

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELE-
TRICIDADE

RÔMULO FÁBIO NUNES NERES

**RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTELI-
GENTES SOB INCERTEZA**

São Luís – MA

2024

RÔMULO FÁBIO NUNES NERES

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES SOB INCERTEZA

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores:

Prof. Anselmo Barbosa Rodrigues, D. Sc.

Prof.^a Maria da Guia da Silva, Ph. D.

São Luís – MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Neres, Romulo Fabio Nunes.

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES SOB
INCERTEZA / Romulo Fabio Nunes Neres. - 2024.

69 f.

Coorientador(a) 1: Maria da Guia da Silva.

Orientador(a): Anselmo Barbosa Rodrigues.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do
Maranhão, São Luis-ma, 2024.

1. Restauração. 2. Incertezas. 3. Fluxo de Potência
Probabilístico. 4. Busca Tabu. 5. Restauração
Multiobjetivo. I. Rodrigues, Anselmo Barbosa. II. Silva,
Maria da Guia da. III. Título.

RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES SOB INCERTEZA

RÔMULO FÁBIO NUNES NERES

Dissertação aprovada em 14/11/2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Anselmo Barbosa Rodrigues
(Orientador-UFMA-São Luís)

Profa. Ph.D. Maria da Guia da Silva
(Coorientadora-UFMA-São Luís)

Prof. D.Sc. José Filho da Costa Castro
(Examinador-UFPE-Recife)

Pesquisador D.Sc. Elson Natanael Moreira Silva
(Examinador-PPGEE/UFMA-São Luís)

Prof. Dr. João Eduardo Ribeiro Baptista
(Examinador-UFMA-Balsas)

DEDICATÓRIA

“À memória da minha avó Sebastiana dedico este trabalho.”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco e Fátima, e à minha irmã, Fabíola, agradeço pelo suporte incondicional e pelo incentivo decisivo que me motivou a iniciar esta jornada do curso de mestrado.

À minha esposa, Beatriz, sou profundamente grato pelo carinho, compreensão e apoio que me proporcionou ao longo desses anos de curso.

Aos professores Anselmo Rodrigues e Maria da Guia, agradeço sinceramente por sua dedicação e excelência. Conviver com vocês no laboratório de pesquisa foi um privilégio, e vocês se tornaram verdadeiros modelos de profissionais para mim.

"Genialidade é 1% inspiração e
99% transpiração."

Thomas Edison

RESUMO

Atualmente, há uma conexão elevada de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) em redes de distribuição. A presença da GDFV afeta a restauração da rede elétrica, pois os geradores podem fornecer suporte de potência ativa e reativa para mitigar violações de restrições de tensão e carregamento durante as transferências de carga via chaves normalmente abertas para alimentadores adjacentes. O estado pós-reconfiguração, obtido pelo plano de restauração, está sujeito ao risco de violações das restrições técnicas de tensão e/ou carregamento. Este risco é causado pelas incertezas na potência de saída da GDFV. Outra fonte de incerteza que pode aumentar os riscos de violações de restrições técnicas na restauração são as flutuações nas cargas ativa e reativa em cada nó devido a erros no sistema de medição. Esta dissertação apresenta uma metodologia para realizar a restauração de redes de distribuição radiais sujeitas a incertezas associadas com a carga e a geração distribuída fotovoltaica. Estas incertezas foram modeladas em um algoritmo de fluxo de potência probabilístico, baseado no Hipercubo Latino, que calcula os riscos de violação de restrições de tensão e carregamento para uma topologia candidata a restauração. O problema de restauração foi solucionado usando-se o algoritmo de Busca Tabu. Esta meta-heurística foi combinada com uma estrutura Fuzzy para considerar uma restauração multiobjetivo baseada nos seguintes critérios: potência ativa restaurada e risco de violação de restrições técnicas. Os resultados dos testes demonstraram que a restauração determinística resulta em riscos elevados de violação das restrições na solução ótima. Por outro lado, a técnica multiobjetivo proposta obteve um compromisso aceitável entre o risco de violação e a potência ativa restaurada.

Palavras-chave: Restauração; Incertezas; Fluxo de potência probabilístico; Busca Tabu; Restauração multiobjetivo; Hipercubo Latino; Estrutura Fuzzy; Redes de distribuição radiais.

ABSTRACT

Currently, there is a high level of connection of Photovoltaic Distributed Generation (PVDG) in distribution networks. The presence of PVDG affects the restoration of the power distribution network, since PVDG can provide active and reactive power support to mitigate violations of voltage and loading constraints during load transfers via normally open switches to adjacent feeders. The post-reconfiguration state, obtained by the restoration plan, is subject to the risk of violations of technical constraints associated with voltage and/or loading limits. This risk is caused by uncertainties in the PVDG output power. Another source of uncertainty that can increase the risks of violations of technical constraints during restoration are the fluctuations in the active and reactive loads at each node due to errors in the measurement system. This dissertation presents a methodology to perform the restoration of radial distribution networks subject to uncertainties associated with the load and PVDG. These uncertainties were modeled in a probabilistic power flow algorithm, based on the Latin Hypercube, which calculates the risks of voltage and load constraint violations for a candidate topology for restoration. The restoration problem was solved using the Tabu Search algorithm. This method was combined with a Fuzzy structure to consider a multi-objective restoration based on the following criteria: restored active power and risk of technical constraint violation. The test results demonstrated that the deterministic restoration results in high risks of constraint violations in the optimal solution. On the other hand, the proposed multi-objective technique obtained an acceptable compromise between the risk of violation and the restored active power.

Keywords: Restoration; Uncertainties; Probabilistic Power Flow; Tabu Search; Multiobjective Restoration; Latin Hypercube; Fuzzy Structure; Radial Distribution Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação do sistema elétrico de potência.	2
Figura 2 Sistemas de distribuição primários típicos.	4
Figura 3 Estados de operação do sistema.....	8
Figura 4 Processo de restauração à montante e à jusante.	10
Figura 5 Exemplo de sistema radial.	24
Figura 6 - Organização do sistema radial para aplicação do algoritmo.....	26
Figura 7 Fluxograma do método de soma de correntes.....	27
Figura 8 Fluxograma do FPP via Hipercubo Latino.....	40
Figura 9 Função Fuzzy da PAR.	48
Figura 10 Função Fuzzy do Risco.	49
Figura 11 Fluxograma do algoritmo de Busca Tabu usado na RPM e na RDS	51
Figura 12 Sistema ilustrativo do alívio de carga.	53
Figura 13 Diagrama Unifilar da RD54.....	55
Figura 14 Gráficos da característica de convergência da Busca Tabu.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dados da RD54.	54
Tabela 2 Contingências de interesse.	56
Tabela 3 RDS para as contingências de interesse.	58
Tabela 4 RPM para a contingência no ramo #2.....	59
Tabela 5 RPM para a contingência no ramo #14.....	59
Tabela 6 Índices para a contingência no ramo #11.....	60

Lista de abreviaturas

AMI - *Advanced Metering Infrastructure*

BT - Busca Tabu

CDF - *Cumulative Distribution Function*

DMS - *Distribution Management System*

FPD - Fluxo de Potência Determinístico

FPP - Fluxo de Potência Probabilístico

GD - Geração Distribuída

GDFV - Geração Distribuída Fotovoltaica

HCL - Hipercubo Latino

LKC - Lei de Kirchhoff das correntes

LKT - Leis de Kirchhoff das Tensões

LT - Lista Tabu

MC - Monte Carlo

MSC - Método da Soma de Correntes

MSRE - Método de Superfície de Resposta Estocástica

NA - Normalmente Aberta

PAR - Potência Ativa Restaurada

PDF - *Probability Density Function*

PSO - *Particle Swarm Optimization*

RBC - Relação Benefício/Custo

RD54 - Rede de Distribuição de 54 barras

RDS - Restauração Determinística com Objetivo Simples

REI - Redes Elétricas Inteligentes

RPM - Restauração Probabilística Multiobjetivo

SAIDI - *System Average Interruption Duration Index*

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*

SMC - Simulação Monte Carlo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	1
1.1.1. Rede primária.....	1
1.1.2. Rede secundária	4
1.2. REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	5
1.3. RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	7
1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RESTAURAÇÃO	11
1.4.1. Sistemas especialistas	13
1.4.2. Meta-heurísticas.....	14
1.4.3. Programação matemática	15
1.4.4. Restauração sob incerteza	16
1.5. MOTIVAÇÃO.....	20
1.6. OBJETIVOS	20
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
1.8. PUBLICAÇÃO RESULTANTE DA DISSERTAÇÃO	22
2. FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	23
2.1. INTRODUÇÃO	23
2.2. FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	23
2.3. MÉTODO DA SOMA DE CORRENTES.....	24
3. MODELAGEM PROBABILÍSTICA DAS INCERTEZAS.....	28
3.1. CARGA.....	28
3.2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA.....	29
3.3. HIPERCUBO LATINO	30
3.4. FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO VIA HIPERCUBO LATINO ..	32

4. FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO	43
4.1. FORMULAÇÃO DA RESTAURAÇÃO DETERMINÍSTICA COM OBJETIVO SIMPLES (RDS).....	43
4.2. FORMULAÇÃO DA RESTAURAÇÃO PROBABILÍSTICA MULTIOBJETIVO (RPM).....	46
4.3. SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO VIA BUSCA TABU....	48
5. RESULTADOS	54
5.1. SISTEMA TESTE E CASOS DE ESTUDO.....	54
5.2. RESULTADOS ASSOCIADOS COM OS CASOS DE ESTUDO	57
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas elétricos de potência são sistemas compostos por um conjunto de dispositivos destinados a fornecer energia elétrica sempre que demandada pelos usuários, independentemente da quantidade solicitada. Devem atender aos critérios de qualidade e confiabilidade, determinados em legislação, com segurança, economia e respeitando o meio ambiente. Um sistema de potência consiste em três grandes blocos (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005):

- i) Geração: têm como função converter alguma forma de energia em energia elétrica.
- ii) Transmissão: realizam o transporte da energia elétrica das centrais geradoras para os sistemas de distribuição assim como para outros sistemas de potência através de interconexões.
- iii) Distribuição: distribuem a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores nas subestações que realizam transformação de tensão e funções de chaveamento.

A disposição dessas três zonas funcionais no sistema elétrico de potência pode ser vista na Figura 1. A subestação de distribuição é alimentada pela rede de subtransmissão, conforme ilustrado na Figura 1, e sua função é transformar a tensão de subtransmissão em tensão de distribuição primária. O transformador de distribuição realiza a conversão da tensão primária para a tensão secundária. Nas próximas subseções, são apresentadas as principais características das redes de distribuição primária e secundária.

1.1.1. Rede primária

O sistema de distribuição primário, também conhecido como rede de média tensão, mostrado na Figura 1, transporta eletricidade das subestações de distribuição até os transformadores de distribuição. Normalmente, essa

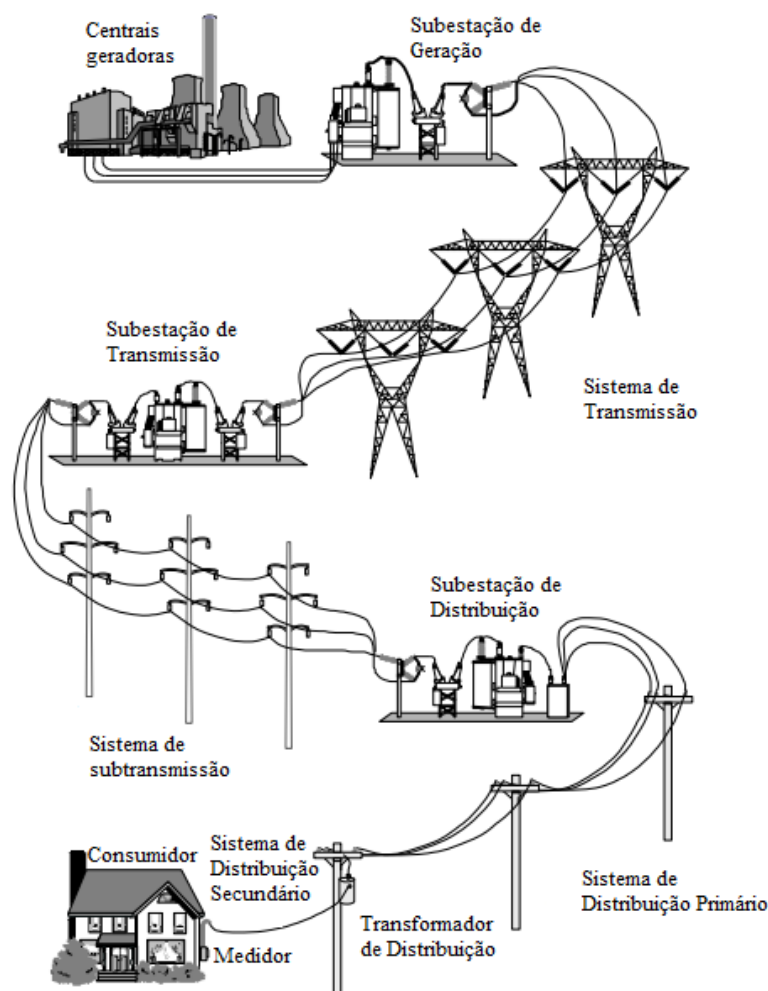


Figura 1 Representação do sistema elétrico de potência.
 Fonte: Adaptado de (BROWN, 2009)

rede opera de maneira radial, com tensões entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e inferior a 69 kV no Brasil, segundo o Módulo 1 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). É viável realizar a transferência de blocos de carga entre diferentes sistemas de distribuição primário, seja para manutenções ou para restabelecer o fornecimento de energia elétrica após uma interrupção. Essas redes atendem aos consumidores primários como indústrias de médio porte, conjuntos comerciais e instalações de iluminação pública, além dos transformadores de distribuição (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005).

As redes de distribuição primárias podem ser do tipo aéreas, mais usuais devido a seu menor custo, ou subterrâneas e suas configurações típicas

(KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005) são apresentadas a seguir e ilustradas na Figura 2.

a) Primário Radial

Nesta configuração, a rede primária conta com um tronco principal do qual derivam ramais, que geralmente são protegidos por fusíveis. Dispõe de chaves de seccionamento normalmente fechadas. Entre suas vantagens, destacam-se (SHORT, 2014):

- Menor complexidade na proteção de sobrecorrente.
- Correntes de falta mais baixas na maior parte do circuito.
- Controle de tensão simplificado.
- Previsão e controle de fluxos de potência mais fáceis.
- Custo mais baixo.

No entanto, no caso de ocorrência de uma falta todos os consumidores à jusante do dispositivo de seccionamento/proteção que elimina a falta serão interrompidos até que ela seja reparada (BROWN, 2009).

b) Primária radial com socorro

Para aumentar a confiabilidade da configuração anterior e possibilitar o restabelecimento de energia para os consumidores interrompidos devido a uma falta, geralmente, interliga-se dois alimentadores distintos pertencentes a uma mesma subestação ou não através de uma chave Normalmente Aberta (NA). Dessa maneira, pode ser realizada a transferência de carga entre alimentadores, respeitando-se a capacidade de carregamento do tronco alimentador que receberá a carga transferida.

c) Primário Seletivo

Nesse sistema a carga é conectada a dois alimentadores por meio de uma chave de transferência. Na condição normal de operação, a chave conecta o consumidor a apenas um alimentador. Se este for desenergizado, a chave transfere a carga para o alimentador alternativo.

d) Spot Network

Na Figura 2, nota-se que, nesta configuração, cada transformador é suprido por dois troncos alimentadores. Esses transformadores operam em paralelo e alimentam um tronco secundário. Em uma situação de falha em um

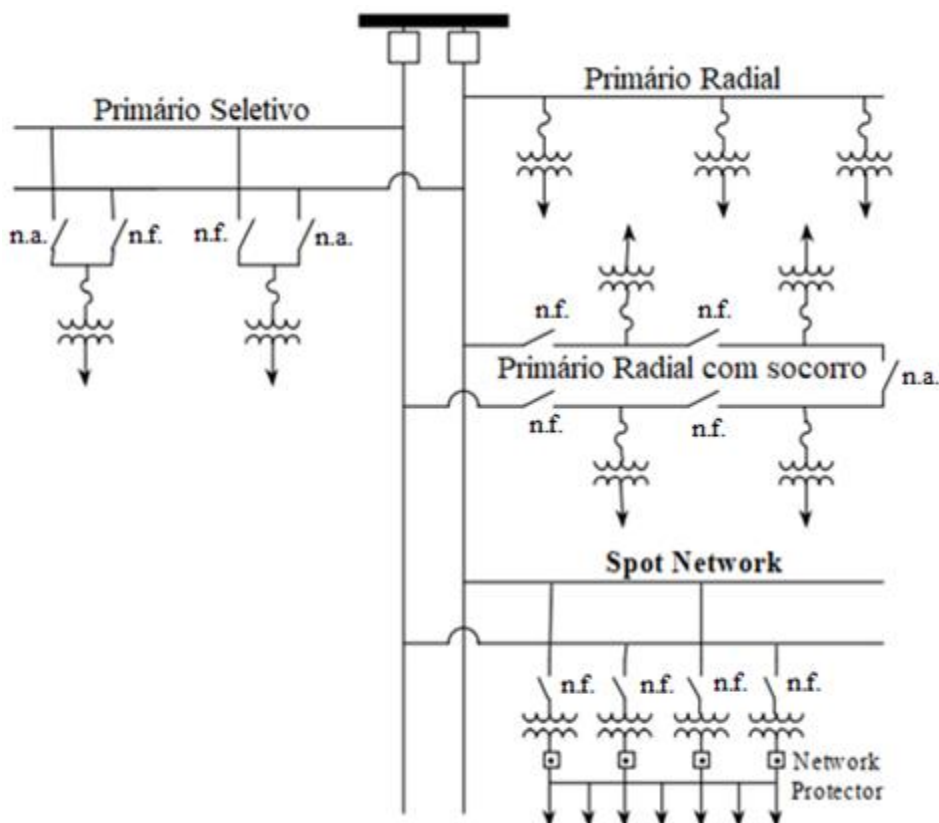


Figura 2 Sistemas de distribuição primários típicos.
Fonte: Adaptado de (Brown, 2009)

alimentador, este poderá ser isolado do circuito e as cargas da rede continuarão sendo energizadas pelo outro alimentador. A fim de evitar o fluxo de potência no sentido reverso através dos transformadores, são utilizadas chaves especiais, chamadas de “*network protector*”, que abrem quando percorridas por potência no sentido reverso (da carga para a fonte).

