setor passa a ser atendido pela subestação 101. Dessa forma, todas as cargas desenergizadas foram restabelecidas completamente e o menor módulo de tensão registrado é de 0,9714 pu na barra 36.
- **Falta no setor 14:** Nesse cenário de falta, o setor de carga 14 (composto pelas barras 14, 46 e 47) e as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 102-14, 15-14 e 47-42) são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores de carga 15 (composto pelas barras 15, 16 e 40), 41 (composto pela barra 41) e 42 (composto pelas barras 42, 48, 49 e 50) ficaram sem fornecimento. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 42 (totalizando 2.540,99 kVA) é separado do setor 41 (totalizando 693,00 kVA) e reconectado à subestação 101 através da abertura da chave 42-41 e o fechamento da chave 28-50. Nesse caso de falta, o setor de carga 42 foi totalmente restaurado representando 61% do total de carga restaurável e os setores 15 e 40 permanecem desconectados do sistema totalizando 4.311,97 kVA de carga desenergizada. Na reconfiguração proposta, a barra 42 apresenta o menor módulo de tensão, correspondente a 0,9672 pu.
- **Falta no setor 32:** Nesse cenário de falta, o setor de carga 32 (composto pelas barras 32, 33, 38 e 39) e as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 38-44, 10-38, 8-33 e 34-33) são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 34 (composto pelas barras 34, 35 e 36) fica sem abastecimento. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor 34 (totalizando 1.848,02 kVA) é reconectado à subestação 102 através do fechamento da chave 35-40.

Nesse caso de falta, todas as cargas desenergizadas são restabelecidas e o menor módulo de tensão registrado é de 0,9804 pu na barra 50.

- **Falta no setor 42:** Nesse cenário de falta, o setor de carga 42 (composto pelas barras 42, 48, 49 e 50) e as chaves utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 47-42, 42-41 e 28-50) são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor 41 (composto pelas barra 41) fica sem abastecimento. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor 41 (totalizando 693,00 kVA) passa a ser abastecido pela subestação 102 através do fechamento da chave 40-41. Nesse caso, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9714 pu. na barra 36.

Nos casos onde a falta simulada está presente em um setor de carga terminal, como pode ser observado na Tabela 2, não há cargas desenergizadas para serem restabelecidas, ou seja, não é necessário efetuar nenhuma manobra de chaveamento.

