

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WILLIAM MENEZES JUNQUEIRA DA SILVA

**ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO**

PORTO ALEGRE

2013

WILLIAM MENEZES JUNQUEIRA DA SILVA

**ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO**

**Projeto de Diplomação submetido ao
Departamento de Engenharia elétrica
da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos

PORTO ALEGRE

2013

WILLIAM MENEZES JUNQUEIRA DA SILVA

**ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO**

Este projeto de diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos (Orientador)

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin (Coordenador)

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos – UFRGS _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas – UFRGS _____

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner – UFRGS _____

Aos meus pais,
Edison e Ângela

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul como um todo por esta oportunidade de engrandecimento intelectual proporcionada pelo corpo docente, pelo ambiente acadêmico provocativo e questionador, pelos colegas e grandes amizades que criei e certamente cultivarei para todo o sempre.

Agradeço a todos que passaram por minha vida durante esta trajetória que me proporcionaram evoluir como homem, como pessoa, e como cidadão que está prestes a oferecer sua força de trabalho à serviço do bem estar das pessoas.

Agradeço à minha família pelo suporte oferecido por todos estes anos e sobretudo por me fazerem acreditar que a educação é uma ferramenta poderosa de transformação não só para um indivíduo, mas para uma sociedade. Estejam certos de que estes ensinamentos serão difundidos e propagados vigorosamente para as próximas gerações.

A imaginação é mais importante que o conhecimento.

Albert Einstein

RESUMO

Atualmente os sistemas elétricos de distribuição apresentam uma acentuada expansão e aumento na complexidade da operação. Este nível de complexidade é maior a medida que aumenta o número de equipamentos e plantas de operação distribuída conectadas à rede. Entretanto, os defeitos na rede, sejam eles causados por uma vasta sorte de fatores, provocam a interrupção do fornecimento de energia. Os dispositivos de proteção são fundamentais para manter a integridade dos equipamentos instalados na rede e para que eventuais acidentes não aconteçam. O avanço da microeletrônica e o crescimento da automação em redes de distribuição, isto é, a presença de dispositivos inteligentes no sistema permite a implementação de sistemas capazes de operarem de forma autônoma, ou assistida, agilizando, facilitando, ou até auxiliando a tomada de decisões dos seus operadores. O referido projeto de diplomação tem como objetivo apresentar um algoritmo computacional de isolamento de faltas em sistemas de distribuição considerando a presença de redes inteligentes. O algoritmo tem como função retornar um plano de manobras contendo a configuração ótima de operação que atenda o isolamento da falta e as restrições de operação do sistema. Não é escopo do trabalho realizar a reconfiguração do sistema para restabelecimento do fornecimento de energia. Neste trabalho foram feitos testes em sistemas padrão do IEEE, com as simulações sendo feitas em sistemas de 4, 13 e 123 nós. Os testes se baseiam na atribuição de um índice que indica a provável localização de falta elétrica denominado grau de confiança às porções da rede entre chaves manobráveis. De acordo com os testes realizados, o algoritmo retorna um plano de manobras satisfatório que contempla o isolamento marginal completo da porção faltosa considerando-se as situações que se discutem ao longo do texto.

Palavras-chave: Falta Elétrica, Isolamento, Redes de Distribuição.

ABSTRACT

Nowadays electrical distribution systems present a marked expansion and increased complexity of the operation. This level of complexity is larger as the number of devices and distributed operation of plants connected to the network increases. Faults in network, whether caused by wide array of factors, cause the interruption of power supply. The protection devices are critical to maintaining the integrity of installed equipments in the network and to avoid accidents to occur. The advancement and growth of microelectronics automation of distribution networks, i.e., the presence of smart devices in the system enables the implementation of systems capable of operating autonomously, or assisted, streamlining, facilitating, or even aiding the decision making of its operators. The referred graduation project aims to present an algorithm for fault isolation in distribution systems considering the presence of smart grids. The algorithm has the function to return a list of maneuver plan containing the optimal operating configuration that may match the fault isolation and restrictions on the operation system. Accomplish the system reconfiguration to reestablish the power supply is not part of the scope of this work. In this work, tests were done in standard IEEE systems, with simulations being done at 4, 13 and 123 node systems. The tests are based on assigning a probability index that indicates the probable location of an electrical fault termed degree of confidence to the portions of the network between maneuverable switches. According to the tests, the algorithm returns a satisfactory maneuver plan that includes the full marginal isolation of faulty portion considering the situations that are discussed throughout the text.