Cada configuração do sistema primário apresenta diferentes níveis de confiabilidade. O sistema radial, por exemplo, possui a menor confiabilidade intrínseca, enquanto a spot network oferece a maior (BROWN, 2009). Sistemas com alta confiabilidade tendem a ter custos mais elevados, por isso é fundamental avaliar se a adoção desses sistemas é justificada.

1.1.2. Rede secundária

O sistema de distribuição secundário compreende o trecho entre o secundário do transformador de distribuição e a entrada de serviço do consumidor. Os transformadores de distribuição reduzem a tensão primária para a

de distribuição secundária, ou baixa tensão (tensões típicas de 127/220 V ou 220/380 V no Brasil). A rede de baixa tensão pode operar em malha ou radial e supre os consumidores de baixa tensão, consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005).

1.2. REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Historicamente, a rede de distribuição tem sido o elo mais fraco da cadeia de fornecimento de energia elétrica devido ao uso da topologia radial que fornece o menor custo de construção (mínimo número de ramos para conectar todos os nós), mas possui baixa confiabilidade (a falha em qualquer ramo causa uma interrupção em pelo menos um ponto de carga). Essa predileção é consequência dos menores níveis de investimento na distribuição, devido ao menor impacto de suas falhas em relação às que ocorrem em sistemas compostos.

Hoje em dia, vários fatores têm exigido a introdução de recursos de automação e controle nas redes de distribuição. Entre esses fatores estão o crescimento da demanda por energia elétrica, a diminuição de recursos convencionais para a geração de eletricidade e a evolução tecnológica que reduz os custos de equipamentos, principalmente os equipamentos baseados em eletrônica de potência, tornando-os bastante comuns nas redes elétricas. Aliada a isso, a modernização dos sistemas elétricos de potência foi motivada devido a desregulamentação do setor iniciada em meados da década de 1990. A consequência desses desenvolvimentos foi o aumento da energia gerada em nível local de distribuição por geradores independentes e um número crescente de fontes de energia, particularmente renováveis (BILLINTON e ALLAN, 1996). A produção de energia elétrica em pequena escala através de unidades localizadas próximo dos consumidores ou conectadas diretamente à rede de distribuição é denominada de Geração Distribuída (GD) (WILLIS e SCOTT, 2002). A inserção da GD afeta significativamente a operação das redes de distribuição, pois no passado estas redes possuíam fluxo de potência unidirecional (da fonte para carga) e eram passivas (sem conexão de produtores de energia). A

penetração da GD em redes de distribuição tem potencial para afetar os seguintes aspectos associados com o planejamento de redes distribuição: controle var/volt, a qualidade de tensão, a coordenação das proteções, recondu-toramento de circuitos, repontencialização de subestações, etc.

A necessidade de lidar com esses novos desafios fez surgir o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI), também conhecida como *Smart Grids*. Uma REI pode ser entendida como um sistema elétrico que utiliza sistemas de medição, de automação e tecnologias de comunicação para observar e gerenciar o transporte de eletricidade em tempo real, com fluxo bidirecional de energia e de informações entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final (GALLOTTI, 2021).

A essência da filosofia *Smart Grid* é implementar os sete princípios (HEYDT, 2010):

- Auto-recuperação (*self-healing*) - capacidade para detectar, analisar, reagir e restaurar contingências.
- Possibilidade de participação ativa dos consumidores na resposta à demanda.
- Operar de forma resiliente contra ataques físicos e cibernéticos.
- Proporcionar qualidade de energia para as necessidades do século 21, isto é, cargas sensíveis com controles computadorizados.
- Acomodando todas as opções de geração e armazenamento de energia.
- Permitir novos produtos, serviços e mercados.
- Otimizando ativos e operar de forma eficiente.

Em uma REI estão incluídas as seguintes tecnologias: fontes de energia renováveis, automação, sistemas de armazenamento de energia, gerenciamento pelo lado da demanda, veículos elétricos etc. A aplicação destas tecnologias tem os seguintes objetivos: reduzir a emissão de poluentes para atender as exigências ambientais e ecológicas, aumentar a eficiência energética, maximizar a utilização da geração renovável e melhorar a confiabilidade e a resiliência.

1.3. RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

As interrupções dos consumidores são causadas por uma ampla gama de fenômenos, incluindo falha de equipamentos, animais, vegetação, condições naturais extremas e erro humano (BROWN, 2009).

Todo equipamento em um sistema de distribuição está sujeito a uma probabilidade de falhar por diversas razões entre as quais: defeito de fabricação, instalação inadequada, correntes ou tensões fora do intervalo para o qual o equipamento foi projetado, idade cronológica, degradação térmica, desgaste mecânico, entre outros.

Animais que têm acesso as componentes do sistema de distribuição também podem afetar a confiabilidade do mesmo. Por exemplo, roedores são capazes de mastigar e, conseqüentemente, danificar a isolação de cabos que podem causar falhas na rede. Sendo assim, é necessário que sejam aplicadas técnicas de mitigação de acordo com as espécies existentes na região que possam causar problemas.

Além de equipamentos e animais, a vegetação pode ser diretamente responsável por muitas interrupções de consumidores. Vários modos de falha associados com árvores incluem (BROWN, 2009):

- i) Danos mecânicos aos condutores aéreos quando atingidos por uma queda de tronco ou ramo.
- ii) Falhas causadas por animais que usam árvores como porta de entrada para postes.

Falhas causadas pelo crescimento dos ramos que aproxima os condutores energizados ao ponto de se tocarem. Condições climáticas extremas, como ventanias, terremotos, neve, tempestades, têm grande impacto na confiabilidade da rede de distribuição, pois durante esses fenômenos climáticos muitas falhas de equipamentos podem ocorrer simultaneamente, resultando em longos tempos de restauração para muitos consumidores interrompidos.

Por vezes a causa das interrupções também pode ser resultante da ação humana. Essas interrupções podem ser intencionais (por exemplo, interrup-

ções programadas e vandalismo) ou não intencionais (por exemplo, erros operacionais, acidentes de trânsito, escavações no caso de redes subterrâneas) (BROWN, 2009).

Com o propósito de analisar o problema da restauração, quatro estados gerais da operação do sistema de distribuição podem ser identificados (CURCIC, OZVEREN, *et al.*, 1996), como mostrado na

Figura 3, assim como as possíveis transições entre eles. Por consequência das diferentes condições a que estão submetidos esses estados, os mesmos possuem objetivos distintos.

A configuração da rede de distribuição pode ser modificada para uma topologia que opere com o menor valor possível de perdas durante a operação normal. Caso o sistema seja levado a operar com os equipamentos próximos dos seus níveis de sobrecarga ou dispositivos de proteção próximos de seus valores limites para atuação, haverá uma mudança para o estado de pré-falha.

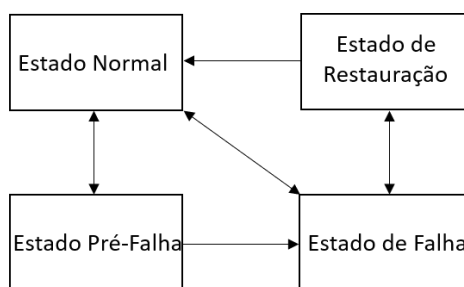


Figura 3 Estados de operação do sistema.
Fonte: Adaptado de (Curcic et al., 1996).

O estado de falha corresponde a saída de operação de algum componente, de modo que o fornecimento para alguns pontos de carga é interrompido. Essas falhas podem ser causadas por condições climáticas, condições de sobrecargas, mal funcionamento da proteção, degradação do isolamento, entre outros fatores (ABU-ELANIEN, SALAMA e SHABAN, 2018). Se esse componente não for posto em funcionamento rapidamente, será necessário que o sistema entre no estado de restauração para que haja fornecimento para os componentes intactos da rede.

A restauração da rede de distribuição é uma ação de emergência e pode ser entendida como uma reconfiguração temporária da rede até que a causa do problema seja eliminada (CURCIC, OZVEREN, *et al.*, 1996). A essência da

restauração é ser implementada o mais rápido possível a fim de atender o máximo possível das cargas interrompidas. Uma reconfiguração do sistema altera a topologia, os fluxos de linha e os valores de curto-circuito. Assim, diferentes soluções podem ser viáveis para a mesma falha (GERS, 2013).

A sequência de ações para a restauração de serviço quando uma falta acontece pode ser resumida da seguinte forma (GERS, 2013): o relé correspondente opera e desarma o dispositivo de proteção. No caso da Figura 4, esse dispositivo é o disjuntor, que abre seus contatos para desenergizar o circuito falhado. Em seguida, a falta deve ser localizada e isolada por meio da abertura de chaves seccionadoras associadas a essa seção. Para o exemplo da Figura 4, a falta é isolada abrindo-se uma chave seccionadora à montante da falta e duas chaves seccionadoras à jusante da falta. Com isso é possível reenergizar todas as cargas até a primeira chave seccionadora que foi aberta à montante da falta, indicada na Figura 4, com o fechamento do dispositivo de proteção, isto é, restauração à montante. Algumas áreas que permanecem desenergizadas podem ser atendidas por meio da restauração à jusante, que consiste na transferência de cargas para alimentadores vizinhos por meio do fechamento das chaves de NA da Figura 4. Então, a falha pode ser reparada, enquanto uma área mínima permanece desenergizada, para que posteriormente a rede retorne para a sua configuração inicial.

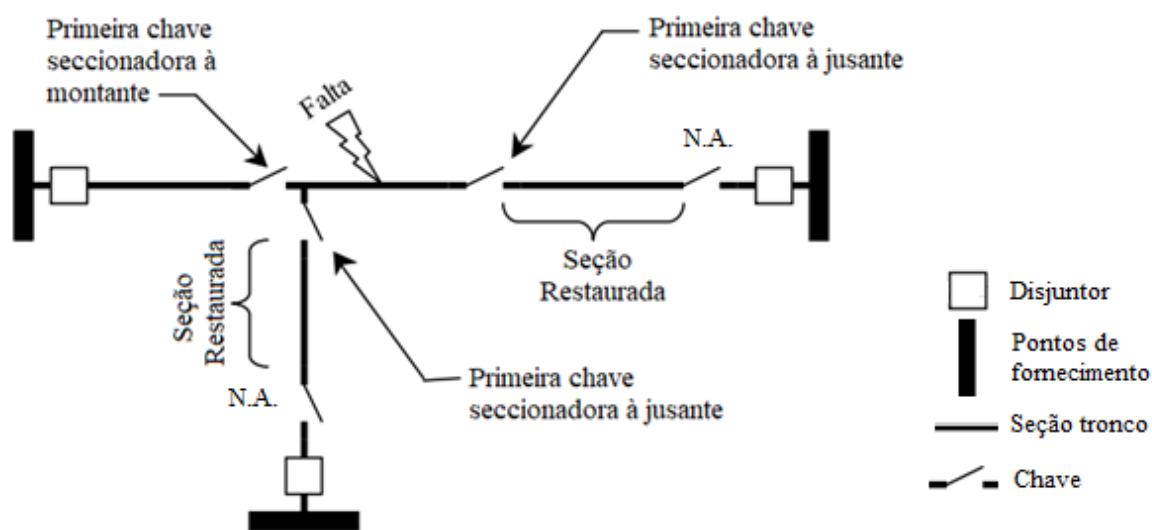


Figura 4 Processo de restauração à montante e à jusante.
Fonte: Adaptado de (Brown, 2009).

Ao realizar o restabelecimento, as operações executadas devem permitir que o sistema atenda a essas restrições (GERS, 2013):

- A capacidade de corrente dos transformadores e linhas deve estar dentro dos limites especificados.
- A queda de tensão deve permanecer dentro de uma margem estabelecida.
- O sistema deve continuar sendo radial.
- O número de operações do equipamento deve ficar dentro dos limites.
- Clientes importantes têm prioridade.
- O sistema deve estar balanceado tanto quanto possível.
- A coordenação da proteção deve ser mantida.

O principal objetivo da restauração é restabelecer o fornecimento para o máximo de áreas que foram afetadas após uma falha, por meio de uma série de acionamentos de chaves normalmente fechadas e abertas. A solução da restauração é definida pela combinação de estados binários das chaves seccionadoras dentro das áreas não afetadas e chaves de interconexão entre alimentadores (GERS, 2013). Logo, é considerado um problema combinatório. Além disso, é necessário solucionar as equações de fluxo de potência para se obter o perfil de tensão e carregamento de uma topologia e então compará-los

aos limites operacionais. Devido a isso, a restauração de redes de distribuição é um problema não linear.

Há várias possibilidades para reconfigurar a rede sob condição de falta. O espaço de busca cresce exponencialmente em tamanho quanto mais o número de chaves no sistema aumenta, mas o grupo de soluções viáveis é finito (GERS, 2013). Para que a solução seja executável, a mesma deve otimizar uma função objetivo sem violar restrições operacionais.

A função objetivo mais comum é representada pela minimização do número de consumidores fora de serviço ou maximização da potência restaurada para a área isolada. Objetivos secundários podem ser adicionados ao principal, tornando a restauração um problema de otimização multiobjetivo. Outras funções de minimização comuns são (SUDHAKAR e SRINIVAS, 2011; SHEN, WU, *et al.*, 2018): minimização do número de operações de chaveamento, minimização das perdas da rede resultante e minimização do tempo do processo de restauração.

A solução encontrada só pode ser executada caso atenda aos limites de operação do sistema. Dentre as restrições a que está submetida a função objetivo, pode-se citar (SUDHAKAR e SRINIVAS, 2011; ABU-ELANIEN, SALAMA e SHABAN, 2018): manutenção da estrutura radial da rede, limites de tensão e corrente, clientes prioritários, tempo de chaveamento e número de chaveamentos.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RESTAURAÇÃO

O problema da restauração é uma questão desafiadora, o qual se torna mais complexo quanto maior for o sistema. Pesquisadores ao decorrer do tempo propuseram várias metodologias para solucionar o problema da reconfiguração orientada restauração tais como sistemas especialistas, algoritmos heurísticos, teoria de grafos e sistemas multiagentes. Estas técnicas resolvem o problema de restauração com base em regras especificadas, heurísticas e procedimentos derivados a partir de um domínio de conhecimento específico.

Por outro lado, os métodos de programação matemática (por exemplo, as programações cônica e linear inteiras-mistas) e os algoritmos meta-heurísticos (Recozimento Simulado, Busca Tabu e Algoritmos Genéticos etc.) resolvem o problema de reconfiguração com base em um modelo matemático de otimização.

1.4.1. Heurísticas

O método heurístico é baseado em uma busca direcionada por meio do conhecimento e experiência de um especialista. O entendimento do funcionamento do sistema adquirido ao longo tempo por um especialista permite que sejam traçadas estratégias que facilitam a obtenção de uma solução aceitável em um menor espaço de tempo. As heurísticas têm a vantagem de rapidez sobre as técnicas de otimização porque evitam a carga computacional (ABU-ELANIEN, SALAMA e SHABAN, 2018). Todavia, devido ao compromisso de serem computacionalmente eficientes, as heurísticas não podem garantir a solução ótima do problema.