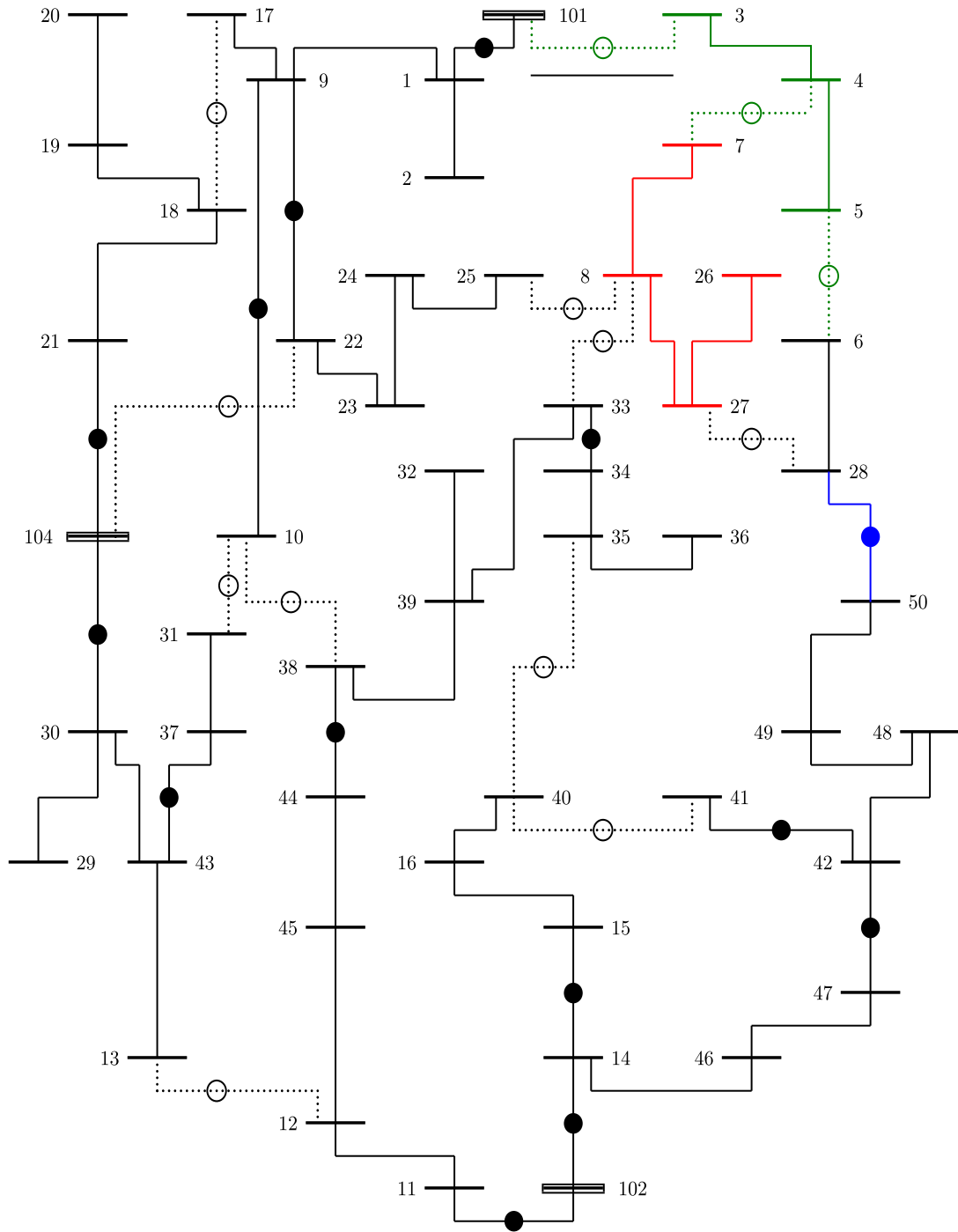
### 3.2 SISTEMA DE 84 BARRAS

O segundo sistema utilizado para realizar testes é o mesmo empregado por Possagnolo (2015). Esse sistema de distribuição possui 84 barras, sendo 83 barras de carga e uma barra de subestação, e 96 ramos. Assim como o sistema de 53 barras, adaptações foram realizadas na topologia da rede de distribuição e, dessa forma, dos 96 ramos no sistema, considera-se que apenas 36 ramos possuem chaves alocadas. As adaptações na topologia podem ser analisadas na Figura 5. Após a alocação de chaves nos ramos, as cargas que são delimitadas por chaves seccionadoras normalmente fechadas e/ou chaves seccionadoras normalmente abertas são agrupadas em setores de carga. A numeração adotada para cada setor de carga e as barras de carga que o compõe são apresentados na Tabela 4. Dessa forma, como pode ser analisado a partir da Figura 5 e da Tabela 4, as 84 barras de cargas são agrupadas e passam a existir 23 setores de carga nesse sistema elétrico.

O sistema teste, operando em condição normal, possui uma demanda ativa e reativa de, respectivamente, 28.351 kW e 20.700 kVAr. A tensão nominal do sistema é de 11,40 kV e os limites mínimo e máximo de tensão permitidos são, respectivamente, de 0,93 e 1,0 pu. No Apêndice A.2 são apresentados os demais dados referente ao sistema, como os dados de demanda de cada barra e os dados de cada ramo presente no sistema elétrico utilizado.

De acordo com a topologia inicial apresentada na Figura 5, foram simulados 23 casos diferentes de falta e as informações de cada cenário de falta estão expostas na Tabela 5. Considera-se para essas simulações que a falta pode ter ocorrido em qualquer barra ou em qualquer ramo presentes no setor que está em falta. Após a indicação do setor em falta, esse setor deve ser isolado para reparo e excluído do problema para a tentativa de restauração do sistema. Os casos de

Figura 4 - Configuração proposta para o caso de falta no setor 3



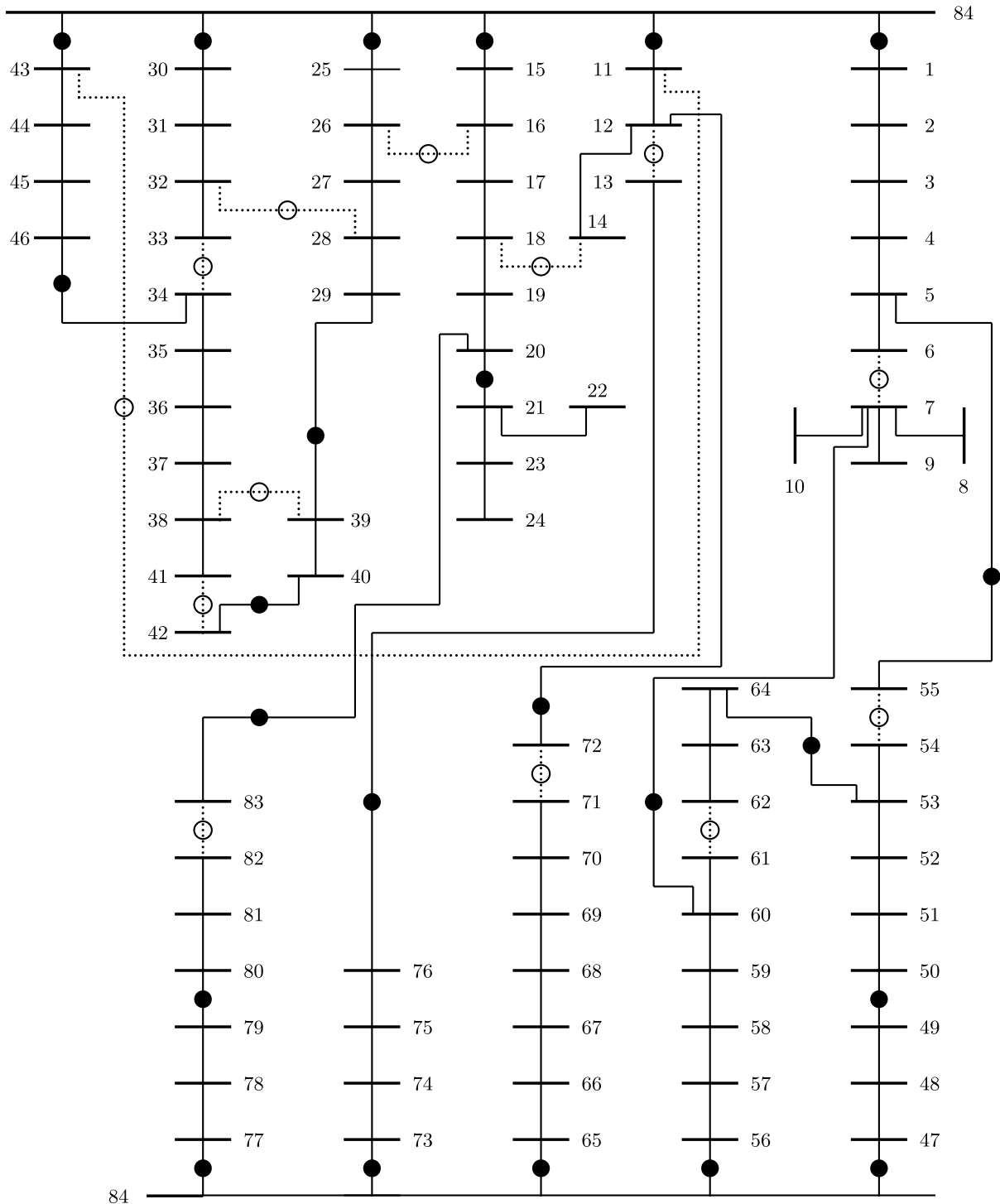
**Legenda:**

- Barra de subestação
- Barra de demanda
- Circuito aberto com chave
- Circuito fechado com chave
- Parcela desenergizada
- Parcela Isolada
- Circuito indicado para operação