Keywords: Electrical Fault, Isolation, Smart Grids.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de eventos de faltas em linhas de transmissão da rede CEMIG/MG.....	15
Figura 2 - Exemplo de diagrama unifilar de um alimentador trifásico	23
Figura 3 - Religador instalado em rede de distribuição aérea	24
Figura 4 – Chave fusível com abertura programável	26
Figura 5 - Exemplo de grafo	30
Figura 6 - Exemplo de grafos do tipo árvore	32
Figura 7 - Sequência de visitas para os métodos de busca em largura e profundidade	33
Figura 8 - Diagrama simplificado do diagnóstico de faltas	37
Figura 9 - Representação dos blocos de carga de uma rede de distribuição	40
Figura 10 - Representação dos blocos de carga hipotéticos que devem ser isolados.....	43
Figura 11 - Sistema teste de 4 nós.....	47
Figura 12 - Sistema teste de 4 nós modelado	47
Figura 13 - Sistema teste de 13 nós.....	48
Figura 14 - Sistema teste de 13 nós modelado	49
Figura 15 - Sistema teste de 123 nós	50
Figura 16 - Sistema de 123 nós modelado	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos blocos de carga do sistema de 4 nós	48
Tabela 2 - Status de chaves para o sistema de 4 nós	48
Tabela 3 - Dados dos blocos de carga do sistema de 13 nós	49
Tabela 4 - Status de chaves para o sistema de 13 nós.....	50
Tabela 5 - Dados de blocos de carga do sistema de 123 nós.....	52
Tabela 6 - Status de chaves para o sistema de 123 nós	52

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Elétrica de Minas Gerais
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
GC	Graus de Confiança
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LGC	Limiar de Grau de Confiança
NA	Chave Seccionadora Normalmente Aberta
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NF	Chave Seccionadora Normalmente Fechada
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PLC	<i>Power Line Communication</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3	DEFINIÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	20
3.1	SUBESTAÇÕES	21
3.2	ALIMENTADORES.....	22
3.2.1	Religadores	24
3.2.2	Chaves Seccionadoras	25
3.3	CADASTRO TÉCNICO	27
4	REVISÃO SOBRE GRAFOS	29
4.1	REPRESENTAÇÃO	29
4.2	DEFINIÇÕES	31
4.3	MÉTODOS DE BUSCA	32
5	O PROBLEMA DE ISOLAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO ..	34
5.1	COMO O PROBLEMA É RESOLVIDO?	35
5.2	MODELAGEM DO PROBLEMA	38
5.2.1	Tratamento em Grafos	40
5.2.2	Método de busca abrangente	40
5.3	METODOLOGIA	42
6	RESULTADOS	45
6.1	TESTE COM SISTEMA DE 4 NÓS	47
6.2	TESTE COM SISTEMA DE 13 NÓS	48
6.3	TESTE COM SISTEMA DE 123 NÓS	50
6.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
7	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

APÊNCIDE A – FLUXOGRAMAS DO ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS	58
APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE EM C++ DO ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS	60

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica são sistemas complexos e que contém inúmeros elementos e dispositivos interligados destinados a entregar um bem por meio de um serviço que já é indispensável para a vida das pessoas. A vida nos grandes centros urbanos está totalmente vinculada à utilização da energia elétrica. Não é mais possível imaginar estes grandes aglomerados urbanos operando de forma funcional sem a energia elétrica.

O funcionamento de serviços essenciais depende diretamente da disponibilidade desta energia que é fornecida pelas concessionárias e empresas de distribuição. A operação de hospitais, serviços de distribuição e tratamento de água, telecomunicações, transporte e deslocamento são alguns dos exemplos de serviços urbanos estratégicos para o funcionamento regular de um centro urbano que absorve um número crescente de pessoas a cada dia que passa. Outras demandas menos cruciais de conforto, lazer e entretenimento também são beneficiadas pela utilização de energia elétrica