HSU, HUANG, *et al.* (1991) desenvolveram uma busca heurística para a restauração de um sistema de distribuição. Regras heurísticas baseadas na experiência dos operadores da Companhia Elétrica de Taiwan na realização da restauração foram compiladas. Baseado nessas regras heurísticas, um algoritmo de busca heurística foi desenvolvido para restauração de serviço após faltas nos alimentadores de distribuição. O algoritmo foi testado no sistema de distribuição pertencente a área de serviço da cidade de Taipei da Companhia Elétrica de Taiwan. Verifica-se a partir dos resultados dos testes que o algoritmo de busca heurística proposto é capaz de obter planos de restauração adequados de uma maneira muito eficiente.

Uma metodologia heurística para restaurar o serviço para áreas desenergizadas de um sistema de distribuição via reconfiguração foi proposto em (SHIRMOHAMMADI, 1992). A metodologia determina o número mínimo possível de operações de chaveamento necessário para restaurar o serviço para ramos da rede que estão desenergizados devido a falhas forçadas ou progra-

madadas, mantendo a topologia radial da rede e sem violar os limites de carregamento das linhas. Um programa computacional foi desenvolvido baseado nessa metodologia para uso no planejamento de operações do sistema de distribuição da PG&E (Pacific Gas and Electric).

1.4.1. Sistemas especialistas

Sistemas especialistas são algoritmos que realizam tarefas historicamente reservadas para especialistas humanos (BROWN, 2009). Para que esses sistemas possam executar suas funções, informações a respeito do funcionamento do sistema devem ser reunidas, de modo que possam ser representadas na forma de estruturas de decisão do tipo SE-ENTÃO em um programa computacional. A partir dessas regras estabelecidas e dos dados de operação coletados do sistema, o programa emula o processo de decisão de um especialista humano. Visto que o sistema especialista é baseado nos dados de uma rede de distribuição, ele é, portanto, dependente do sistema. O número de regras é incrementado à medida que o tamanho do sistema aumenta. Portanto, a manutenção de um sistema especialista de grande porte é muito cara e a otimalidade da solução não pode ser garantida (SHEN, WU, *et al.*, 2018).

Um sistema especialista foi proposto em (LIU, LEE e VENKATA, 1988) para a restauração de sistema de distribuição no qual foi construído uma base de conhecimento de aproximadamente 180 regras que foram usadas por operadores no planejamento de um esquema de restauração. O conhecimento incorporado foi adquirido da literatura e discussões com os engenheiros de distribuição. O método aplicado permite a restauração das zonas do alimentador em grupos. Além disso, foram apresentadas regras para encontrar uma configuração de alimentação com as perdas nas linhas reduzidas.

Os autores da referência (LEE e PARK, 1996) apresentam um sistema especialista de apoio a restauração para subestações de distribuição de 154 kV coreanas. A base de regras desse sistema especialista compreende regras básicas sugeridas pela Companhia de Energia Elétrica da Coreia assim como regras heurísticas, regras de identificação de topologia e regras de busca para gerar sequências de chaveamento para um processo de restauração adequado.

1.4.2. Meta-heurísticas

Uma meta-heurística pode ser considerada como regras mais amplas que comandam métodos heurísticos de modo que o espaço de busca seja explorado de forma mais eficiente. As regras que compõem o contexto meta-heurístico podem ser desenvolvidas arbitrariamente e se fundamentam em analogias com fenômenos físicos, químicos, biológicos, sociais, semânticos ou mesmo em propriedades matemáticas (GOLDBARG, GOLDBARG e LUNA, 2016). Apesar da solução de algoritmos meta-heurísticos ser próxima a solução ótima, eles requerem tempo computacional elevado quando aplicados a sistemas grandes e não podem garantir uma solução ótima.

Meta-heurísticas compreendem muitas famílias incluindo, mas não limitado: algoritmos evolucionários tais como algoritmos genéticos, métodos de busca direta tal como recozimento simulado e métodos de busca local tal como Busca Tabu (ABU-ELANIEN, SALAMA e SHABAN, 2018).

Um estudo comparativo de quatro meta-heurísticas (busca tabu reativa, busca tabu, recozimento simulado paralelo e algoritmo genético) para a restauração de serviço de redes de distribuição é apresentado em (TOUNE, FUDO, *et al.*, 2002).

Na referência (KUMAR, DAS e SHARMA, 2008), uma técnica baseada no algoritmo genético de classificação por não dominância II (NSGA-II) é apresentada para resolver o problema de restauração de serviço em um sistema de distribuição de energia elétrica. Em contraste com a abordagem baseada em algoritmo genético convencional, a abordagem sugerida não requer fatores de ponderação para a conversão de tal problema de otimização multiobjetivo em um problema equivalente de otimização monobjetivo. Várias questões práticas de operação do sistema de distribuição, como a presença de consumidores prioritários, presença de controle remoto, como bem como chaves controladas manualmente, entre outras, também foram considerados. Com base nos resultados da simulação em quatro diferentes sistemas de distribuição, o desempenho do esquema baseado em NSGA-II foi considerado significativamente melhor do que um algoritmo genético convencional. Além disso, para reduzir

o tempo de execução do software do algoritmo NSGA-II, uma versão mais rápida do NSGA-II também foi implementada.

1.4.3. Programação matemática

O problema da restauração é por natureza um problema de otimização, pois se deseja minimizar o número de consumidores desenergizados ou maximizar o número de consumidores com o fornecimento restabelecido sujeito a restrições técnicas, tais como: limites de carregamento e faixas admissíveis para as tensões nodais. Portanto, os métodos de programação matemática são os métodos de solução direta para esse problema. Na programação matemática utiliza-se algoritmos que buscam minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável. Os principais algoritmos de programação matemática usados na solução de problemas de otimização em sistemas de potência são: programação linear, programação não-linear, programação cônica e programação linear inteira mista. A programação matemática tem a vantagem de encontrar a solução ótima do problema (ABU-ELANIEN, SALAMA e SHABAN, 2018). No entanto, o tempo de solução pode tornar-se um fator proibitivo para sua aplicação em sistemas de grande porte, pois o tempo de solução é dependente do espaço de busca.

Na referência (ROMERO, FRANCO, *et al.*, 2016), apresenta-se um modelo matemático para resolver o problema de restauração em sistemas de distribuição radiais equilibrados. O problema de restauração é transformado em um problema de programação cônico de segunda ordem inteiro misto, que pode ser resolvido de forma eficiente usando vários solucionadores comerciais baseados na técnica de otimização “*branch and bound*”. O modelo matemático proposto considera diversos objetivos em uma única função objetivo, usando parâmetros para preservar a hierarquia dos diferentes objetivos: 1) maximizar a satisfação da demanda, 2) minimizar o número de operações de chaveamento, 3) priorizar a operação de comutação automática em vez de manual e 4) priorizar de cargas especiais. Testes gerais e especializados foram realizados em um sistema de teste de 53 nós, e os resultados foram comparados com

outros algoritmos propostos anteriormente. Os resultados mostram que o modelo matemático é robusto, eficiente, flexível e encontra soluções ótimas de boa qualidade.

Um método eficiente e robusto e um pacote de software desenvolvido para a restauração de redes de distribuição radial com o objetivo de restabelecer as condições normais de operação são descritos em (CIRIC e POPOVIC, 2000). A metodologia proposta usa abordagem heurística combinada a programação inteira mista para resolver o problema de restauração da rede. Devido a sua eficiência computacional, esta abordagem pode ser usada tanto nos ambientes de planejamento e operação.

O tratamento do problema de restauração em uma abordagem de duas fases, resolvendo-se dois subproblemas de otimização diferentes, é sugerido por (CARVALHO, FERREIRA e BARRUNCHO, 2007). A primeira fase consiste em encontrar a configuração ótima da rede pós-falta por meio de um algoritmo genético. A segunda fase consiste em determinar a sequência ótima de operações para obter a configuração ótima da rede identificada na primeira fase. A sequência de manobras associada com a segunda fase é obtida através de um algoritmo de programação dinâmica. A abordagem de duas fases visa reduzir a dimensão do problema.

1.4.4. Restauração sob incerteza

A GD pode auxiliar na restauração da rede de distribuição através da formação de microrredes e do suporte de potência para mitigar violações nas restrições técnicas. Contudo, a GD renovável (solar, eólica e de biomassa) também adiciona uma complexidade adicional na solução do problema de restauração: a incerteza. Esta incerteza é devido a intermitência na potência de saída da GD renovável. Esta variabilidade é causada pela natureza estocástica das fontes primárias de energia da GD renovável, por exemplo, a radiação solar e a velocidade do vento para as GD solar fotovoltaica e eólica, respectivamente.

Atualmente, há grande interesse na instalação de sistemas solares fotovoltaicos de pequeno e médio porte em redes de distribuição. Este interesse

é devido a paridade entre os preços de venda de energia pela concessionária e de produção de energia pela instalação solar ter sido alcançada. A principal causa deste fato é o amadurecimento e evolução das tecnologias de fabricação dos painéis solares que reduziram significativamente os seus custos. Além disso, outro fator que estimula a instalação de GD Fotovoltaica (GDFV) é a presença de subsídios governamentais para o uso de energias renováveis. Portanto, há uma penetração elevada de GDFV em redes de distribuição média e baixa tensão que tem potencial para impactar nos seguintes aspectos de planejamento e qualidade de energia destas redes: controle var/volt, harmônicos gerados pela interface baseada em inversor, baixos níveis de curto-circuito, estabilidade de tensão, cintilação e na restauração. O estado pós reconfiguração, obtido pelo plano de restauração, está sujeito ao risco de violações das restrições técnicas de tensão e/ou carregamento. Este risco é intensificado pelas incertezas na potência de saída da GDFV. A ocorrência imprevista destas violações no estado pós-restauração pode degradar a eficácia do plano de restauração devido aos seguintes fatores:

i) Desligamento intempestivo de cargas devido a atuação de proteções de sobretensão/subtensão ou a sua própria sensibilidade as variações de tensão.

ii) Desligamento de circuitos devido a atuações das proteções causadas por sobrecargas.

Outra fonte de incerteza que pode aumentar os riscos de violações de restrições técnicas na restauração são os erros de previsão de carga. Esses erros são devido a coexistência de sistemas de medição com escalas de tempo distintas em uma rede de distribuição: o SCADA (*“Supervisory Control and Data Acquisition”*), com transmissão na escala de segundos, e a AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), com transmissão de 15 minutos a 24 horas (RAPOSO, RODRIGUES e SILVA, 2021). Devido a isso, muitos DMS (*“Distribution Management System”*) usam pseudo-medições geradas a partir da aplicação de métodos previsão de carga (estatísticos ou de inteligência artificial) aos dados da AMI. Isto é, dados históricos desatualizados coletados pela AMI são

usados para simular os valores das medições. Os erros associados com estas pseudo-medições são maiores que aqueles associados com medições do sistema SCADA, que estão sujeitos apenas as características construtivas do equipamento de medição. Portanto, o plano de restauração deve ser realizado sob incerteza. Este aspecto tem resultado em publicações sobre a realização da restauração considerando incertezas.

ARJOMANDI-NEZHAD, MAZAHARI, *et al.* (2022) propõem um modelo de otimização baseado no método de controle preditivo para maximizar a carga restaurada considerando o pior valor da carga e de potência de saída da GDFV para intervalos de tempo futuros. Adicionalmente, o roteamento da equipe de reparo é ajustado para tornar-se compatível com o método de controle preditivo. A distribuição normal foi usada para modelar incertezas na carga e na geração e os piores valores destes parâmetros foram identificados com base nos limites de intervalos de confiança típicos (95% de nível de significância) para a distribuição normal.

LI, LI, *et al.* (2020) introduzem o conceito de sistema multiagente completamente descentralizado para construir uma estrutura de restauração unificada para redes de distribuição com GD renovável. As incertezas na carga e na geração foram modeladas usando-se variações paramétricas determinísticas. Além disso, a metodologia de restauração proposta considerou a operação ilhada de microrredes no processo de restauração.

Os autores da referência (WANG, LEI, *et al.*, 2021) apresentam um modelo de programação matemática para realizar a restauração de redes de distribuição considerando os seguintes aspectos: geração distribuída renovável, armazenamento de energia, resposta a demanda e compensadores estáticos de reativos. As incertezas nos erros de previsão de carga e de potência produzida pela GD renovável foram modeladas usando-se a distribuição normal para incluir estas incertezas no modelo de programação matemática através de restrições de chance.

A referência (ZOU, MOHY-UD-DIN, *et al.*, 2020) apresenta uma metodologia para estimar o índice de confiabilidade SAIDI (“System Average Interruption Duration Index”) através da Simulação Monte Carlo (SMC) cronológica. A SMC é usada para modelar incertezas na carga e na potência de saída de GD renováveis eólicas e solares. A reconfiguração da rede orientada a restauração é realizada através de um algoritmo de otimização via enxame de partículas (“PSO-Particle Swarm Optimization”) livre de parâmetros.

LI, KHODAYAR e FEIZI (2022) introduzem um modelo de co-otimização multi-estágio para integrar o despacho das equipes de reparo com a reconfiguração da rede de distribuição. O primeiro estágio busca encontrar uma solução ótima para o problema de roteamento de equipes. No segundo e no terceiro estágios, a reconfiguração da rede e o despacho de microrredes são determinados, respectivamente. Múltiplas fontes de incerteza são consideradas (tempos de reparo, tempos de deslocamentos das equipes, carga e GD renovável) modelando-se o segundo estágio como um problema de programação estocástica e o terceiro estágio como um problema de otimização robusta.

Os autores da referência (WANG, XIAO, *et al.*, 2019) apresentam uma metodologia baseada no Método de Superfície de Resposta Estocástica (MSRE) para realizar a restauração em redes de distribuição considerando-se incertezas na GD renovável e na carga. Nesta metodologia, a reconfiguração orientada a restauração é combinada com a formação de microrredes. As distribuições de probabilidade das tensões e dos carregamentos geradas pelo MSRE são usadas para introduzir restrições de probabilidade de violação no problema de restauração. A viabilidade destas restrições é assegurada através da realização do corte de carga.

A partir da revisão bibliográfica realizada acima, pode-se observar que há uma preferência por métodos probabilísticos para a modelagem de incertezas na solução do problema de restauração. A preferência por estas técnicas se deve ao fato de que elas fornecem uma combinação de probabilidade e severidade que possibilita a estimação de índices baseados em risco (BILLINTON

e LI, 1994; BILLINTON e ALLAN, 1996). Além disso, é possível notar as técnicas de solução do problema de restauração são bastante diversificadas: sistemas multiagentes, controle preditivo, meta-heurísticas (PSO), otimização estocástica e otimização robusta. Contudo, os métodos baseados nas meta-heurísticas possuem mais flexibilidade para modelar restrições complexas no problema de restauração, por exemplo, os riscos de violações das restrições de tensão e de carregamento.

Adicionalmente, a revisão bibliográfica referente a restauração sob incertezas identificou que a otimização concorrente da potência ativa restaurada e da probabilidade de violação de restrições técnicas não foi realizada em nenhuma publicação. Este aspecto é muito importante pois permite estabelecer um compromisso entre o risco de infactibilidade e a qualidade da solução ótima com relação a potência ativa restaurada.

1.5. MOTIVAÇÃO

A penetração elevada de GD em redes de distribuição e a necessidade de maximizar a confiabilidade da rede de distribuição através da implementação das REI torna mandatário o desenvolvimento de planos de restauração robustos com relação a incertezas na previsão da carga e da GD renovável. Estes planos auxiliarão as concessionárias de distribuição a melhorarem os índices de confiabilidade e a maximizar as suas receitas devido à redução no pagamento de multas por transgressões nas metas para índices de confiabilidade. Este aspecto é fundamental para as concessionárias de distribuição assegurarem a sua sobrevivência no ambiente competitivo resultante da desregulamentação do setor elétrico.

1.6. OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo desenvolver uma metodologia para realizar a restauração do fornecimento de energia em REI. Ou seja, realizar a reconfiguração da rede elétrica para minimizar a energia não-

fornecida após uma interrupção no fornecimento de energia. A metodologia proposta considera incertezas associadas com erros de previsão de carga e intermitência da geração distribuída fotovoltaica. Estas incertezas serão modeladas através do Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) baseado no método do Hipercubo Latino para se estimar os riscos de violações nas restrições de tensão e carregamento. Além disso, a busca Tabu foi usada para solucionar o problema de reconfiguração da rede de distribuição associado com a restauração à jusante. A combinação da Busca Tabu com o FPP resultou em algoritmo de restauração robusto com relação as incertezas. Este algoritmo otimiza de forma concorrente da potência ativa restaurada e os riscos de violações das restrições técnicas. Esta otimização multiobjetivo foi realizada usando-se uma estrutura Fuzzy.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Apresenta uma visão abrangente sobre sistemas de distribuição de energia elétrica e redes inteligentes. Além disso, inclui uma revisão da literatura que aborda os principais estudos sobre a restauração de redes de distribuição. Por fim, ressalta-se a motivação para a elaboração desta dissertação e os objetivos que ela busca alcançar.