Fonte: Adaptado de Souza (2014)



Figura 5 - Topologia inicial do sistema de 84 barras

**Legenda:**

- ==== Barra de subestação
- Barra de demanda
- ⋯⊙⋯⋯ Circuito aberto com chave
- Circuito fechado com chave

Fonte: Adaptado de Possagnolo (2015)

falta que possuem um asterisco (\*) são considerados casos triviais devido a sua localização na topologia. Nesses casos, a falta acontece em um setor terminal do sistema elétrico e a isolamento

Tabela 4 - Identificação dos setores de carga no sistema de 84 barras

Setor	Barras no setor	Setor	Barras no setor
1	1, 2, 3, 4, 5, 6	47	47, 48, 49
7	7, 8, 9, 10	50	50, 51, 52, 53, 54
11	11, 12, 14	55	55
13	13	56	56, 57, 58, 59, 60, 61
15	15, 16, 17, 18, 19, 20	62	62, 63, 64
21	21, 22, 23, 24	65	65, 66, 67, 68, 69, 70, 71
25	25, 26, 27, 28, 29	72	72
30	30, 31, 32, 33	73	73, 74, 75, 76
34	34, 35, 36, 37, 38, 41	77	77, 78, 79
39	39, 40	80	80, 81, 82
42	42	83	83
43	43, 44, 45, 46		

Fonte: Elaboração do autor

da falta não implica em desenergização de barras de demanda e, portanto, não existe demanda a ser restaurada. Dessa forma, não há restauração de cargas que foram desenergizadas e a solução é trivial.

Os resultados obtidos após a aplicação e a implementação do modelo matemático no Capítulo 2 são apresentados na Tabela 6 e discutidos a seguir:

- **Falta no setor 1:** Nesse cenário de falta, o setor 1 (composto pelas barras 1, 2, 3, 4, 5 e 6) é isolado, portanto, as chaves de fronteira utilizadas para isolar a falta (as chaves 84-1, 5-55 e 6-7) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor 55 (composto pela barra 55) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 55 (totalizando 215,41 kVA) é completamente restaurado a partir do fechamento da chave 54-55. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão é de 0,9532 pu na barra 71.
- **Falta no setor 11:** Nesse cenário de falta, o setor 11 (composto pelas barras 11, 12 e 14) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-11, 12-72 e 12-13) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 72 (composto pela barra 72) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 72 (totalizando 250,00 kVA) é completamente restaurado a partir do fechamento da chave 71-72. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9488 pu na barra 72.

Tabela 5 - Informações dos cenários de falta permanente simulados no sistema de 84 barras

Setor Isolado	Chaves usadas para o isolamento	Setores desconectados	Cargas não atendidas (kVA)
1	84-1, 5-55, 6-7	55	215,41
7*	7-60, 6-7	-	-
11	84-11, 12-72, 12-13, 14-18	72-	250,00
13*	13-76, 12-13	-	-
15	84-15, 20-21, 20-83, 14-18, 16-26	21, 83	1.228,34
21*	20-21	-	-
25	84-25, 29-39, 16-26, 28-32	39, 42	103,03
30*	84-30, 33-34, 28-32	-	-
34*	34-46, 38-39, 33-34, 41-42	-	-
39	29-39, 40-42, 38-39	42	58,31
42*	40-42, 41-42	-	-
43	84-43, 34-46, 11-43	34	1.534,08
47	84-47, 49-50	50, 62	4.015,92
50	49-50, 53-64, 54-55	62	983,28
55*	5-55, 54-55	-	-
56	84-56, 7-60, 61-62	7	1.647,81
62*	53-62, 61-62	-	-
65*	84-65, 71-72	-	-
72*	12-72, 71-72	-	-
73	84-73, 13-76	13	1.000,00
77	84-77, 79-80	80	964,65
80*	79-80, 82-83	-	-
83*	20-83, 82-83	-	-

Fonte: Elaboração do autor

- **Falta no setor 15:** Nesse cenário de falta, o setor 15 (composto pelas barras 15, 16, 17, 18, 19 e 20) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-15, 20-21, 20-83, 16-26 e 14-18) o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores de carga 21 (composto pelas barras 21, 22, 23 e 24) e 83 (composto pela barra 83) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 21 (totalizando 690,20 kVA) e o setor 83 (totalizando 538,14 kVA) permanecem sem abastecimento. Nesse cenário, o corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do sistema seja completamente atendida e a barra 71 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9532 pu.
- **Falta no setor 25:** Nesse cenário de falta, o setor 25 (composto pelas barras 25, 26, 27, 28 e 29) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-25, 29-39, 16-26 e 28-32) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, os setores de carga 39 (composto pelas barras 39 e 40) e 42

Tabela 6 - Resultados obtidos para o sistema de 84 barras

Setor Isolado	Chaves indicadas para operação			Setores Desconectados	Total de cargas (kVA)		Tempo (s)
	Abertura; Fechamento	Total	Fictícias		Cortadas	Restauradas	
1	- ; 54-55	1	-	-	0	215,41	0,5
11	- ; 71-72	1	-	-	0	250,00	0,5
15	- ; -	-	$S^f$ -21, $S^f$ -83	21 , 83	1228,34	0	1
25	- ; 38-39	1	-	-	0	103,03	1
39	- ; 41-42	1	-	-	0	58,31	2
43	- ; -	-	$S^f$ -34	34	1534,09	0	8
47	53-64 ; 61-62	2	$S^f$ -53	50	3032,65	983,28	1
50	- ; 61-62	-	-	-	0	983,28	0,5
56	- ; -	-	$S^f$ -10	7	1647,82	0	1
73	- ; 12-13	1	-	-	0	1.000,00	0,5
77	20-21 ; 82-83	2	$S^f$ -21	21	690,2	964,65	1

Fonte: Elaboração do autor

(composto pela barra 42) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 39 (totalizando 44,72 kVA) e o setor 42 (totalizando 58,31 kVA) são restabelecidos completamente através do fechamento da chave 41-42. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9532 pu na barra 71.