Entretanto, estas demandas provocam dependências igualmente crescentes. Uma vez que o serviço para fornecimento de energia elétrica é oferecido aos consumidores, a empresa contratada se responsabiliza a fornecer energia de forma que os consumidores a consumam de forma satisfatória. Isto implica basicamente na não interrupção do fornecimento da energia, e que esta energia seja utilizada sem que os equipamentos eletroeletrônicos sejam danificados. Para que estas prerrogativas básicas sejam satisfeitas, foram criados mecanismos legais controlados por agências regulatórias obrigando as empresas a fornecerem de forma qualificada o produto e o serviço que oferecem. O Módulo 8 do documento PRODIST da ANEEL regulamenta os requisitos necessários para que esta energia seja entregue de forma satisfatória ao consumidor. Este módulo tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

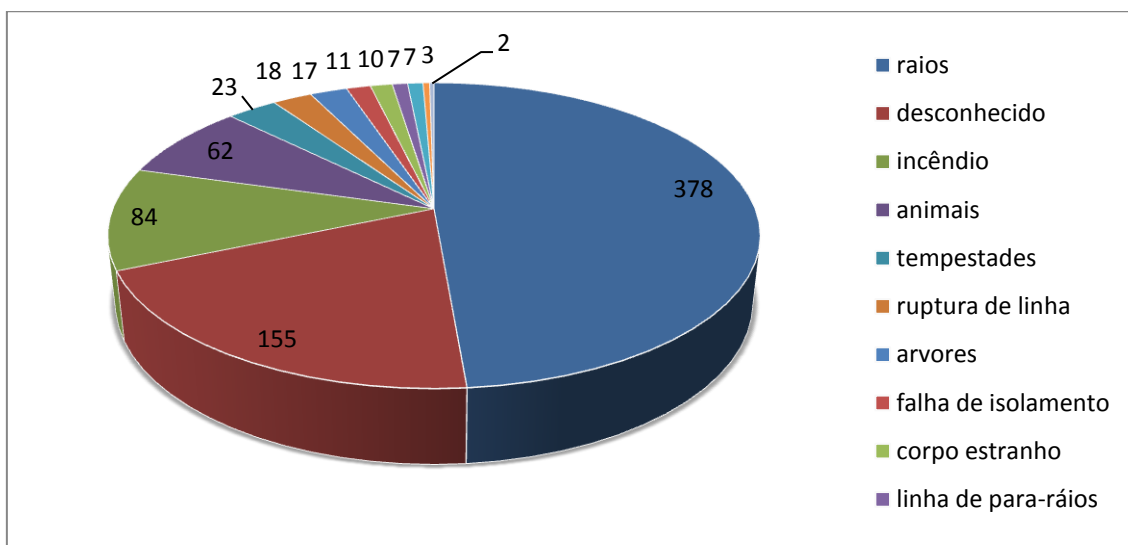
Segundo este documento, a determinação de qualidade caracteriza os fenômenos de QEE, no qual se estabelece critérios de amostragem, valores de referência e procedimentos relativos à qualidade do produto em questão,

considerando parâmetros de qualidade em regime permanente ou transitório, dentre os quais estão os níveis de tensão, fator de potência, nível de harmônicos na rede, desequilíbrios, flutuações e variações de tensão e frequência. Quanto às interrupções de fornecimento, determina-se que elas sejam evitadas ao máximo, objetivando-se estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, pelas transmissoras detentoras de demais instalações de transmissão aos consumidores e distribuidoras, fornecer mecanismos para acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, e oferecer aos consumidores parâmetros para avaliação do serviço prestado pela distribuidora.

A empresa concessionária, uma vez provedora do produto e do serviço, se responsabiliza por cumprir todos os requisitos necessários a fim de que seu consumidor possa usufruir da energia entregue conforme a normalidade. Se a qualidade do produto e do serviço for afetada por qualquer que seja o motivo, a empresa é penalizada por aplicação de multas em detrimento do não cumprimento dos requisitos de qualidade.