Capítulo 2 – Apresenta o algoritmo de fluxo de potência, fundamentado no método da soma de correntes, utilizado para calcular as tensões nos nós do sistema.

Capítulo 3 – Descreve a modelagem de incertezas e a estimação dos índices probabilísticos através do Método de Hipercubo Latino.

Capítulo 4 – Introduz o método proposto para a restauração da rede de distribuição sob incerteza.

Capítulo 5 – Apresenta os resultados dos testes realizados com a metodologia proposta para a restauração de redes de distribuição sob incerteza.

Capítulo 6 – Descreve as principais conclusões obtidas com a aplicação do modelo proposto e apresenta sugestões para a extensão do trabalho de pesquisa realizado nesta dissertação.

1.8. PUBLICAÇÃO RESULTANTE DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado resultou na publicação de um artigo em uma conferência nacional. A referência completa deste artigo é apresentada abaixo:

Rômulo F. N. Neres, Elson N. M. Silva, Anselmo B. Rodrigues, Maria G. Silva, “Restauração de Redes de Distribuição sob Incerteza”, Anais do XXV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2024), 15-18 de Outubro de 2024, Rio de Janeiro-RJ, Sociedade Brasileira de Automática (SBA), Campinas-SP.

2. FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Para que um operador do sistema de distribuição possa analisar as condições de operação da rede, como por exemplo a existência ou não de violações de tensão nas barras ou carregamento nas linhas, é necessário a realização do cálculo do fluxo de carga. Também chamado de fluxo de potência, o fluxo de carga é um procedimento matemático realizado em redes de energia elétrica que permite o cálculo das magnitudes e ângulos das tensões de todas as barras do sistema (GERS, 2013). Outras grandezas de interesse (tais como: potência transferida, carregamento dos componentes, perdas etc.) podem ser calculadas por meio de expressões conhecidas visto que as magnitudes e os ângulos das tensões são determinados.

2.2. FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Os algoritmos mais conhecidos para implementar programas de fluxo de carga são métodos de Newton-Raphson e Ponto-Fixo (Jacobi, Gauss-Seidel e Gauss-Zbus). O método de Newton-Raphson e suas variações funcionam de forma muito eficiente em sistemas onde a relação X/R é alta, normalmente sistemas de transmissão. Podem também ser aplicados em sistemas de distribuição, porém nesse caso pode haver problemas na convergência devido à baixa relação X/R . Portanto, outros algoritmos são mais apropriados para esse caso.

Estudos de otimização requerem várias execuções de fluxo de carga, por conseguinte, o custo computacional do algoritmo usado para solução do fluxo de potência deve ser baixo. Por causa da configuração radial dos sistemas de distribuição, os modelos matemáticos desenvolvidos para estas redes são mais simples que aqueles desenvolvidos para sistemas de transmissão. Métodos específicos para sistemas radiais proporcionam uma boa precisão e menos

demanda por memória, assim como possuem implementação simples e boa velocidade de convergência.

O Método da Soma de Correntes (MSC), utilizado neste trabalho, baseia-se na aplicação direta das Leis de Kirchhoff das Tensões (LKT) e a Lei de Kirchhoff das correntes (LKC) (SHIRMOHAMMADI, HONG, *et al.*, 1988) e seu algoritmo é detalhado na seção subsequente.

2.3. MÉTODO DA SOMA DE CORRENTES

Um sistema de distribuição radial é definido como um sistema onde cada componente tem um único caminho para a fonte de energia. A direção do fluxo de potência em um sistema radial é sempre da fonte para a carga.

Estruturas radiais são frequentemente referidas como árvores, com a fonte de potência sendo a raiz, os componentes sendo os nós e as conexões dos componentes sendo os ramos.

A árvore da Figura 5 possui 12 nós, cada um rotulado por um número. O nó raiz é o 0 (zero). Uma árvore com n nós deve ter $n - 1$ ramos pois todos os nós, exceto o raiz, recebem um ramo. Os filhos de 3 são 6, 7 e 8 e o pai de 2 é 1. Sendo 0 (zero) o nó raiz, ele não tem pai. Todos os outros nós têm pais. Na estrutura de árvores, em um ramo o nó mais próximo ao nó raiz é denotado de nó inicial e o outro nó é chamado de nó final.

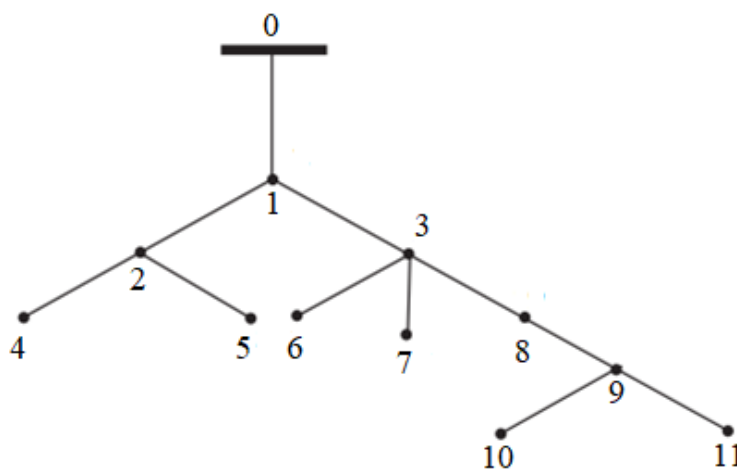


Figura 5 Exemplo de sistema radial.
Fonte: Elaborada pelo Autor.

A camada de um nó é definida inicialmente deixando o nó raiz na camada 1. Se um nó está em uma camada p , então seus filhos estão na camada $p+1$. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra as camadas de todos nós dessa árvore. Desta forma, a camada de um nó é o número de nós no caminho entre o nó de interesse e o nó fonte.

Antes de iniciar o algoritmo é necessário realizar a numeração dos ramos de acordo com as camadas como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A numeração de ramos em uma camada inicia somente depois de todos os ramos na camada anterior terem sido numerados (SHIRMOHAMMADI, HONG, *et al.*, 1988). Essa numeração dos ramos visa a melhoria de seu desempenho computacional. Após isso, o algoritmo é executado da seguinte forma:

Passo 1: Sabendo a tensão no nó raiz, as tensões nos outros nós são estimadas e o contador de iterações k é iniciado.

$$k = 1 \quad (1)$$

$$V_i^{(k)} = 1\angle 0^\circ \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Onde: $V_i^{(k)}$ é a tensão no nó i calculada durante a k -ésima iteração

Passo 2: A extração de corrente nodal, $I_i^{(k)}$, no nó i da rede na iteração k é calculada da seguinte forma:

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k)}} \right)^* + Y_i V_i^{(k)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1) \quad (3)$$

Onde: S_i é a extração de potência específica no nó i . Y_i é a soma de todas as admitâncias shunt (em derivação) no nó i .

Passo 3: Na iteração k , começando dos ramos na última camada e movendo em direção ao nó raiz, considerando um ramo j do nó k (nó inicial) para o nó m (nó final), a corrente no ramo j é calculada como:

$$I_{km}^{(k)} = I_m^{(k)} + \sum_{l \in \Omega_m^{jus}} I_m^{(k)} \quad j = N^{bran}, N^{bran} - 1, \dots, 1 \quad (4)$$

Onde: N^{bran} é o último ramo da última camada, $I_{km}^{(k)}$ é a corrente no ramo entre os nós k e m na iteração k , Ω_m^{jus} é o conjunto de ramos à jusante do nó m .

Por exemplo, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a corrente no ramo 9 é igual a corrente do seu nó final, 9, mais as correntes dos ramos 10 e 11, isto é, aplicação direta da LKC.

Passo 4: As tensões nodais são atualizadas começando dos ramos na primeira camada em direção daqueles nas últimas. Para cada ramo j a tensão no seu nó final m é calculada usando a tensão atualizada no nó inicial k e a corrente de ramo calculada no passo anterior, ou seja, aplicação direta da LKT como se segue:

$$V_m^{(k)} = V_k^{(k)} - Z_{km}^{ser} I_{km}^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, N^{bran} \quad (5)$$

Onde: Z_{km}^{ser} é a impedância série do ramo j entre os nós k e m .

Por exemplo, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a tensão no nó 1 é dada por:

$$V_1 = V_0 - Z_{01}^{ser} I_{01} \quad (6)$$

Passo 5: Calcular o desvio máximo no módulo das tensões nodais em relação a iteração anterior de acordo com a fórmula a seguir:

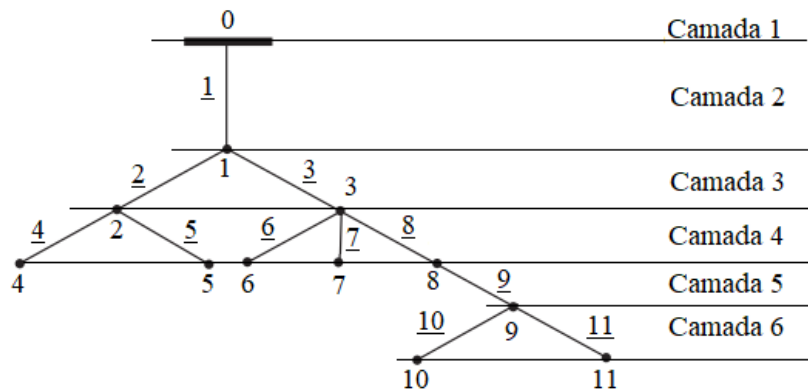


Figura 6 - Organização do sistema radial para aplicação do algoritmo.
Fonte: Elaborada pelo Autor.

$$\Delta V^{max} = \max \left\{ \left| |V_i^{(k)}| - |V_i^{(k-1)}| \right| \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Passo 6: O desvio calculado no passo anterior é comparado com uma tolerância pré-estabelecida. Se o desvio é menor que a tolerância, o algoritmo é encerrado. Caso contrário, os passos 2, 3, 4 e 5 são repetidos até que o desvio seja menor que o valor de tolerância.

O algoritmo acima é ilustrado no fluxograma da Figura 10.

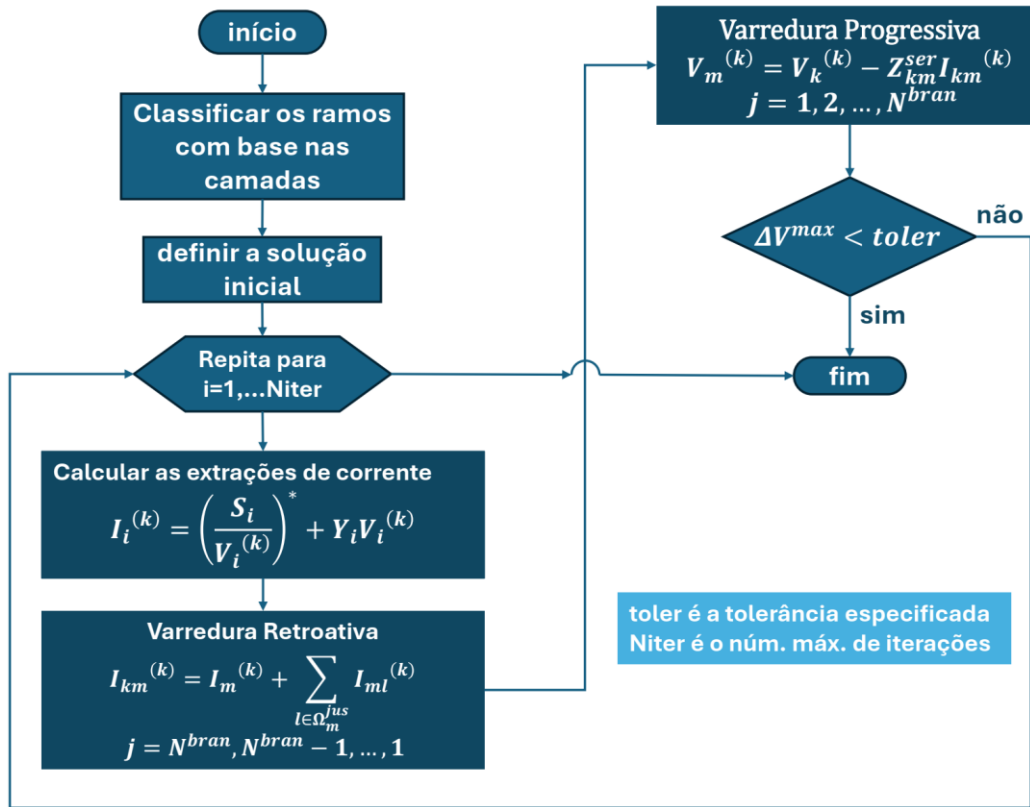


Figura 10 Fluxograma do método de soma de correntes

3. MODELAGEM PROBABILÍSTICA DAS INCERTEZAS

O FPP é um método estocástico, aplicado em condições de regime permanente da rede elétrica, que considera diversos fatores aleatórios da rede elétrica, tais como: flutuações de carga, falhas de geradores, contingências no sistema de transmissão, etc (ANDERS, 1990; CHEN , CHEN e BAK-JENSEN, 2008; PRUSTY e JENA; RAMADHANI, SHEPERO, *et al.*, 2020; WANG, SONG e IRVING, 2008). Portanto, o FPP é mais eficaz na identificação das características operacionais do sistema de potência que o fluxo de carga determinístico. Por exemplo, o FPP pode calcular as probabilidades associadas com os seguintes eventos: instabilidade de tensão, sobrecargas nos circuitos, subtenções/sobretensões etc.

O principal pré-requisito para a aplicação do FPP é modelagem das incertezas através de distribuições de probabilidade. Portanto, a seguir são apresentadas as distribuições de probabilidade usadas para modelar incertezas referentes a carga e a geração distribuída fotovoltaica. Em seguida, é apresentada a técnica usada para solucionar o FPP: o Hipercubo Latino (OLIVEIRA, RODRIGUES e SILVA, 2018). Finalmente, descreve-se como Hipercubo Latino é aplicado na solução do FPP.

3.1. CARGA

A incerteza nas cargas ativa e reativa devido aos erros de previsão foi modelada neste trabalho através da distribuição normal (CHAGAS, RODRIGUES e SILVA, 2018; MOREIRA, CHAGAS, *et al.*, 2020), de acordo com com (8) e (9), respectivamente.

$$Pd_k = Pd_k^{nom} + \sigma_k^P \times \mathcal{N}(0,1) \quad (8)$$

$$Qd_k = Qd_k^{nom} + \sigma_k^Q \times \mathcal{N}(0,1) \quad (9)$$

Onde:

Pd_k^{nom} (Qd_k^{nom}) é o valor nominal da carga ativa (reativa) no nó k .

$\mathcal{N}(0,1)$ é uma variável aleatória com distribuição normal padronizada.

σ_k^P e σ_k^Q são os desvios padrões associados com as cargas ativa e reativa no nó k e definidos conforme (10) e (11), respectivamente.

$$\sigma_k^P = \frac{Pd_k^{nom} \times \varepsilon_{\%}^P}{3 \times 100} \quad (10)$$

$$\sigma_k^Q = \frac{Qd_k^{nom} \times \varepsilon_{\%}^Q}{3 \times 100} \quad (11)$$

$\varepsilon_{\%}^P$ e $\varepsilon_{\%}^Q$ são os erros percentuais máximos de previsão de carga ativa e reativa, respectivamente. Os valores dos erros de medição são dependentes do tipo do sistema de medição: medições reais obtidas a partir do sistema SCADA ou pseudo-medições geradas por métodos de previsão de carga. Os dados obtidos via SCADA geralmente tem maior precisão que aqueles gerados via previsão de carga. Desta forma, os valores típicos para os erros de medições reais e pseudo-medições são 3% e 50%, respectivamente (SINGH, PAL e VINTER, 2009).

3.2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

A Geração Distribuída (GD) renovável com maior penetração em redes de distribuição é a solar fotovoltaica. Desta forma, será considerado neste trabalho que o único tipo de GD renovável conectada à rede de distribuição é a GD Fotovoltaica (GDFV). A principal fonte de incerteza na GDFV é a sua fonte primária de energia, isto é, a radiação solar. Geralmente, a radiação solar em é modelada em estudos de FPP através da distribuição beta (SARKAR e AJJARAPU). A potência de saída da GDFV é definida de acordo com (12), modelo proposto por (SARKAR e AJJARAPU).

$$Pg_k = Pg_k^{nom} [1 - f(R, \alpha, \beta)] \quad (12)$$

$$f(R, \alpha, \beta) = \frac{R^{(\alpha-1)}(1-R)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad (13)$$

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} \quad (14)$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (15)$$

Onde:

Pg_k^{nom} é potência nominal da GDFV instalada no nó k .