- **Falta no setor 39:** Nesse cenário de falta, o setor 39 (composto pelas barras 39 e 40) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 29-39, 40-42 e 38-39) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 42 (composto pela barra 42) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 42 (totalizando 58,31 kVA) é restabelecido completamente através do fechamento da chave 41-42. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9532 pu na barra 71.
- **Falta no setor 43:** Nesse cenário de falta, o setor 43 (composto pelas barras 43, 44, 45 e 46) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-43, 34-46 e 11-43) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 34 (composto pelas barras 34, 35, 36, 37, 38 e 41) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 34 (totalizando 1.534,08 kVA) permanece sem abastecimento. Nesse cenário, o corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do

sistema seja completamente atendida. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9532 pu na barra 71.

- **Falta no setor 47:** Nesse cenário de falta, o setor 47 (composto pelas barras 47, 48 e 49) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-47 e 49-50) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setores de carga 50 (composto pelas barras 50, 51, 52, 53 e 54) e 62 (composto pelas barras 62, 63 e 64) ficaram desenergizados. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 62 (totalizando 983,28 kVA) é restabelecido completamente através do fechamento da chave 61-62, o setor de carga 50 (totalizando 3.032,64 kVA) por sua vez, permanece sem abastecimento e a chave de interconexão desse setor com o setor 62 é aberta. Nesse cenário foram restaurados 20% do total de carga restaurável. O corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do sistema seja completamente atendida. A barra 9 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9364 pu.
- **Falta no setor 50:** Nesse cenário de falta, o setor 50 (composto pelas barras 50, 51, 52, 53 e 54) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 49-50, 53-64 e 54-55) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 62 (composto pelas barras 62, 63 e 64) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 62 (totalizando 983,28 kVA) é restabelecido completamente através do fechamento da chave 61-62. Nesse cenário de falta, todas as cargas que ficaram desenergizadas foram restabelecidas completamente. Na reconfiguração proposta, o menor módulo de tensão registrado é de 0,9384 pu na barra 64.
- **Falta no setor 56:** Nesse cenário de falta, o setor 56 (composto pelas barras 56, 57, 58, 59, 60 e 61) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-56, 7-60 e 61-62) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 7 (composto pelas barras 7, 8, 9 e 10) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 7 (totalizando 1.647,81 kVA) permanece sem abastecimento. Nesse cenário, o corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do sistema seja completamente atendida e a barra 71 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9532 pu.
- **Falta no setor 73:** Nesse cenário de falta, o setor 73 (composto pelas barras 73, 74, 75 e 76) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-73 e 13-76) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 13 (composto pela barra 13) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor

de carga 13 (totalizando 1.000,00 kVA) é restabelecido completamente através do fechamento da chave 12-13. Nesse cenário a barra 71 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9532 pu.

- **Falta no setor 77:** Nesse cenário de falta, o setor 77 (composto pelas barras 77, 78 e 79) é isolado, portanto, as chaves de fronteiras utilizadas para o isolamento da falta (as chaves 84-77 e 79-80) e o setor em questão são excluídos do problema. À jusante da seção em falta, o setor de carga 80 (composto pelas barras 80, 81 e 82) fica desenergizado. De acordo com o plano de restauração elaborado pelo modelo matemático proposto, o setor de carga 80 (totalizando 964,65 kVA) é restabelecido completamente através do fechamento da chave 82-83 e, em jusante a restaurar o setor 80, a chave 20-21 é aberta e o setor 21 (composto pelas barras 21, 22, 23 e 24 e totalizando 690,2 kVA) fica sem abastecimento. Nesse cenário, o corte de carga foi necessário para que a factibilidade operacional do sistema seja completamente atendida e a barra 71 apresenta o menor módulo de tensão, que corresponde a 0,9532 pu. A topologia final do sistema nesse caso de falta após a implementação do plano de restauração e a manipulação das chaves sugeridas pode ser observada na Figura 6.