Sabe-se que uma rede de distribuição, assim como qualquer sistema ou dispositivo eletroeletrônico não está livre da ocorrência de falhas. A natureza das falhas é numerosa e, embora afetem diretamente o sistema, nem sempre estão totalmente vinculadas a ele. Intempéries da natureza e fenômenos antrópicos são grandes responsáveis pela ocorrência de faltas em sistemas elétricos de potência. Oliveira (et. al., 2010) faz um estudo de análise das principais causas de faltas elétricas na rede de transmissão da CEMIG/MG. Embora os dados sejam referentes a um sistema de potência de transmissão, eles têm o intuito de apresentar algumas das causas diversas que podem provocar faltas elétricas. Os dados estatísticos de ocorrência de faltas apresentados são classificados em relação à causa (Figura 1). Descargas atmosféricas foram responsáveis pela maior parte das falhas, com 48,6% dos casos (378 de 777 casos analisados). Outras causas frequentes são raras dependendo da região que se trata.

Figura 1 - Gráfico de eventos de faltas em linhas de transmissão da rede CEMIG/MG



Fonte: OLIVEIRA, 2010

Ao se confirmar um evento de falta elétrica, a empresa é responsável por controlar parâmetros para avaliar a qualidade do serviço prestado e desempenho do sistema elétrico. Por meio de um controle de interrupções, dos cálculos e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço, as distribuidoras, consumidores e ANEEL podem fazer esta avaliação. Dois indicadores relevantes para a avaliação do serviço são os indicadores de DEC, e FEC. São calculados respectivamente conforme descrevem as Equações (1) e (2).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i).t(i)}{Cc} \quad (1)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i)}{Cc} \quad (2)$$

onde $Ca(i)$ corresponde ao número de unidades consumidoras, atendidas em baixa tensão ou média tensão, interrompidas em um evento (i), no período de apuração, $t(i)$ corresponde à duração de cada evento (i) no período observado, i é o índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras, k é o número máximo de eventos no período considerado, e Cc é o número total de unidades consumidoras faturadas, do conjunto considerado, no período de apuração, atendidas em baixa e média tensão.

Dos indicadores de continuidade individual, cita-se os índices DIC e a FIC que são expressos pelas Equações (3) e (4).

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (3)$$

$$FIC = n \quad (4)$$

onde $t(i)$ representa o tempo de duração da interrupção (i), i representa o índice de interrupções, e n representa o número de interrupções, todos estes referentes à unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período apurado.

Existem situações em que a apuração destes índices não deve ser considerada. Para os indicadores equivalentes e individuais, desconsideram-se situações quando houver interrupção programada para manutenção, vinculadas a regimes de racionamento e redução de carga solicitada pelo ONS, situações de emergência, inadimplência e falha de instalações em unidades consumidoras que não provoquem interrupção de terceiros. À exceção destes casos, apuram-se os índices nas situações de interrupção de energia.

A ocorrência de faltas elétricas sob as referidas condições que provocam o incremento dos indicadores equivalentes e individuais de continuidade implica, por consequência, a aplicação de penalização sob forma de multa às empresas responsáveis pela transmissão e distribuição de energia elétrica quando estes indicadores ultrapassam as metas pré-estabelecidas pela ANEEL. Como exemplo, pode-se citar a empresa de distribuição CEEE, responsável pela transmissão e distribuição de 7.37 GW, em uma área de concessão de 73.626 Km² que atende a 1,34 milhões de unidades consumidoras¹. No mês de Janeiro de 2012, foi aplicada uma penalidade de R\$ 9.439.517,84 por atraso no envio de informações relativas à continuidade do serviço e descumprimento de metas dos indicadores coletivos de continuidade DEC e FEC em 2009².

O não cumprimento das metas dos indicadores pode ser causado por vários fatores. Ao se tratar de uma rede de distribuição que não esteja equipada com dispositivos automatizados, os indicadores podem registrar números maiores.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma solução eficaz e ágil para a resolução destes problemas apresentados. O plano de manobras detalhado tem

¹ (Fonte: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/cartilha_CEEE_parteII.pdf)

² (Fonte:

http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Operacao_e_Manutencao.asp?id=87324)