R é a radiação solar.

$f(R, \alpha, \beta)$ é uma variável aleatória com distribuição Beta definida de acordo com (13) e (14).

$\Gamma(z)$ é a função Gama definida em (15).

α e β são os parâmetros da distribuição Beta estimados a partir de dados históricos meteorológicos de radiação solar usando-se técnicas estatísticas, tais como o Método dos Momentos.

3.3. HIPERCUBO LATINO

A amostragem do hipercubo latino é uma mistura de amostragem aleatória e sistemática para garantir que cada intervalo da variável X_i seja visitado. Em casos de tamanhos de amostras pequenos, esse método pode melhorar consideravelmente a precisão computacional (ZHANG, CHENG, *et al.*, 2013). O método de amostragem do hipercubo latino gera uma amostra quase aleatória das variáveis de entrada com base na estratificação de cada variável aleatória simultaneamente (KUMAMOTO e HENLEY, 1996). O procedimento básico do método Hipercubo Latino (HCL) inclui amostragem e permutação. O objetivo da amostragem é gerar amostras representativas que reflitam de forma abrangente as distribuições das variáveis aleatórias de entrada (YU, CHUNG, *et al.*, 2009), enquanto o objetivo da permutação é ajustar as correlações das amostras de todas essas variáveis aleatórias de entrada ao nível

desejado (ZHANG, CHENG, *et al.*, 2013). Os detalhes da amostragem HCL padrão são apresentados a seguir (OLIVEIRA, RODRIGUES e SILVA, 2018).

A estratificação é realizada assumindo-se que cada variável aleatória de entrada $X_i \forall i = 1, \dots, r$ é contínua e independente das demais. Para estratificar a distribuição de X_i , a sua CDF (*Cumulative Distribution Function*) é dividida em n seções idênticas e não sobrepostas. Quando n é grande o suficiente, o valor de cada variável aleatória em um dado intervalo é definido conforme (16).

$$x_{ik} = F_{X_i}^{-1} \left(\frac{k - \text{rand}}{n} \right) \forall k = 1, \dots, n \quad (16)$$

Onde:

x_{ik} é o valor da variável aleatória X_i no intervalo k .

$F_{X_i}^{-1}$ é a inversa da CDF de X_i .

rand é um número aleatório independente uniformemente distribuído entre 0 e 1.

Desta forma, uma sequência de amostras é obtida para cada $X_i \forall i = 1, \dots, r$. Os valores amostrados são inseridos em cada linha da matriz de amostragem. Uma vez que todas as r variáveis aleatórias de entrada são amostradas, uma matriz de amostragem primária $r \times n$ pode ser obtida, conforme mostrado em (17).

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1(n-1)} & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{i(n-1)} & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{r1} & x_{r2} & \cdots & x_{r(n-1)} & x_{rn} \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{variável } 1 \\ \vdots \\ \text{variável } i \\ \vdots \\ \text{variável } r \end{matrix} \quad (17)$$

Para cada fila i (ou seja, as amostras de X_i), realiza-se uma permutação aleatória dos elementos $x_1, x_2, \dots, x_n$ para $x_{\mathcal{P}_{i1}}, x_{\mathcal{P}_{i2}}, \dots, x_{\mathcal{P}_{in}}$, onde $\{\mathcal{P}_{i1}, \mathcal{P}_{i2}, \dots, \mathcal{P}_{in}\}$ é uma permutação aleatória de $\{1, 2, \dots, n\}$ como mostrado em (18).

$$\begin{pmatrix}
 x_{\mathcal{P}_{11}} & x_{\mathcal{P}_{12}} & \cdots & x_{\mathcal{P}_{1(n-1)}} & x_{\mathcal{P}_{1n}} \\
 \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
 x_{\mathcal{P}_{i1}} & x_{\mathcal{P}_{i2}} & \cdots & x_{\mathcal{P}_{i(n-1)}} & x_{\mathcal{P}_{in}} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 x_{\mathcal{P}_{ri}} & x_{\mathcal{P}_{r2}} & \cdots & x_{\mathcal{P}_{r(n-1)}} & x_{\mathcal{P}_{rn}}
 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{(n-1)} \quad \mathbf{x}_n$$

Com esta permutação, a coluna k ($k = 1, 2, \dots, n$) da matriz em (18), denotada por $\mathbf{x}_k$, contém amostras de $X_1, X_2, \dots, X_r$, respectivamente. A partir da matriz permutada (18), pode-se estimar o valor esperado de uma função-teste $h(\mathbf{X})$ através da definição de média amostral conforme (19) (KUMAMOTO e HENLEY, 1996).

$$\tilde{\mathbb{E}}[h(\mathbf{X})] = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h(\mathbf{x}_k) \quad (19)$$

Onde:

$\tilde{\mathbb{E}}[h(\mathbf{X})]$ é o valor esperado estimado de $h(\mathbf{X})$.

3.4. FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO VIA HIPERCUBO LATINO

O FPP pode ser realizado usando uma abordagem numérica ou uma abordagem analítica. A abordagem numérica, por exemplo, o método de Simulação Monte Carlo (SMC), sorteia uma amostra de vetores de parâmetros de entrada e realiza uma análise determinística de cada elemento da amostra para obter as variáveis de saída de interesse. Em seguida, os índices probabilísticos (por exemplo, média, desvio padrão, percentis etc.) associados com a amostra de variáveis de saída são estimados usando-se técnicas estatísticas adequadas. Enquanto que a abordagem analítica analisa um sistema e suas entradas usando expressões matemáticas, como PDF (*Probability Density*

Function”), e obtém resultados também em termos de expressões matemáticas (CHEN , CHEN e BAK-JENSEN, 2008).

A abordagem numérica consiste em adotar um método de SMC para a análise do FPP. As duas principais características da SMC são a geração de números aleatórios e a amostragem aleatória. Embora as técnicas de amostragem possam ser bastante sofisticadas, o FPP usando SMC, em princípio, realiza Fluxo de Potência Determinístico (FPD) um grande número de vezes com entradas de diferentes combinações de valores de potências nodais (CHEN , CHEN e BAK-JENSEN, 2008). Portanto, a exata forma não linear das equações de fluxo de potência (MONTICELLI, 1983), conforme mostrado em (20)-(23), pode ser usada na análise do FPP.

$$P_k(\theta, V) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad \forall k = 1, \dots, N^{node} \quad (20)$$

$$Q_k(\theta, V) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad \forall k = 1, \dots, N^{node} \quad (21)$$

$$P_{km} = y_{km} V_k [V_k \cos \psi_{km} - V_m \cos(\theta_{km} - \psi_{km})] \quad (22)$$

$$Q_{km} = -y_{km} V_k [V_k \sin \psi_{km} + V_m \sin(\theta_{km} - \psi_{km})] \quad (23)$$

Onde:

P_k (Q_k) é a injeção de potência líquida ativa (reativa) no nó k .

P_{km} (Q_{km}) é o fluxo de potência ativa (reativa) na linha km no lado do barramento k .

V_k e V_m são as magnitudes de tensão nos barramentos k e m , respectivamente.

θ_{km} é a diferença de ângulo entre as tensões nos barramentos k e m .

G_{km} e B_{km} são a parte real e imaginária da admitância série do nó k para o nó m .

y_{km} é a admitância série complexa do nó k para o nó m .

A capacidade de usar as equações não lineares de fluxo de potência é a razão pela qual os resultados obtidos do FPP usando MC são geralmente considerados como referência em relação aos resultados obtidos de outros algoritmos de FPP com equações de fluxo de potência simplificadas, a fim de verificar a precisão destes algoritmos (ALLAN, LEITE DA SILVA e BURCHETT, 1981). Apesar de sua precisão relativamente alta, o método MC requer uma grande quantidade de tempo de computação devido ao grande número de cálculos de fluxo de potência.

A ideia básica da abordagem analítica é realizar aritmética, ou seja, usar técnicas de convolução, com PDFs das variáveis estocásticas de entradas de potência, de modo que PDFs das variáveis estocásticas dos estados do sistema e fluxos de linha possam ser obtidos. No entanto, as dificuldades de resolver as equações de FPP pela convolução das PDFs das variáveis de potência de entrada são principalmente duas (CHEN , CHEN e BAK-JENSEN, 2008):

a) As equações de fluxo de potência (20)-(23) são não lineares.

b) As variáveis de potência de entrada em diferentes barramentos geralmente não são completamente independentes ou linearmente correlacionadas.

Portanto, várias suposições são geralmente feitas para poder realizar o FPP de maneira mais fácil usando métodos de amostragem. Essas suposições são (CHEN , CHEN e BAK-JENSEN, 2008):

a) Linearização das equações de fluxo de carga.

b) Variáveis de potência totalmente independentes ou linearmente correlacionadas.

c) Distribuição normal e distribuição discreta são geralmente assumidas para a carga e a geração, respectivamente.

d) A configuração e os parâmetros da rede são constantes.

Como resultado, as equações de fluxo de potência são linearizadas em torno da média estimada dos estados do sistema $\bar{X}$ com a expansão de Taylor

de primeira ordem (ALLAN, LEITE DA SILVA e BURCHETT, 1981). Se (20) e (21) forem representadas por uma forma mais geral como:

$$\tilde{Y} = f(\tilde{X}) \quad (24)$$

Onde:

$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{net} \\ \tilde{Q}_{net} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{ger} - \tilde{P}_{car} \\ \tilde{Q}_{ger} - \tilde{Q}_{car} \end{bmatrix}$ é o vetor de injeções de potências líquidas/resultantes sujeito a incertezas na carga e na geração.

$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \tilde{V} \end{bmatrix}$ é o vetor do estado da rede elétrica sujeito a incertezas.

$f(\tilde{X}) = \begin{bmatrix} P(\tilde{\theta}, \tilde{V}) \\ Q(\tilde{\theta}, \tilde{V}) \end{bmatrix}$ é o vetor associado com as equações algébricas de fluxo de fluxo de potência.

Expandindo-se (24) em série de Taylor de primeira ordem em torno dos valores médios das entradas resulta em:

$$\tilde{Y} \approx f(\bar{X}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{X}} \Delta \tilde{X} \quad (25)$$

$$\tilde{Y} - f(\bar{X}) \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{X}} \Delta \tilde{X} \quad (26)$$

Onde:

$$\Delta \tilde{X} = \tilde{X} - \bar{X}$$

$\bar{X}$ é o valor esperado do vetor de variáveis de estado calculado para os valores médios do vetor de variáveis de entrada $\tilde{Y}$, ou seja, é a solução do seguinte problema de fluxo de potência:

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} \bar{P}_{ger} - \bar{P}_{car} \\ \bar{Q}_{ger} - \bar{Q}_{car} \end{bmatrix} = f(\bar{X}) \quad (27)$$

Onde:

$\bar{Y}$ é o valor médio da injeção de potência nodal.

Fazendo-se $\bar{J} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{X}}$ e $\Delta\tilde{Y} = \tilde{Y} - f(\bar{X})$ em (26) resulta em:

$$\Delta\tilde{Y} = \bar{J}\Delta\tilde{X} \quad (28)$$

$$\Delta\tilde{X} = \bar{J}^{-1}\Delta\tilde{Y} \quad (29)$$

Fazendo-se $\bar{S} = \bar{J}^{-1}$, então a forma linearizada pode ser expressa como:

$$\Delta\tilde{X} = \bar{S}\Delta\tilde{Y} \quad (30)$$

$$\tilde{X} - \bar{X} = \bar{S}\Delta\tilde{Y} \quad (31)$$

$$\tilde{X} = \bar{X} + \bar{S}\Delta\tilde{Y} \quad (32)$$

No FPD resolvido usando o método de Newton-Raphson, a matriz Jacobiana J é calculada para cada iteração até que os erros dos resultados sejam menores que os valores especificados. No entanto, no FPP linearizado, a matriz Jacobiana é calculada apenas uma vez para o cálculo de cada fluxo de potência. Portanto, os erros causados pela linearização das equações de fluxo de potência devem ser observados e tratados.

O procedimento para montagem da matriz Jacobiana é como se segue:

Passo 1) Calcular a admitância série:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (33)$$

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (34)$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (35)$$

Passo 2) Montar as matrizes G (condutância) e B (susceptância) com os valores de (34) e (35) respectivamente.

Passo 3) Calcular as potências líquidas das barras conforme (20) e (21).

Passo 4) Calcular os elementos da matriz Jacobiana conforme (38) a (49) (MONTICELLI, 1983).

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \bar{\theta}} & \frac{\partial P}{\partial \bar{V}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \bar{\theta}} & \frac{\partial Q}{\partial \bar{V}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (37)$$

a) Submatriz H

Elemento H_{km} (fora da diagonal)

$$H_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (38)$$

Elemento H_{mk} (fora da diagonal)

$$H_{mk} = -V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (39)$$

Elemento H_{kk} (diagonal)

$$H_{kk} = -V_k \sum_{m \in \Omega_K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (40)$$

b) Submatriz N

Elemento N_{km} (fora da diagonal)

$$N_{km} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (41)$$

Elemento N_{mk} (fora da diagonal)

$$N_{mk} = V_m (G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (42)$$

Elemento N_{kk} (diagonal)

$$N_{kk} = G_{kk} V_k + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (43)$$

c) Submatriz M

Elemento M_{km} (fora da diagonal)

$$M_{km} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (44)$$

Elemento M_{mk} (fora da diagonal)

$$M_{mk} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (45)$$

Elemento M_{kk} (diagonal)

$$M_{kk} = -G_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (46)$$

d) Submatriz L

Elemento L_{km} (fora da diagonal)

$$L_{km} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (47)$$

Elemento L_{mk} (fora da diagonal)

$$L_{mk} = -V_m (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (48)$$

Elemento L_{kk} (diagonal)

$$L_{kk} = -B_{kk} V_k + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (49)$$

O fluxograma do FPP via hipercubo Latino é apresentado na Figura 8.

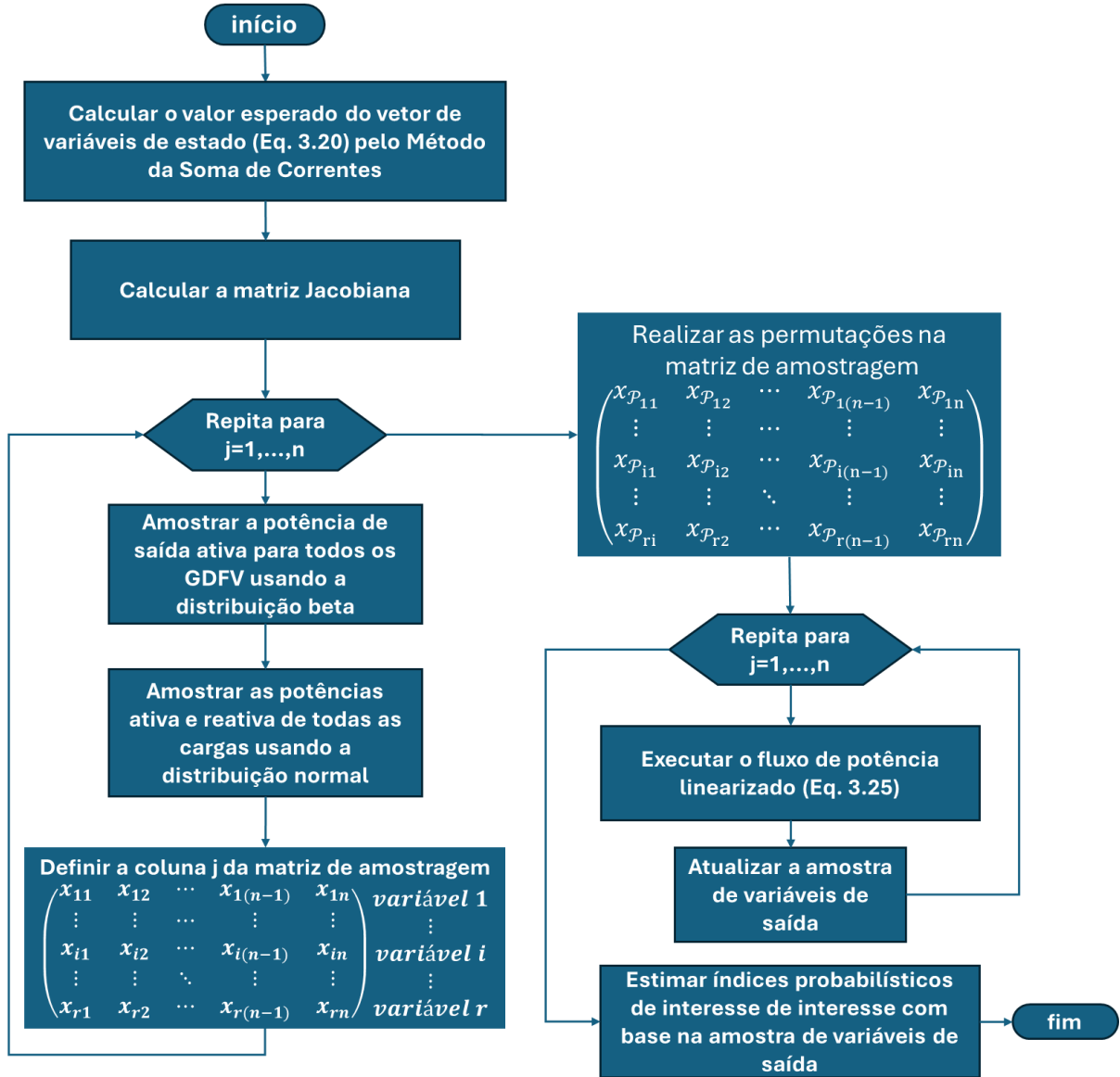


Figura 11 Fluxograma do FPP via Hipercubo Latino

As magnitudes dos fluxos de corrente nos circuitos são definidas de acordo com a lei de Ohm como se segue:

$$I_{serj}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{|z_j^{ser}|} \sqrt{w} \quad \forall j = 1, \dots, N^{bran} \quad (50)$$

Onde:

$$w = V_{k_j}^2 - 2V_{k_j}V_{m_j} \cos(\theta_{k_j} - \theta_{m_j}) + V_{m_j}^2$$

$Iser_j(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$ é o módulo do fluxo de corrente no circuito j .