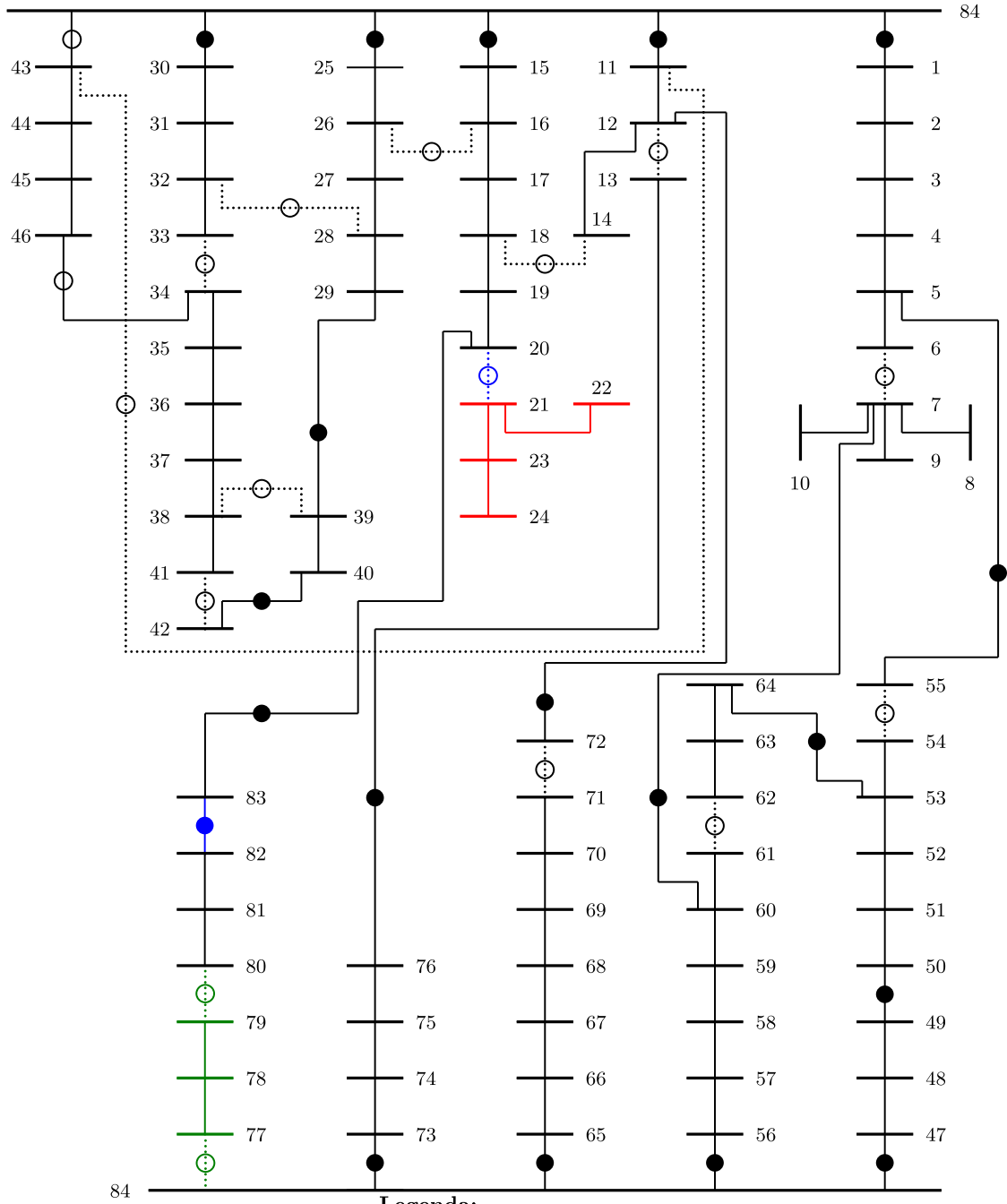
### 3.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os testes realizados em ambos os sistemas testes, tanto o de 53 barras quanto o de 84 barras, apresentaram os resultados esperados. A característica de se ter poucas chaves manipuláveis disponíveis torna o problema de restauração um pouco mais restrito, reduzindo a quantidade de variáveis e, conseqüentemente, reduzindo o espaço de busca do problema.

Ao comparar os resultados dos dois sistemas testes entre si, fica evidente de que quando há mais que uma subestação, como é o caso do sistema de 53 barras, um setor de carga sem fornecimento de energia pode ser alimentado por alguma outra subestação o que reduz as chances de ocorrer o corte de carga. Como o sistema de 84 barras não possui essa possibilidade casos como a falta no setor 77 (que pode ser observada na Figura 6) são comuns.

Os dois modelos matemáticos utilizados, o modelo completo proposto por Romero et al. (2016) e o modelo especializado proposto nesse trabalho encontraram os mesmos resultados para os sistemas testes utilizados. A única diferença é em relação ao tempo computacional e, como pode ser visto nas tabelas 7 e 8, a diferença é ligeiramente pequena.

Figura 6 - Configuração proposta para o caso de falta no setor 77



**Legenda:**

- ▬▬▬ Barra de subestação
- Barra de demanda
- ⊙ Circuito aberto com chave
- Circuito fechado com chave
- Parcela desenergizada
- Parcela Isolada
- Circuito indicado para operação

Fonte: Adaptado de Possagnolo (2015)

Tabela 7 - Comparativo entre os tempos de processamento dos modelos para o sistema de 53 barras

Setor Isolado	Modelo Adaptado (s)	Modelo Especializado (s)
1	1	1
3	2	6
11	1	1
13	1	1
14	2	1
32	1	1
42	1	1

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 8 - Comparativo entre os tempos de processamento dos modelos para o sistema de 84 barras

Setor Isolado	Modelo Adaptado (s)	Modelo Especializado (s)
1	1	0,5
11	1	0,5
15	1	1
25	1	1
39	1	2
43	8	8
47	2	1
50	1	0,5
56	2	1
73	1	0,5
77	6	1

Fonte: Elaboração do autor



## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho é abordado o problema de restauração de redes de distribuição quando no sistema de distribuição existem chaves em apenas um conjunto reduzido de ramos como normalmente acontece nos sistemas de distribuição brasileiros. O problema é modelado como sendo um problema de PCSOIM. Uma modelagem matemática especializada foi desenvolvida a partir de um modelo existente, que considera a existência de chaves em todos os ramos do sistema de distribuição. O modelo matemático pode ser considerado como sendo exato no sentido que incorpora todas as restrições de operação relacionadas com o modelo AC. Assim, o modelo de operação considera um sistema de distribuição modelado usando as restrições que correspondem ao modelo AC na representação das duas leis de Kirchhoff. As cargas são representadas como sendo de potência constante e o sistema é considerado como sendo um sistema trifásico equilibrado. Nos testes foram explorados basicamente faltas simples em um setor do sistema de distribuição.

Deve-se observar que o modelo matemático desenvolvido em que existem poucas chaves no sistema de distribuição é de grande interesse prático já que os sistemas de distribuição reais obedecem a esse tipo de configuração. Adicionalmente, um modelo desse tipo se resolve mais rapidamente porque existe uma diminuição significativa das variáveis binárias no problema de restauração.

Os testes mostram que a proposta apresentada resolve sem problemas os sistemas usados em testes. Assim, foram feitos testes simulando falta em cada um dos setores em que é dividido o sistema de distribuição. Os tempos de processamento são relativamente pequenos. Entretanto, esses tempos de processamento podem aumentar de forma significativa em testes com sistemas de grande porte. Nesses casos os tempos de processamento podem ser elevados e, portanto, as soluções encontradas podem ser usados como referência para avaliar a qualidade de outras técnicas de otimização mais rápidas como as heurísticas e meta-heurísticas.