como função oferecer suporte de operação para a concessionária que pode atuar de forma rápida e objetiva para minimizar o problema. Isto provoca uma queda de custos não operacionais que oneram as finanças das empresas de distribuição, e beneficia os consumidores permitindo que opções de manobras de reenergização finais sejam possibilitadas minimizando o número de clientes que devem ficar necessariamente desenergizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ocorrência de faltas elétricas existe desde o século XIX quando os primeiros sistemas de potência foram construídos³. Assim que as cidades passaram a utilizar a energia elétrica como fonte energia para iluminar as casas e as ruas, as redes de distribuição foram se tornando grandes e complexas, e as faltas elétricas e problemas que envolvem estes sistemas surgiram. Desta maneira, com o passar dos anos, estudos tanto do meio acadêmico como empresarial viriam a desenvolver conhecimento para a transmissão e distribuição da energia de forma a minimizar eventos potenciais de acidentes, e também técnicas e dispositivos capazes de proteger a integridade destas redes e seus dispositivos instalados. Contudo, apenas ao final do século XX e início do século XXI são instalados os *Intelligent Electronic Devices* (IED) nas redes de energia elétrica. A automação de redes de distribuição proporcionou uma facilitação de operações de manobras na rede, uma vez que estes dispositivos passaram a ser telecomandados, e até mesmo autocomandados.

A partir de então, cria-se uma linha de pesquisa específica para tais problemas envolvendo manobras em redes de distribuição, dada a crescente complexidade das linhas, a maneira como elas são instaladas, além da quantidade crescente de consumidores com acesso a este tipo de energia. Muitas pesquisas têm sido feitas desde então propondo métodos robustos e eficazes, capazes de resolver problemas que podem ser contornados com a existência de dispositivos automatizados nas redes.

Normalmente o problema de isolamento de faltas costuma ser tratado com o problema de reconfiguração ou conjunto ao problema de estimação da seção sob falta. Poucos artigos abordam o problema de isolamento de forma independente. Dentre estes, estão os trabalhos de Wang (2011) que propõe um algoritmo de detecção de faltas para sistemas com geração distribuída. Esta proposta lança mão de cálculos matriciais considerando-se duas matrizes: uma matriz de informação, e outra matriz topológica dos elementos da rede de distribuição. A matriz de

³ Thomas Edison foi o precursor dos sistemas de distribuição ao instalar em 1882 um sistema de distribuição por corrente contínua para alimentar 59 consumidores na cidade de Nova Iorque. Entretanto, o primeiro sistema de potência de corrente alternada tal qual é utilizado até hoje em transmissão e distribuição de energia elétrica foi construído em 1884 em Turim para iluminar uma ferrovia de 40 quilômetros de extensão.

informação deve conter a direção das sobrecorrentes medidas, e a matriz topológica contém a informação das conexões dos elementos em uma rede de distribuição. A seção faltosa pode ser precisamente diagnosticada com o cálculo destas duas matrizes. Com a informação de status atual das chaves manobráveis, o isolamento da porção faltosa pode ser realizado.

Ahmed (2010) propõe um sistema de isolamento de faltas para sistemas de distribuição em baixa tensão baseado em *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA). Sua publicação apresenta um novo sistema de isolamento de faltas baseado em SCADA com a utilização de interface gráfica do usuário para construir uma interface Homem-Máquina. A comunicação entre os dispositivos de distribuição automatizados e a subestação é feita por *Power Line Communication* (PLC). A proposta indica redução de custos, de tempo operacional, e menor intervenção humana durante as situações de falta.

A publicação de Bignucolo (2009) apresenta o desenvolvimento de novos equipamentos de detecção de faltas para linhas aéreas de média tensão que apresentam desempenho semelhante aos cabos detectores de falta do tipo RGDAT/C. Esse dispositivo de uso externo é um novo dispositivo de proteção e monitoramento digital que dispensa o uso dos tradicionais transformadores de corrente e transformadores de potencial.

Em um nível mais avançado de aplicação, a publicação de Goraj (2011) discute a possibilidade de se atingir o isolamento e reconfiguração de faltas com a utilização de religadores capazes de enviar e receber mensagens entre si. Esta comunicação feita entre os dispositivos usa o padrão de comunicação IEC 61850 através da camada física de microondas.

Este tipo de problema pode ser tratado de maneiras distintas e sofisticadas. Entretanto, estas técnicas diversificadas têm o mesmo objetivo que o trabalho desde documento apresenta. O algoritmo de isolamento que será documentado tem como mérito a habilidade de se adequar tanto a redes com pouca utilização de automação, quanto a redes com infraestrutura superior, aprimorando o resultado efetivo do isolamento de faltas.