N^{bran} é o número de ramos da rede de distribuição.

V_k e θ_k são o módulo e a fase da tensão no k , respectivamente.

$\mathbf{V}$ e $\boldsymbol{\theta}$ são vetores com dimensão $N^{node} \times 1$ que armazenam as magnitudes e fases das tensões nodais, respectivamente.

$z_i^{ser} = r_i^{ser} + jx_i^{ser}$ é a impedância série do ramo i .

$|z_i^{ser}| = \sqrt{r_i^{ser2} + x_i^{ser2}}$ é a magnitude da impedância série do circuito i .

k_j e m_j são os nós inicial e final, respectivamente, associados com o ramo j .

No fluxograma da Figura 8, a estimação dos índices probabilísticos de interesse é realizada com base no conceito de média amostral definido em (19). As definições das funções-teste para os riscos de violações são apresentadas abaixo:

i) Risco de Violação de Tensão

$$\mathcal{H}_k^{RVT}(\mathbf{x}_j) = \begin{cases} 0, & \text{se a tensão no nó } k \text{ está fora da faixa admissível} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde $\mathcal{H}_k^{RVT}(\mathbf{x}_j)$ é a função-teste associada com o Risco de Violação de Tensão (RVT) no nó k para o elemento j da amostra permutada.

ii) Risco de Violação do Limite de Carregamento

$$\mathcal{H}_i^{RVC}(\mathbf{x}_j) = \begin{cases} 0, & \text{se a corrente no ramo } i \text{ está abaixo do seu valor máximo} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde $\mathcal{H}_i^{RVC}(\mathbf{x}_j)$ é função-teste associada com o Risco de Violação de Carregamento (RVC) no ramo i para o elemento j da amostra permutada.

iii) Risco de Violação

$$\mathcal{H}^{RV} = \begin{cases} 0, & \text{se não há violações de tensão nas barras e de carregamento nos circuitos} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Onde h^{RV} é a função-teste associada com o Risco de Violação (RV) global/sistêmico.

4. FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO

Neste trabalho, a restauração da rede de distribuição é realizada de acordo com dois paradigmas: determinístico (sem incertezas) e o probabilístico (com incertezas). Nas subseções 4.1 e 4.2 são apresentadas as definições destas duas formulações do problema de restauração em redes de distribuição.

4.1. FORMULAÇÃO DA RESTAURAÇÃO DETERMINÍSTICA COM OBJETIVO SIMPLES (RDS)

A RDS obtém uma topologia ótima da rede que maximiza a potência ativa restaurada sujeito as seguintes restrições: limites de tensão, máximo carregamento e radialidade da rede. Adicionalmente, a carga e a GDFV são tratadas como variáveis determinísticas fixadas nos seus respectivos valores médios. A fim de estabelecer um parâmetro para aferir a qualidade das soluções encontradas, é associada ao problema uma função objetivo. A função objetivo e as restrições da RDS são definidas a seguir:

i) Função Objetivo:

$$Max. \sum_{k \in \mathcal{N}^\tau} Pd_k - \rho^{volt} \sum_{k \in \mathcal{N}^\tau} F_k^{volt} - \rho^{amp} \sum_{i \in \mathcal{B}^\tau} F_i^{amp} \quad (51)$$

Onde:

Pd_k (Qd_k) é a carga ativa (reativa) no k .

$\mathcal{N}^\tau$ e $\mathcal{B}^\tau$ são os conjuntos de nós e ramos restaurados para a topologia τ da rede de distribuição, respectivamente.

$\rho^{volt} = 10^5$ ($\rho^{amp} = 10^5$) é o fator de penalidade associado com violações de tensão (carregamento).

F_k^{volt} é função de penalidade para violações na magnitude de tensão no nó k (V_k) de acordo com 52.

V_{min} e V_{max} são os limites inferior e superior para as magnitudes das tensões, respectivamente.

F_i^{amp} é função de penalidade para violações de carregamento no ramo i conforme 53.

I_i é a magnitude da corrente I_i no ramo i dado em 54.

I_i^{max} é a corrente máxima para o ramo i .

k_i e m_i são os nós inicial e final para o ramo i , respectivamente.

$$F_k^{volt} = \begin{cases} V_{min} - V_k, & V_k < V_{min} \\ V_k - V_{max}, & \text{se } V_k > V_{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (52)$$

$$F_i^{amp} = \begin{cases} I_i^{max} - I_i, & I_i > I_i^{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (53)$$

$$I_i = \sqrt{(P_{k_i m_i}^2 + Q_{k_i m_i}^2)/V_{k_i}} \quad (54)$$

Os termos de penalidade na função objetivo (51) são usados para modelar violações nas seguintes restrições técnicas:

i-1) Intervalo Admissível para as Tensões Nodais

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad \forall k \in \mathcal{N}^\tau \quad (55)$$

i-2) Carregamento dos circuitos

$$I_i \leq I_i^{max} \quad \forall i \in \mathcal{B}^\tau \quad (56)$$

ii) Equações de fluxo de potência:

$$Ps_k + Pg_k - Pd_k - \sum_{i \in \mathcal{B}_k^\tau} P_{km_i} = 0 \forall k = 1, \dots, N^{node} \quad (57)$$

$$Qs_k + Qg_k - Qd_k - \sum_{i \in \mathcal{B}_k^\tau} Q_{km_i} = 0 \forall k = 1, \dots, N^{node} \quad (58)$$

$$V_k = V_k^{esp} \forall k \in \mathcal{N}_{V\theta} \quad (59)$$

$$\theta_k = \theta_k^{esp} \forall k \in \mathcal{N}_{V\theta} \quad (60)$$

Onde:

Ps_k (Qs_k) é a injeção de potência (reativa) ativa no nó k associada com uma barra da subestação (barra $V\theta$).

Pg_k (Qg_k) é a injeção de potência (reativa) no nó k associada com um gerador distribuído.

N^{node} é o número de nós da rede de distribuição.

$\mathcal{B}_k^\tau$ é o conjunto de ramos conectado ao nó k para a topologia τ .

$\mathcal{N}_{V\theta}$ é o conjunto de nós de referência ($V\theta$).

V_k^{esp} (θ_k^{esp}) é o valor especificado de V_k (θ_k).

Neste trabalho, a solução das restrições de igualdade associadas com o fluxo de potência é realizada através da técnica de varredura progressiva/regressiva baseada no Método de Soma de Correntes (SHIRMOHAMMADI, HONG, *et al.*, 1988).

iii) Restrição topológica de Radialidade

$$|\mathcal{B}^\tau| = N^{node} - |\mathcal{N}_{V\theta}| \quad (61)$$

Onde $|\mathcal{C}|$ denota a cardinalidade de um conjunto $\mathcal{C}$.

A partir de (51)-(61), pode-se concluir que o problema de RDS é um problema de otimização não-linear e combinatório, pois tem como variável de decisão a topologia τ que é de natureza discreta. Esta instância do problema de restauração pode ser solucionada de forma eficaz usando-se algoritmos de programação matemática (ROMERO, FRANCO, *et al.*, 2016; LÓPEZ, FRANCO, *et al.*, 2018). Contudo, a solução torna-se bastante complexa em sistemas de grande porte através de técnicas de programação matemática. Devido a isso, os métodos baseados nas meta-heurísticas possuem mais flexibilidade para modelar restrições complexas no problema de restauração (BROWN, 2009; BAHADOORSINGH, MILANOVIC, *et al.*, 2007; MARTINS e BORGES, 2011).

4.2. FORMULAÇÃO DA RESTAURAÇÃO PROBABILÍSTICA MULTIOBJETIVO (RPM)

Assim como na RDS, a RPM avalia a factibilidade de uma topologia τ com base nos valores médios (previstos) das cargas e das potências de saída da GDFV. Entretanto, estas variáveis são de natureza aleatória. Portanto, haverá flutuações significativas nas potências das cargas e dos GDFV, ao redor dos seus respectivos valores médios, que poderão causar violações nas restrições (55) e (56). Em outras palavras, há um risco de violar as restrições (55) e (56) mesmo quando não ocorram violações na topologia τ para os valores previstos da carga e da GDFV. Consequentemente, é necessário incluir uma componente de risco na função objetivo para minimizar a degradação da factibilidade da solução devido ao comportamento aleatório da carga e da GDFV. Esta componente do risco introduz uma característica multiobjetivo na restauração que será modelada utilizando uma estrutura Fuzzy (GUPTA, SWARNKAR, *et al.*, 2010). A necessidade desta estrutura é devido à incompatibilidade dimensional entre a potência ativa restaurada (kW) e o risco (%). A função de pertinência indica o grau de satisfação de cada função objetivo que compõe RPM. Ela consiste em um intervalo contendo valores mínimo e máximo, juntamente com uma função contínua monotônica para os diferentes objetivos (ESMAEILI, ESMAEILI e HOJABRI, 2016; GUPTA, SWARNKAR, *et al.*, 2010). Portanto,

tem-se as seguintes funções Fuzzy associadas com as componentes da função objetivo da RPM:

i) Potência Ativa Restaurada Total Expressa em Porcentagem da Potência Ativa Interrompida Total

$$\mu_{PAR}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.1 \\ (10x - 1)/8, & 0.1 \leq x \leq 0.9 \\ 1, & x \geq 0.9 \end{cases} \quad (62)$$

Onde:

$\mu_{PAR}(x)$ é a função Fuzzy associada com a Potência Ativa Restaurada (PAR). Foram definidos 10% e 90% como limites inferior e superior, respectivamente.

ii) Risco de Violação de Restrições de Tensão e/ou Carregamento

$$\mu_{RISCO}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0.05 \\ 2 - 20x, & 0.05 \leq x \leq 0.1 \\ 0, & x \geq 0.1 \end{cases} \quad (63)$$

Onde:

$\mu_{RISCO}(x)$ é a função Fuzzy associada com o risco de violação. Os limites inferiores e superiores foram definidos como 10% e 5%, respectivamente.

As funções Fuzzy (62) e (63) são ilustradas nas Figura 9 e 10, respectivamente.

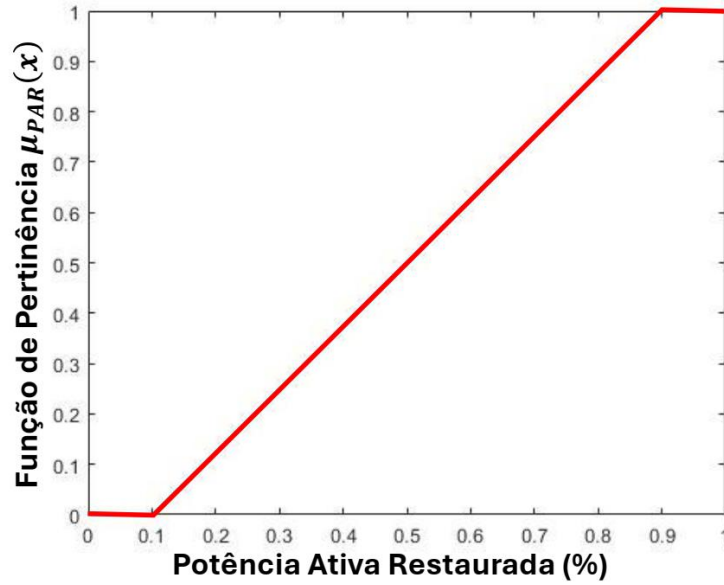


Figura 12 Função Fuzzy da PAR.

A partir de (62) e (63), tem-se a função de utilidade $\mu(x)$ para a RPM:

$$\mu(x) = \sqrt{\mu_{PAR}(x)\mu_{RISCO}(x)} \quad (64)$$

A RPM é realizada sujeita as mesmas restrições da RDS, isto é, o conjunto de restrições (52)-(61). Em outras palavras, a RDS e a RPM buscam obter uma topologia τ compatível para o caso base (carga e GDFV fixados nas suas médias) que maximize a PAR, mas apenas a RPM minimiza os riscos de violação.

4.3. SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO VIA BUSCA TABU

A Busca Tabu (BT) é uma abordagem meta-heurística que em sua forma mais simples utiliza uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração. No entanto, estruturas de BT mais complexas podem ser desenvolvidas usando outros operadores, como intensificação, diversificação, oscilação de

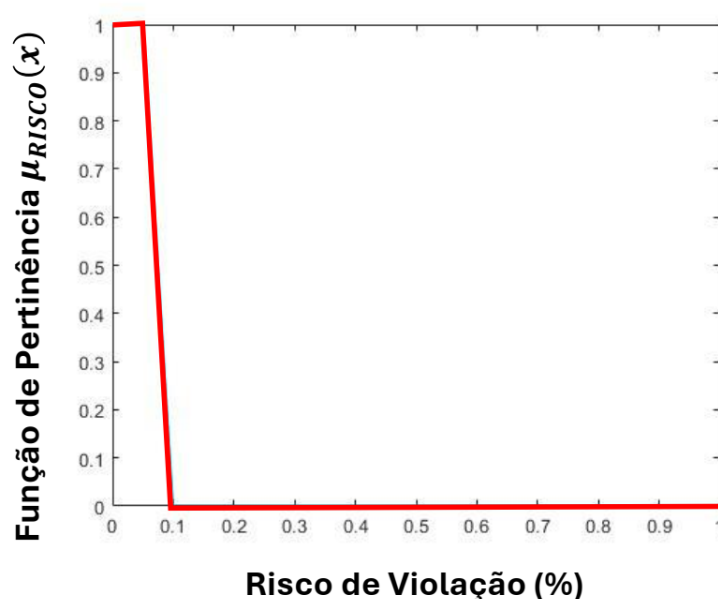


Figura 1013 Função Fuzzy do Risco.

estratégia e religação de caminhos, entre outros (FRANCO, LAVORATO, *et al.*, 2012).

O algoritmo de Busca Tabu foi introduzido por Fred Glover para resolver problemas de otimização combinatória (minimização ou maximização) e foi aplicado em várias áreas do conhecimento com resultados satisfatórios (GLOVER, 1989; GLOVER, 1990; GLOVER, LAGUNA e MARTI, 2007). A eficácia da BT está relacionada à sua estrutura de memória adaptativa chamada Lista Tabu (LT), uma lista gerida dinamicamente durante o processo de otimização que permite à meta-heurística escapar de mínimos locais e explorar amplamente o espaço de busca. A baixa dependência entre a solução inicial e a solução incumbente, assim como o pequeno número de parâmetros que precisam ser ajustados, são as principais vantagens da BT em comparação com outras meta-heurísticas (MATHIAS-NETO e MANTOVANI, 2016).

Por outro lado, a BT tende a exigir um alto tempo computacional para resolver problemas restritos em aplicações reais. Os altos tempos de processamento são principalmente atribuídos à geração e avaliação de vizinhanças sucessivas. Portanto, a definição de uma boa estrutura de vizinhança com características de diversificação (capacidade de explorar amplamente o espaço

de busca e escapar de mínimos locais) e intensificação (capacidade de realizar buscas nas áreas mais atraentes) é essencial para projetar algoritmos com bom desempenho (MATHIAS-NETO e MANTOVANI, 2016).