Existem ainda tópicos que podem ser desenvolvidos em trabalhos futuros. Entre esses tópicos podem ser mencionados os seguintes trabalhos:

- Fazer testes com sistemas de grande porte para verificar as bondades e limitações da metodologia desenvolvida no caso de sistemas de grande porte e de elevada complexidade. Deve-se observar que um sistema de grande porte não é sinônimo de problema complexo. No problema de restauração e de reconfiguração, a dificuldade em resolver um problema está mais relacionada com o número de ramos com chaves que existe no sistema de distribuição. Por esse motivo, para um mesmo sistema, o grau de dificuldade muda radical-

mente entre um problema com chaves em todos os ramos do sistema de distribuição e no caso em que existem poucos ramos com chaves no sistema de distribuição.

- Desenvolver modelos matemáticos mais completos que o modelo apresentado neste trabalho. Assim, pode ser desenvolvido o modelo em que as cargas variam com a tensão e em geral com cargas modeladas com o modelo ZIP. Também pode ser desenvolvido um modelo para sistemas trifásicos não equilibrados. Esses modelos podem se tornar cada vez mais complexos e, portanto, mais difíceis de resolver.
- Incorporar no modelo o efeito chamado de *cold load pickup* que acontece quando existe demora em restaurar o sistema de distribuição e, portanto, existe perda de diversidade das chamadas cargas intermitentes. Nesse caso a demanda desenergizada a ser restaurada é maior que a demanda desligada após a falta pela perda de diversidade nas cargas intermitentes e que foram desligadas.
- Considerar o perfil de demanda das próximas horas do sistema de distribuição. Assim, se a restauração demora  $k$  horas, então a restauração deve levar em conta a mudança do perfil de demanda dessas horas em que o sistema de distribuição está sendo restaurado.

## REFERÊNCIAS

- AOKI, K.; NARA, K.; ITOH, M.; SATOH, T.; KUWABARA, H. A new algorithm for service restoration in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 3, Jul 1989.
- AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; SANSEVERINO, E. R. Service restoration in compensated distribution networks using a hybrid genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 46, n. 1, p. 59–66, 1998.
- BLUM, C.; ROLI, A.; DORIGO, M. Hc-aco: the hyper-cube framework for ant colony optimization. In: METAHEURISTICS INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., 2001, Porto. *Proceedings...* . Porto: MIC, 2001. p. 399–403.
- CIRIC, R. M.; POPOVIC, D. S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Oxford, v. 22, n. 7, p. 497–505, 2000.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, New Jersey, v. 6, n. 2, p. 182–197, Apr 2002.
- HSU, Y.-Y.; HUANG, M.; KUO, H.-C.; PENG, S.; CHANG, C.; CHANG, K.; YU, H.; CHOW, C.; KUO, R. *Distribution system service restoration using a heuristic search approach*. New York, p. 639–645, 1991.
- JENSEN, M. Reducing the run-time complexity of multiobjective eas: the NSGA-II and other algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, New Jersey, v. 7, n. 5, p. 503–515, Oct 2003.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. *Genetic algorithm for supply restoration in distribution system with priority customers*. Stockholm: [s.n.], p. 1–7, 2006.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. *IEEE Transactions on Power delivery*, IEEE, New York, v. 23, n. 1, p. 261–270, 2008.
- LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 27, n. 1.
- LIU, C.; LEE, S.; VENKATA, S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 3, n. 2, p. 619–626, May 1988.

- MATHIAS NETO, W. P. *Restauração automática de redes de distribuição de energia elétrica de grande porte com geração distribuída*. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- POSSAGNOLO, L. H. F. M. *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- ROMERO, R.; FRANCO, J. F.; LEÃO, F. B.; RIDER, M. J.; SOUZA, E. S. de. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, New York, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016.
- SCHMIDT, H. P.; IDA, N.; KAGAN, N.; GUARALDO, J. C. Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 20, n. 3, p. 1311–1319, Aug 2005.
- SEDANO, E. C. *Restauração de redes de distribuição de energia elétrica usando algoritmo de busca tabu reativa* 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2005.
- SHIRMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Texas, v. 7, n. 2, p. 952–958, Apr 1992.
- SOUZA, E. S. d. *Propostas de modelagem matemática para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais* 2014. 167 f. 1-167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- SOUZA, E. S. de; LEÃO, F. B.; ROMERO, R. Propostas de modelagem matemática para o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais com abordagem simplificada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL-SBPO, 46, 2014, Salvador. *Anais...* Salvador: SBPO, 2014. p. 1134–1145.
- TIAN, Y.; LIN, T.; ZHANG, M.; XU, X. A new strategy of distribution system service restoration using distributed generation. In: IEEE. CONFERENCE ON INTERNATIONAL SUSTAINABLE POWER GENERATION AND SUPPLY- SUPERGEN, 1, 2009, Nanjing, *Conference...* . Nanjing: IEEE, 2009. p. 1–5.
- WATANABE, I. *An ACO algorithm for service restoration in power distribution systems*. Scotland, v. 3, p. 2864–2871, 2005.
- WATANABE, I.; NODU, M. *A genetic algorithm for optimizing switching sequence of service restoration in distribution systems*. Oregon, v. 2, p. 1683–1690, 2004.
- WEI, W.; SUN, M.; REN, R.; WANG, Y. Service restoration of distribution system with priority customers and distributed generation. In: *IEEE PES innovative smart grid technologies*. Tianjin: [s.n.], 2012. p. 1–6. ISSN 2378-8534.

WU, F.; MONTICELLI, A. Analytical tools for power system restoration-conceptual design. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 3, n. 1, p. 10–26, Feb 1988.

**ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS**

## A.1 Sistema de 53 barras

Tabela 9 - Dados de capacidade de carregamento das subestações do sistema de 53 barras

<b>Subestação</b>	<b>Potência nominal (kVA)</b>
101	33.400,00
103	30.000,00
104	22.000,00

Fonte: Souza (2014)

Tabela 10 - Dados de impedância das linhas do sistema de 53 barras

Circuito $i-j$		Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Corrente Máx. (A)	Circuito $i-j$		Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Corrente Máx. (A)
Barra	Barra				Barra	Barra			
101	1	0,0543	0,0675	600	28	6	0,3655	0,2520	150
101	3	0,0421	0,0524	600	104	30	0,0543	0,0675	600
4	3	0,0603	0,0749	600	29	30	0,2281	0,1572	150
7	4	0,0483	0,0600	600	43	30	0,1916	0,1950	250
5	4	0,1472	0,1499	250	37	43	0,1828	0,1260	150
8	7	0,0603	0,0749	600	31	37	0,1367	0,0942	150
6	5	0,1179	0,1201	250	10	31	0,2281	0,1572	150
9	1	0,0663	0,0824	600	43	13	0,1095	0,0925	400
2	1	0,1472	0,1499	250	45	12	0,0483	0,0600	600
10	9	0,3388	0,3449	250	44	45	0,0421	0,0524	600
102	14	0,0725	0,0901	600	38	44	0,0603	0,0749	600
15	14	0,1769	0,1802	250	39	38	0,0809	0,0824	500
16	15	0,1326	0,1350	250	32	39	0,2968	0,2046	150
102	11	0,0543	0,0675	600	33	39	0,1326	0,1350	250
12	11	0,0603	0,0749	600	8	33	0,2208	0,2248	250
13	12	0,3194	0,2202	150	34	33	0,1367	0,0942	150
20	19	0,2281	0,1572	150	35	34	0,1594	0,1099	150
19	18	0,1828	0,1260	150	36	35	0,1594	0,1099	150
18	17	0,2968	0,2046	150	40	41	0,2741	0,1890	150
17	9	0,1256	0,1060	400	16	40	0,1828	0,1260	150
21	18	0,1472	0,1499	250	42	41	0,2741	0,1890	150
104	21	0,0730	0,0617	400	48	42	0,1828	0,1260	150
104	22	0,1769	0,1802	250	49	48	0,2741	0,1890	150
22	9	0,2208	0,2248	250	50	49	0,1594	0,1099	150
24	23	0,2507	0,1729	150	47	42	0,0911	0,0769	400
23	22	0,2054	0,1416	150	46	47	0,1472	0,1499	250
25	24	0,1594	0,1099	150	14	46	0,1002	0,0846	400
8	25	0,2054	0,1416	150	35	40	0,1301	0,0897	150
27	8	0,1769	0,1802	250	10	38	0,1828	0,1260	150
26	27	0,2507	0,1729	150	28	50	0,1126	0,0776	150
28	27	0,2281	0,1572	150					

Fonte: Souza (2014)

Tabela 11 - Dados de demanda das barras do sistema de 53 barras

<b>Barra</b>	<b>Potência Ativa(kW)</b>	<b>Potência Reativa(kVAr)</b>	<b>Barra</b>	<b>Potência Ativa(kW)</b>	<b>Potência Reativa(kVAr)</b>
<b>101</b>	0,00	0,00	<b>25</b>	623,70	302,07
<b>102</b>	0,00	0,00	<b>26</b>	831,60	402,78
<b>104</b>	0,00	0,00	<b>27</b>	1.039,50	503,42
<b>1</b>	2.910,60	1.409,64	<b>28</b>	485,10	234,93
<b>2</b>	1.039,50	503,43	<b>29</b>	970,20	469,85
<b>3</b>	485,10	234,93	<b>30</b>	1.801,80	872,64
<b>4</b>	762,30	369,22	<b>31</b>	485,10	234,93
<b>5</b>	1.801,80	872,64	<b>32</b>	1.178,10	570,57
<b>6</b>	485,10	234,93	<b>33</b>	2.009,70	973,36
<b>7</b>	693,00	335,64	<b>34</b>	831,60	402,79
<b>8</b>	1.316,70	637,71	<b>35</b>	623,70	302,07
<b>9</b>	831,60	402,79	<b>36</b>	207,90	100,72
<b>10</b>	2.009,70	973,36	<b>37</b>	1.455,30	704,86
<b>11</b>	207,90	100,72	<b>38</b>	762,30	369,21
<b>12</b>	1.247,40	604,14	<b>39</b>	693,00	335,64
<b>13</b>	762,30	369,22	<b>40</b>	970,20	469,85
<b>14</b>	693,00	335,64	<b>41</b>	623,70	302,07
<b>15</b>	970,20	469,85	<b>42</b>	831,60	402,79
<b>16</b>	1.316,70	637,71	<b>43</b>	900,90	436,36
<b>17</b>	485,10	234,93	<b>44</b>	970,20	469,85
<b>18</b>	831,60	402,79	<b>45</b>	554,40	268,50
<b>19</b>	970,20	469,85	<b>46</b>	1.247,40	604,14
<b>20</b>	554,40	268,50	<b>47</b>	693,00	335,64
<b>21</b>	1.247,40	604,14	<b>48</b>	554,40	268,50
<b>22</b>	762,30	369,22	<b>49</b>	346,50	167,78
<b>23</b>	693,00	335,64	<b>50</b>	554,40	268,50
<b>24</b>	346,50	167,78			

Fonte: Souza (2014)