A Busca Tabu explora o espaço de soluções S indo de uma solução $s \in S$ a outra s' que esteja em sua vizinhança. Uma solução s é representada por um vetor binário n -dimensional, onde n é o número de ramos da rede, em que cada componente assume valor 1 se o ramo está fechado e 0, caso contrário. A vizinhança de s é definida como o conjunto de todas as configurações $s' \in N(s)$ que podem ser obtidas pela aplicação de um movimento de transição m a s , $s' \leftarrow s \oplus m$. O movimento de transição m consiste na inversão do valor de dois ou três bits da solução s . Após a definição dos estados vizinhos, é realizado o cálculo da função objetivo de cada estado. Com a função objetivo calculada para cada configuração candidata, os movimentos para se obter as soluções são avaliados. Verifica-se se os movimentos são tabu ou não, caso não seja, o movimento que gera a melhor solução é armazenado na Lista Tabu (LT). Esse movimento é considerado proibido durante um determinado número de iterações pré-estabelecido. Mesmo que um movimento seja tabu, existe a possibilidade dele ser permitido caso o valor de sua função objetivo seja melhor que o da solução ótima, condição de aspiração.

O algoritmo de Busca Tabu (MATHIAS-NETO e MANTOVANI, 2016; PEREIRA JR, COSSI e MANTOVANI, 2012) usado para a RDS e RPM é ilustrado no Fluxograma da Figura 11.

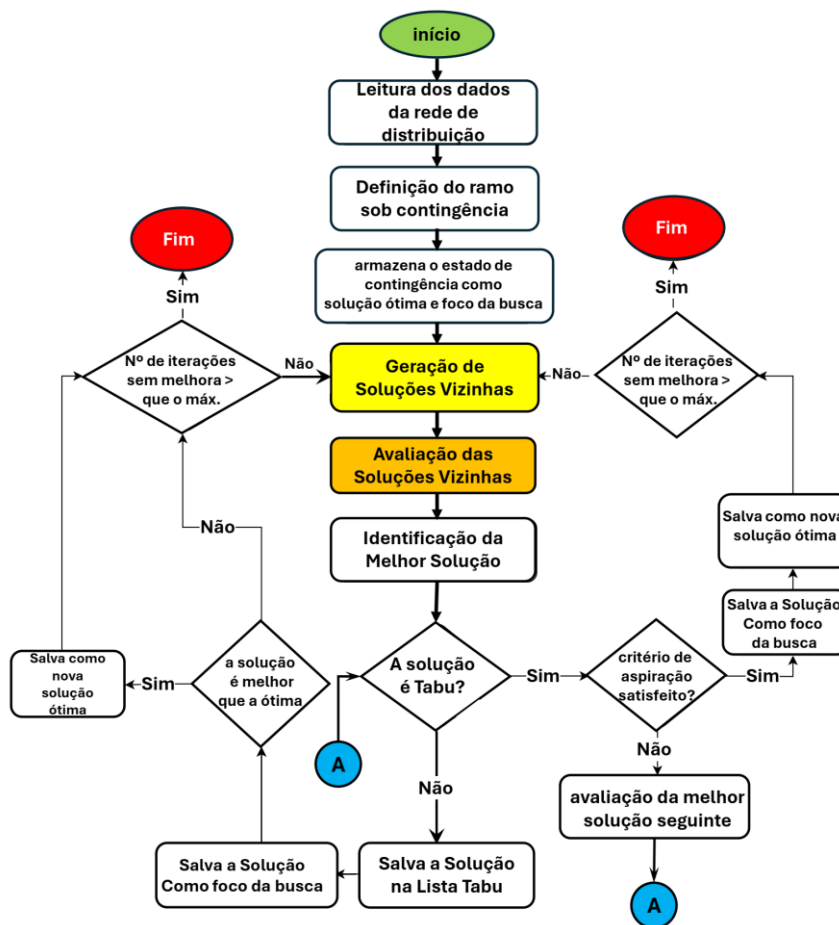


Figura 14 Fluxograma do algoritmo de Busca Tabu usado na RPM e na RDS.

É importante comentar os seguintes aspectos associados com este fluxograma:

i) A geração de soluções vizinhas (bloco amarelo) é realizada de acordo com o método de intercâmbio de ramos proposto por (BARAN e WU, 1989).

ii) Após a definição da contingência de interesse, cria-se ramos e nós fictícios para viabilizar o corte de carga durante a restauração, isto é, pontos de carga que permanecerão desconectados dos pontos de fornecimento após a reconfiguração da rede elétrica. Essa estratégia consiste em uma subestação fictícia que pode ser conectada a cada nó de carga por meio de circuitos fictícios que estão inicialmente abertos. Isso torna possível encontrar soluções

ótimas nas quais o sistema restaurado apresenta uma topologia radial, mantendo o estado inicial dos ramos fechados na seção não restaurada (SOUZA, ROMERO e FRANCO, 2018). Esta rede fictícia também satisfaz a restrição de radialidade (61) para permitir a reconfiguração. Sem a subestação fictícia, manobras desnecessárias dos seccionadores poderiam ocorrer na parte não restaurada do sistema elétrico para satisfazer a condição (61). Portanto, a subestação fictícia e os circuitos artificiais garantem que a parte não restaurada do sistema forme uma topologia radial com a subestação fictícia e alguns circuitos artificiais, e que o estado operacional dos ramos na parte não restaurada do sistema não mude (ROMERO, FRANCO, *et al.*, 2016).

Tomando como exemplo ilustrativo o sistema da Figura 12-A, tem-se uma falta localizada logo após o disjuntor da subestação 2. Após a atuação da proteção (disjuntor 2), o alimentador 2 fica desenergizado. Em uma iteração da Busca Tabu, a solução vizinha candidata que restaura a maior quantidade de carga seria a abertura chave 3 e fechamento da chave 5, Figura 12-B. No entanto, essa solução pode causar violações operacionais. Então, a partir dessa solução, pode-se gerar um novo vizinho candidato com a chave 4. Esta pode ser aberta, diminuindo a quantidade de carga transferida para o alimentador 1. A solução com alívio de carga pode ser vista na Fig. 12-C. Como resultado, duas partes não restauradas são formadas pela CH6 e CH7. A subestação fictícia possibilita a formação de uma topologia radial conectando essas duas partes através de dois circuitos artificiais. Dessa forma, o algoritmo da Busca Tabu transita por mais vizinhos, aumentando a possibilidade de localizar melhores soluções.

iii) A avaliação das soluções vizinhas no bloco laranja é cavalo de força do algoritmo, pois neste bloco executa-se o probabilístico para calcular a função objetivo.

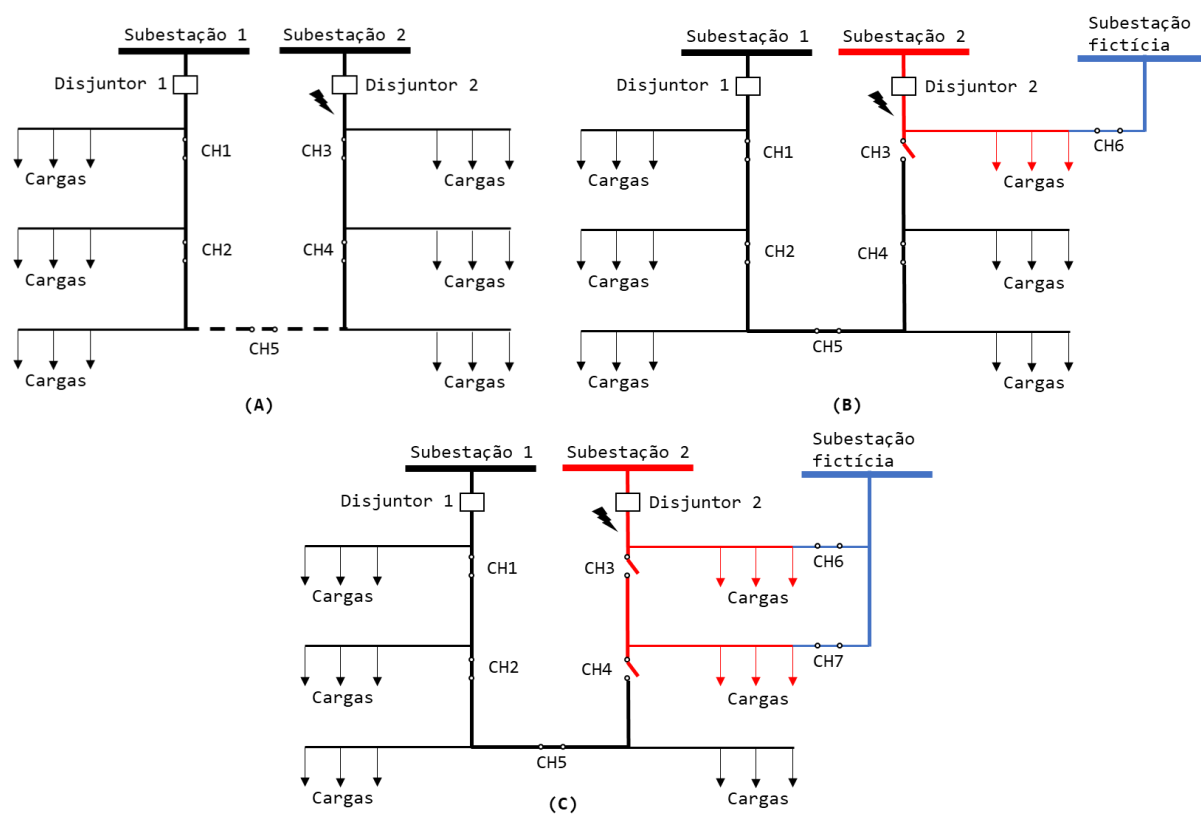


Figura 15 Sistema ilustrativo do alívio de carga.

5. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes obtidos com a metodologia de restauração proposta para redes de distribuição sob incerteza. Inicialmente, será apresentada uma descrição resumida do sistema teste e a especificação dos casos de estudo. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos com aplicação da metodologia proposta no sistema-teste. Estes resultados estão divididos em duas partes: características de convergência da Busca Tabu e índices de desempenho determinísticos e probabilísticos referentes a restauração otimizada sob incerteza.

5.1. SISTEMA TESTE E CASOS DE ESTUDO

A RPM foi testada na Rede de Distribuição de 54 barras (RD54) proposta por (PEREIRA JR, COSSI e MANTOVANI, 2012). Os principais dados da RD54 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Dados da RD54.

No. de Subestações	3
No. de Alimentadores	6
Carga Ativa Total (kW)	45668,7
Carga Reativa Total (kVAr)	22118,2
No. de GDFV	6
Capacidade total da GDFV	9133,7
Número de ramos	61

O diagrama unifilar da RD54 é apresentado na Figura 13.

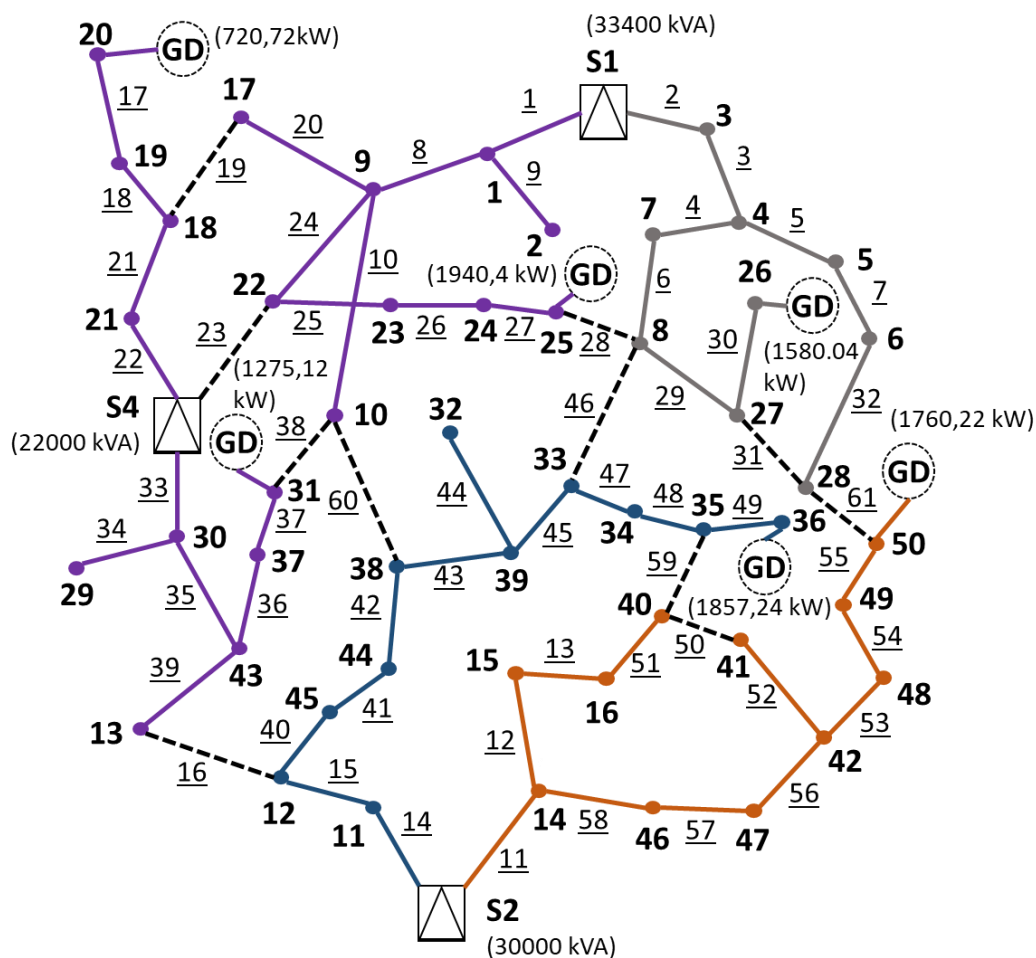


Figura 16 Diagrama Unifilar da RD54.

Os estudos de restauração na RD54 foram realizados considerando-se dois casos de estudo:

- i) RDS: incertezas na carga e na GDFV são ignoradas. Desta forma, as potências cargas e da GDFV são fixadas nos seus respectivos valores médios. Além disso, a função objetivo da restauração é apenas a maximização da potência ativa restaurada. Após a RDS ser realizada, executa-se um FPP para a solução ótima considerando-se incertezas na carga (EPM=3% e EPM=50%) e na GDFV para se determinar o risco de violação de restrições na topologia pós-restauração.

- ii) RPM: restauração considerando incertezas na carga e na GDFV através do FPP. Adicionalmente, a função objetivo possui duas componentes: uma associada com a maximização da potência ativa e outra referente ao risco de violação.

Estes casos de estudo foram analisados sob as seguintes hipóteses:

- i) O intervalo admissível para as tensões nodais é $[0.95, 1.05]$ pu.
- ii) Os parâmetros α e β da distribuição beta que modela a radiação solar são iguais a 2.06 e 2.5, respectivamente.
- iii) Há uma GDFV instalada em cada alimentador da RD4. A capacidade da GDFV de cada alimentador é igual a 20% da carga total de cada alimentador. Os locais de instalação e as capacidades da GDFV nos alimentadores são mostrados na Figura 13.
- iv) O número n de seções idênticas para a discretização das variáveis aleatórias contínuas no Método do Hipercubo Latino é igual a 10.000.
- v) O número máximo de iterações sem melhora na busca Tabu é 5.
- vi) As metodologias RDS e RPM foram analisadas considerando-se as contingências nos ramos especificadas na Tabela 2, onde a terceira coluna apresenta as potências ativas totais das cargas interrompidas.

Tabela 2 Contingências de interesse.

Ramo	Nós Desenergizados	Carga (kW)
#2	3,4,5,6,7,8,26,27,28	7900,2
#14	11,12,32,33,34,35,36,38,39,44,45	9286,2
#11	14,15,16,40,41,42,46,47,48,49,50	8801,1

- vii) Os algoritmos da RDS e RPM foram implementados usando-se a linguagem de programação C++ no compilador CodeBlocks versão

20.03. Utilizou-se um notebook com 8GB de memória RAM, processador i5 de oitava geração de 1,80Hz e sistema operacional Windows 10.

5.2. RESULTADOS ASSOCIADOS COM OS CASOS DE ESTUDO

A Figura 14 apresenta a característica de convergência da Busca Tabu nos casos de interesse. A Tabela 3 mostra os seguintes índices de desempenho para as contingências de interesse considerando a RDS: PAR em kW e porcentagem e o risco de violação em porcentagem. Adicionalmente, esta tabela apresenta os tempos de CPU e o números de iterações requeridos pela Busca Tabu para obter as soluções ótimas. A partir desta tabela, pode-se concluir que a Busca é capaz de restaurar parcelas significativas da carga total interrompida. Contudo, os riscos de violação calculados na solução ótima da RDS são bastante elevados, principalmente para os casos nos quais as cargas são modeladas como pseudo-medidas. Estes resultados evidenciam claramente a degradação da factibilidade da solução ótima quando as incertezas são ignoradas na solução do problema de restauração.

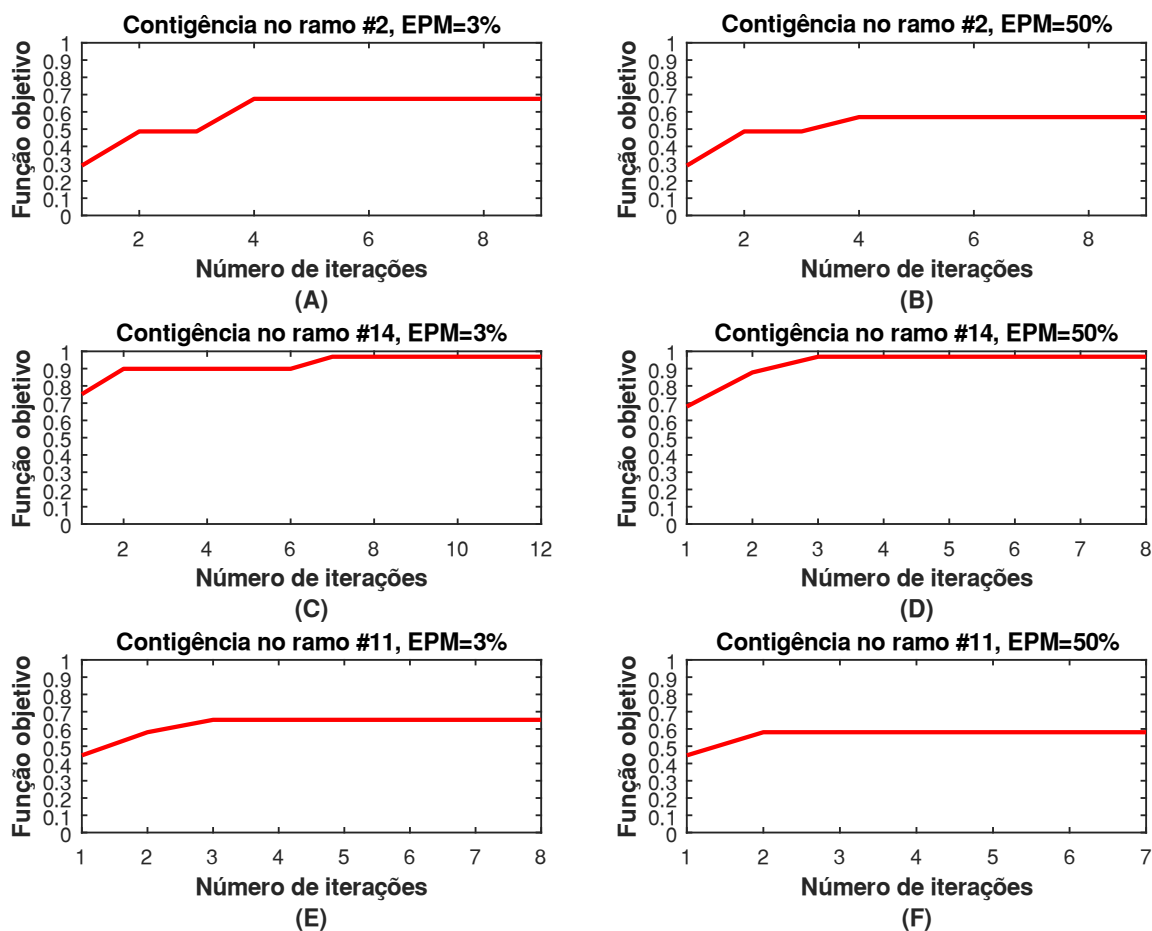


Figura 17 Gráficos da característica de convergência da Busca Tabu.

Tabela 3 RDS para as contingências de interesse.

Índice	Contingência		
	#2	#14	#11
PAR (kW)	4851	9078	4573,8
PAR (%)	61,40	97,76	51,96
Risco (%) / EPM=3%	43,28	6,79	10,23
Risco (%) / EPM=50%	51,14	76,64	99,40
Tempo (seg.)	0,056	0,057	0,072
Nº de iterações	8	4	8

As Tabelas 4, 5 e 6 mostram os índices PAR, o risco de violação e a Relação Benefício/Custo (RBC) para as contingências considerando a RPM. Além disso, são apresentados nestas tabelas os tempos de CPU e o números de iterações requeridos pela Busca Tabu para obter as soluções ótimas. Os números entre parênteses dentro de cada célula destas tabelas são as variações percentuais nos índices da RMP com relação a RDS. Estas variações são utilizadas no cálculo da RBC. A RBC é definida pelo quociente entre a redução relativa no risco de violação obtida pela RPM e a sua respectiva redução relativa na PAR. Ambas as reduções usadas no cálculo da RCB são calculadas com relação a RDS. Se a RBC é superior a unidade, então a RPM é eficaz, pois os seus benefícios superam as suas perdas.

Tabela 4 RPM para a contingência no ramo #2.

Índice	EPM=3%	EPM=50%
PAR (kW)	3672,9 (24.2834%)	2841,3 (41.4332%)
PAR (%)	46,49 (24.2834%)	35,96 (41.4332%)
Risco (%)	3,62 (91.6359%)	1,60 (96.8713%)
RBC	3.7736	2.3380
Tempo (seg.)	291,737	298,135
Nº de iterações	9	9

Tabela 5 RPM para a contingência no ramo #14.

Índice	EPM=3%	EPM=50%
PAR (kW)	7900,2 (12.9808%)	7900,2 (12.9808%)
PAR (%)	85,07 (12.9808%)	85,07 (12.9808%)
Risco (%)	1,30 (80.8542%)	1,76 (97.7035%)
RBC	6.2288	7.5268
Tempo (seg.)	564,428	456,854
Nº de iterações	12	8

Tabela 6 Índices para a contingência no ramo #11.

Índice	EPM=3%	EPM=50%
PAR (kW)	3880,8 (15.1463%)	3257,1 (28.7721%)
PAR (%)	44,09 (15.1463%)	37,01 (28.7721%)
Risco (%)	1,08 (89.4428%)	1,65 (98.34%)
RBC	5.9053	3.4179
Tempo (seg.)	347,554	331,203
Nº de iterações	8	7

A partir das Tabelas 4, 5 e 6 pode-se observar que a RPM obteve menores percentuais de PAR com relação a RDS. Por exemplo, a maior redução na PAR obtida pela RPM foi de 41.4332% para a contingência no ramo #2 com EPM de 50%. Este resultado é esperado visto que a RDS maximiza apenas PAR enquanto a RPM otimiza a PAR e o risco de violação. Contudo, há uma redução severa no risco de infactibilidade das soluções ótimas geradas pela RPM. Por exemplo, a mínima redução no risco de violação foi de 80.8542% para a contingência no ramo #14 com EPM de 3%. Além disso, as RBC obtidas pela RPM são todas maiores que a unidade. Consequentemente, pode-se concluir que a RPM é eficaz, pois as reduções nos riscos de violações (benefícios) superam as reduções na PAR (perda de qualidade na solução ótima).

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma metodologia de restauração probabilística multiobjetivo que minimiza os riscos de violações nas restrições e maximiza a potência ativa restaurada via reconfiguração. A metodologia proposta se baseou na combinação das seguintes técnicas para otimizar estes critérios: fluxo de potência probabilístico via Hipercubo Latino para modelar incertezas na carga e GD fotovoltaica, Busca Tabu para realizar a reconfiguração orientada a restauração e funções Fuzzy para a otimização multicritério. Os testes em uma rede de distribuição de 54 demonstraram que a restauração determinística degrada o risco de factibilidade na topologia ótima. Contudo, a restauração probabilística multiobjetivo reduz a deterioração deste risco e consegue obter montantes significativos de potência ativa restaurada.

Estes resultados motivam a expansão do método proposto para incluir os seguintes aspectos da restauração:

- i) formação de microrredes no processo de reconfiguração orientada a restauração;
- ii) modelagem da rede em coordenadas de fase para representar a natureza desequilibrada da rede de distribuição;
- iii) despacho das equipes e tempo disponível para a sequência de manobras;
- iv) aplicação de outras meta-heurísticas (por exemplo, os Algoritmos Genéticos e a Entropia Cruzada) para solucionar o problema de reconfiguração orientado a restauração com o objetivo de aumentar a qualidade das soluções ótimas;
- v) Avaliação do impacto dos modelos de carga (polinomial ou exponencial) nos riscos de violação das restrições;
- vi) Representação de dispositivos de controle de tensão (reguladores de tensão, transformadores com comutação de tap sob carga e suporte de potência reativa dos geradores distribuídos) no problema de restauração;

- vii) Aplicação de métodos probabilísticos alternativos (tais como, a entropia cruzada e a estimação por pontos) para a estimação dos riscos de violação de restrições técnicas com maior redução nos tempos de CPU.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A.; SHABAN, K. B. Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: A step to a smarter grid. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, p. 3959-3967, 2018.

ALLAN, R. N.; LEITE DA SILVA, A. M.; BURCHETT, R. C. Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions. **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 5, May 1981.

ANDERS, G. J. **Probability Concepts in Electric Power Systems**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1990.

ARJOMANDI-NEZHAD, A. et al. A Robust MPC Method for Post-Disaster. **17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)**, Manchester, 2022.

BAHADOORSINGH, S. et al. Minimization of voltage sag costs by optimal reconfiguration of distribution network using genetic algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 4, p. 2271-2278, 2007.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss re-duction and load balancing. **IEEE Trans. Power Delivery**, p. 1401-1407, 1989.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Power Systems**. 2^a. ed. New York: Springer, 1996.

BILLINTON, R.; LI, W. **Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods**. New York: Springer, 1994.

BROWN, E. R. **Electric Power Distribution Reliability**. 2^a. ed. New York: CRC Press, 2009.

CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; BARRUNCHO, L. M. F. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. **Elect. Power Energy Syst.**, v. 29, p. 222-229, 2007.

CHAGAS, E. A.; RODRIGUES, A. B.; SILVA, M. G. Probabilistic Power Flow for Power Quality Assessment of Islanded Microgrid. **IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)**, p. 1-6, 2018.

CHEN , P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Probabilistic load flow: A review. **Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**, p. 1586-1591, 2008.

CIRIC, R. M.; POPOVIC, D. S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method. **Elect. Power Energy Syst.**, v. 222, p. 497-505, 2000.

CURCIC, S. et al. Electric power distribution network restoration: a survey of papers and a review of the restoration problem. **Electric Power Systems Research**, v. 35, p. 73-86, 1996.

ESMAEILI, A.; ESMAEILI, S.; HOJABRI, H. Short-circuit level control through a multi-objective feeder reconfiguration using fault current limiters in the presence of distributed generations. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 14, p. 3458-3469, 2016.

FRANCO, J. et al. An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1-8, 2012.

GALLOTTI, V. D. M. Intelligent electric power networks (Smart Grids). **Research, Society and Development**, v. 10, 2021. ISSN 2525-3409.

GERG, J. M. **Distribution System Analysis and Automation**. 1^a. ed. London: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2013. 141-153 p.

GLOVER, F. Tabu search—Part I. **ORSA Journal on Computing**, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989.

GLOVER, F. Tabu search—Part II. **ORSA Journal on Computing**, v. 2, n. 1, p. 4–32, 1990.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTI, R. **Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics**. 1^a. ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2007.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Meta-heurísticas: Algoritmos e Aplicações**. [S.l.]: Elsevier, 2016.

GUPTA, N. et al. Multi-objective reconfiguration of distribution systems using adaptive genetic algorithm in fuzzy framework. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 4, p. 1288 – 1298, December 2010. ISSN 1751-8695.

HEYDT, G. T. The Next Generation of Power Distribution Systems. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2010. 225-235.

HSU, Y. Y. et al. Distribution system service restoration using a heuristic search approach. **Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society**, 1991. 639-645.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E.. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1^a. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2005.

KUMAMOTO, H.; HENLEY, E. J. **Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers**. 2^a. ed. [S.l.]: IEEE Press, 1996.

KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. **IEEE Trans. on Power Del.**, v. 23, p. 261-270, 2008.

LEE, H. -J.; PARK, Y. -M. A restoration aid expert system for distribution sub-stations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, p. 1765-1770, 1996.

LI, J.; KHODAYAR, M. E.; FEIZI, M. R. Hybrid Modeling Based Co-Optimization of Crew Dispatch and Distribution System Restoration Considering Multiple Uncertainties. **IEEE Systems Journal**, March 2022. 1278-1288.

LI, W. et al. A Full Decentralized Multi-Agent Service Restoration for Distribution Network With DGs. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 11, p. 1100-1111, March 2020.

LIU, C. C.; LEE, S. J.; VENKATA, S. S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 3, p. 619-626, 1988.

LÓPEZ, J. C. et al. Optimal Restoration/Maintenance Switching Sequence of Unbalanced Three-Phase Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 6, p. 6058-6068, 2018.

MARTINS, V. F.; BORGES, C. L. T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 4, p. 2164-2172, 2011.

MATHIAS-NETO, W. P.; MANTOVANI, J. R. S. A Node-Depth Encoding-Based Tabu Search Algorithm for Power Distribution System Restoration. **J Control Autom Electr Syst**, v. 27, p. 317-327, 2016.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1983.

MOREIRA, E. et al. Linear Probabilistic Power Flow for Islanded Microgrids. **International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)**, p. 1-6, 2020.

OLIVEIRA, J. P.; RODRIGUES, A. B.; SILVA, M. G. Probabilistic evaluation of voltage control and reactive power techniques with photovoltaic distributed-generation. **Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**, p. 1-6, 2018.

OLSSON, A.; SANDBERG, G.; DAHLBLOM, O. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis. **Structural Safety**, v. 25, p. 47-68, 2003. ISSN 0167-4730.

PEREIRA JR, B. R.; COSSI, A. M.; MANTOVANI, J. R. S. Proposta de uma metodologia baseada em busca tabu para restauração automática de

sistemas de distribuição de energia elétrica. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012), 2-6 de Setembro de 2012**, Campina Grande - PB, p. 1204-1211, 2012.

PRUSTY, B. R.; JENA, D. A critical review on probabilistic load flow studies in uncertainty constrained power systems with photovoltaic generation and a new approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 1286-1302. ISSN 1364-0321.

RAMADHANI, U. H. et al. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 120, 2020.

RAPOSO, A. A. M.; RODRIGUES, A. B.; SILVA, M. G. Hybrid probabilistic method to model measurement failures in the accuracy assessment of state estimator in smart grids. **Int Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 31, 2021.

ROMERO, R. et al. A New Mathematical Model for the Restoration Problem in Balanced Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, p. 1259-1268, 2016.

SARKAR, S.; AJJARAPU, V. MW Resource Assessment Model for a Hybrid Energy Conversion System With Wind and Solar Resources. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 2, n. 4, p. 383-391.

SHEN, F. et al. Review of Service Restoration Methods in Distribution Networks. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)**, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, 2018. 1-6.

SHIRMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 7, p. 952-958, 1992.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753 – 762, 1988.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. 2^a. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

SINGH, R.; PAL, B. C.; VINTER, R. B. Measurement Placement in Distribution System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 2, p. 668-675, 2009.

SOUZA, E.; ROMERO, R.; FRANCO, J. Restoration of Electrical Distribution Systems Using a Relaxed Mathematical Model. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 29, p. 259-269, 2018.

STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2^a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

SUDHAKAR, T. D.; SRINIVAS, K. N. Restoration of power network - a bibliographic survey. **Euro. Trans. Electr. Power**, v. 21, p. 635-655, 2011.

TOUNE, S. et al. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. **IEEE Trans. on Power Del.**, v. 17, p. 173-181, 2002.

WANG, F. et al. Service restoration for distribution network with DGs based on stochastic response surface method. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 107, p. 557-568, 2019. ISSN 0142-0615.

WANG, G. et al. A Comprehensive Network Restoration Model for Active Distribution Network Considering Forecast Uncertainty. **IEEE Access**, v. 9, p. 130997-131005, 2021.

WANG, X.; SONG, Y.; IRVING, M. **Modern Power Systems Analysis**. New York: Springer, 2008.

WILLIS, H. L.; SCOTT, W. G. **Distributed Power Generation Planning and Evaluation**. New York: Marcel Dekker, 2002.

YU, H. et al. Probabilistic Load Flow Evaluation With Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, p. 661-667, May 2009.

ZHANG, S. et al. Probabilistic Evaluation of Available Load Supply Capability for Distribution System. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 3, p. 3215-3225, 2013.

ZOU, K. et al. Distribution System Restoration With Renewable Resources for Reliability Improvement Under System Uncertainties. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, p. 8438-8449, October 2020.