## A.2 Sistema de 84 barras

Tabela 12 - Dados de ramos do sistema de 84 barras

# do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]	# do ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [Ω]	Reatância [Ω]
1	1	84	0,1944	0,6624	49	48	49	0,0655	0,1345
2	1	2	0,2096	0,4304	50	49	50	0,0393	0,0807
3	2	3	0,2358	0,4842	51	50	51	0,0786	0,1614
4	3	4	0,0917	0,1883	52	51	52	0,0393	0,0807
5	4	5	0,2096	0,4304	53	52	53	0,0786	0,1614
6	5	6	0,0393	0,0807	54	53	54	0,0524	0,1076
7	6	7	0,0405	0,1380	55	54	55	0,1310	0,2690
8	7	8	0,1048	0,2152	56	56	84	0,2268	0,7728
9	7	9	0,2358	0,4842	57	56	57	0,5371	1,1029
10	7	10	0,1048	0,2152	58	57	58	0,0524	0,1076
11	11	84	0,0786	0,1614	59	58	59	0,0405	0,1380
12	11	12	0,3406	0,6944	60	59	60	0,0393	0,0807
13	12	13	0,0262	0,0538	61	60	61	0,0262	0,0538
14	12	14	0,0786	0,1614	62	61	62	0,1048	0,2152
15	15	84	0,1134	0,3864	63	62	63	0,2358	0,4842
16	15	16	0,0524	0,1076	64	63	64	0,0243	0,0828
17	16	17	0,0524	0,1076	65	65	84	0,0486	0,1656
18	17	18	0,1572	0,3228	66	65	66	0,1703	0,3497
19	18	19	0,0393	0,0807	67	66	67	0,1215	0,4140
20	19	20	0,1703	0,3497	68	67	68	0,2187	0,7452
21	20	21	0,2358	0,4842	69	68	69	0,0486	0,1656
22	21	22	0,1572	0,3228	70	69	70	0,0729	0,2484
23	21	23	0,1965	0,4035	71	70	71	0,0567	0,1932
24	23	24	0,1310	0,2690	72	71	72	0,0262	0,0528
25	25	84	0,0567	0,1932	73	73	84	0,3240	1,1040
26	25	26	0,1048	0,2152	74	73	74	0,0324	0,1104
27	26	27	0,2489	0,5111	75	74	75	0,0567	0,1932
28	27	28	0,0486	0,1656	76	75	76	0,0486	0,1656
29	28	29	0,1310	0,2690	77	77	84	0,2511	0,8556
30	30	84	0,1965	0,3960	78	77	78	0,1296	0,4416
31	30	31	0,1310	0,2690	79	78	79	0,0486	0,1656
32	31	32	0,1310	0,2690	80	79	80	0,1310	0,2640
33	32	33	0,0262	0,0538	81	80	81	0,1310	0,2640
34	33	34	0,1703	0,3497	82	81	82	0,0917	0,1883
35	34	35	0,0524	0,1076	83	82	83	0,3144	0,6456
36	35	36	0,4978	1,0222	84	5	55	0,1310	0,2690
37	36	37	0,0393	0,0807	85	7	60	0,1310	0,2690
38	37	38	0,0393	0,0807	86	11	43	0,1310	0,2690
39	38	39	0,0786	0,1614	87	12	72	0,3406	0,6994
40	39	40	0,2096	0,4304	88	13	76	0,4585	0,9415
41	38	41	0,1965	0,4035	89	14	18	0,5371	1,0824
42	41	42	0,2096	0,4304	90	16	26	0,0917	0,1883
43	43	84	0,0486	0,1656	91	20	83	0,0786	0,1614
44	43	44	0,0393	0,0807	92	28	32	0,0524	0,1076
45	44	45	0,1310	0,2690	93	29	39	0,0786	0,1614
46	45	46	0,2358	0,4842	94	34	46	0,0262	0,0538
47	47	84	0,2430	0,8280	95	40	42	0,1965	0,4035
48	47	48	0,0655	0,1345	96	53	64	0,0393	0,0807

Fonte: Possagnolo (2015)

Tabela 13 - Dados de demanda das barras do sistema de 84 barras

# do ramo	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa[kVAr]	# do ramo	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa[kVAr]
1	0,00	0,00	43	0,00	0,00
2	100,00	50,00	44	30,00	20,00
3	300,00	200,00	45	800,00	700,00
4	350,00	250,00	46	200,00	150,00
5	220,00	100,00	47	0,00	0,00
6	1100,00	800,00	48	0,00	0,00
7	400,00	320,00	49	0,00	0,00
8	300,00	200,00	50	200,00	160,00
9	300,00	230,00	51	800,00	600,00
10	300,00	260,00	52	500,00	300,00
11	0,90	0,00	53	500,00	350,00
12	1200,00	800,00	54	500,00	300,00
13	800,00	600,00	55	200,00	80,00
14	700,00	500,00	56	0,00	0,00
15	0,00	0,00	57	30,00	20,00
16	300,00	150,00	58	600,00	420,00
17	500,00	350,00	59	0,00	0,00
18	700,00	400,00	60	20,00	10,00
19	1200,00	1000,00	61	20,00	10,00
20	300,00	300,00	62	200,00	130,00
21	400,00	350,00	63	300,00	240,00
22	50,00	20,00	64	300,00	200,00
23	50,00	20,00	65	0,00	0,00
24	50,00	10,00	66	50,00	30,00
25	50,00	30,00	67	0,00	0,00
26	100,00	60,00	68	400,00	360,00
27	100,00	70,00	69	0,00	0,00
28	1800,00	1300,00	70	0,00	0,00
29	200,00	120,00	71	2000,00	1500,00
30	0,00	0,00	72	200,00	150,00
31	1800,00	1600,00	73	0,00	0,00
32	200,00	150,00	74	0,00	0,00
33	200,00	100,00	75	1200,00	950,00
34	800,00	600,00	76	300,00	180,00
35	100,00	60,00	77	0,00	0,00
36	100,00	60,00	78	400,00	360,00
37	20,00	10,00	79	2000,00	1300,00
38	20,00	10,00	80	200,00	140,00
39	20,00	10,00	81	500,00	360,00
40	20,00	10,00	82	100,00	30,00
41	200,00	160,00	83	400,00	360,00
42	50,00	30,00	84	0,00	0,00

Fonte: Possagnolo (2015)