3 DEFINIÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Um sistema elétrico em operação conta com a presença de uma infinidade de dispositivos em operação para que seja possível a geração, transmissão e distribuição da energia que é entregue. Kersting (2002) menciona que desde a última metade do século XX, o projeto e operação de sistemas elétricos apresentaram muitos desafios para a prática profissional de engenheiros e pesquisadores. As usinas de energia tornaram-se cada vez maiores. As linhas de transmissão cruzam extensas porções de terra formando grandes redes interconectadas. A operação destas grandes redes interconectadas exigiu o desenvolvimento de novas técnicas de análise e operacional. Enquanto isso, os sistemas de distribuição continuaram a fornecer energia ao medidor do usuário final com pouca ou nenhuma análise. Como resultado direto, sistemas de distribuição eram tipicamente superdimensionados. Com o passar dos anos, a distribuição teve importância crescente nas questões referentes ao sistema elétrico de potência. Estas questões envolvem análise da capacidade máxima de distribuição, atendimento dos limites máximos de operação, e maneiras de tornar o sistema de distribuição mais eficiente.

A despeito do desenvolvimento destas novas soluções, o sistema de distribuição possui elementos básicos que caracterizam a porção da rede responsável por entregar a energia ao seu cliente ou consumidor final. Tipicamente começa em uma subestação de distribuição que é alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Em alguns casos, a subestação é alimentada por uma linha de transmissão de alta tensão. Em cada subestação de distribuição vai servir um ou mais alimentadores primários. A grande maioria dos sistemas de distribuição possui alimentadores radiais, isto é, alimentadores cuja configuração topológica não permite a interconexão de condutores entre si formando *loops*, nem a interconexão entre alimentadores adjacentes. Significa também dizer que o fluxo de potência possui apenas um caminho desde a subestação de distribuição até o usuário final.

3.1 SUBESTAÇÕES

Uma subestação de distribuição é composta tipicamente dos elementos citados a seguir:

- a) chaves manobráveis: estes dispositivos são responsáveis pelo seccionamento ou interrupção do caminho elétrico da corrente ou o fluxo de potência. Estas chaves são posicionadas nos níveis de alta e baixa tensão. Em muitos casos, estas chaves do lado de baixa tensão são substituídas por religadores controláveis, podendo ser eles ligados a um alimentador em específico, ou a um barramento;
- b) transformadores de tensão: a função primária de uma subestação de distribuição é reduzir o nível de tensão de transmissão a um nível de tensão de distribuição. O sistema pode ter um ou vários transformadores de distribuição, que podem ser trifásicos ou compor um arranjo de três transformadores monofásicos conectados a uma barra de baixa tensão (BT);
- c) reguladores de tensão: à medida que a carga dos alimentadores varia, a queda de tensão entre a subestação e o consumidor também sofre variação. Com o propósito de manter os níveis de tensão para o usuário final em uma faixa aceitável, o nível de tensão na subestação precisa variar para compensar a mudança da carga. Estes reguladores sempre são requisitados quando o nível de tensão para o consumidor está acima ou abaixo da tensão nominal. Geralmente os alimentadores possuem um regulador de tensão para cada alimentador, ao invés de se fazer uma regulação sobre a barra de tensão;
- d) disjuntores e fusíveis: a subestação precisa estar protegida contra a ocorrência de curtos circuitos. Conforme aumenta a complexidade do projeto e da concepção dos elementos da subestação, esquemas de proteção mais aprimorados devem ser empregados para proteger os transformadores, barramentos, medidores, entre outros equipamentos. Disjuntores individuais e religadores são utilizados pelos alimentadores

para proteger ocorrências de curtos circuitos que ocorram fora da subestação;

- e) medidores em geral: toda e qualquer subestação possui uma forma de medição dos parâmetros elétricos. Ela pode ser feita com o uso de equipamentos analógicos ou digitais, fazendo medições periódicas ou em tempo real. Estes medidores podem fazer registros de valores mínimos, médios e máximos de corrente, tensão, potência ativa e reativa, e outros parâmetros de interesse.

3.2 ALIMENTADORES

Segundo Kersting (2002), os alimentadores, considerando sua radialidade, são caracterizados por possuírem apenas um caminho para o fluxo de potência a partir da fonte (subestação) até o consumidor.

Um sistema de distribuição típico é composto por uma subestação de distribuição que fornece energia a um ou mais alimentadores. Um alimentador é composto dos seguintes elementos:

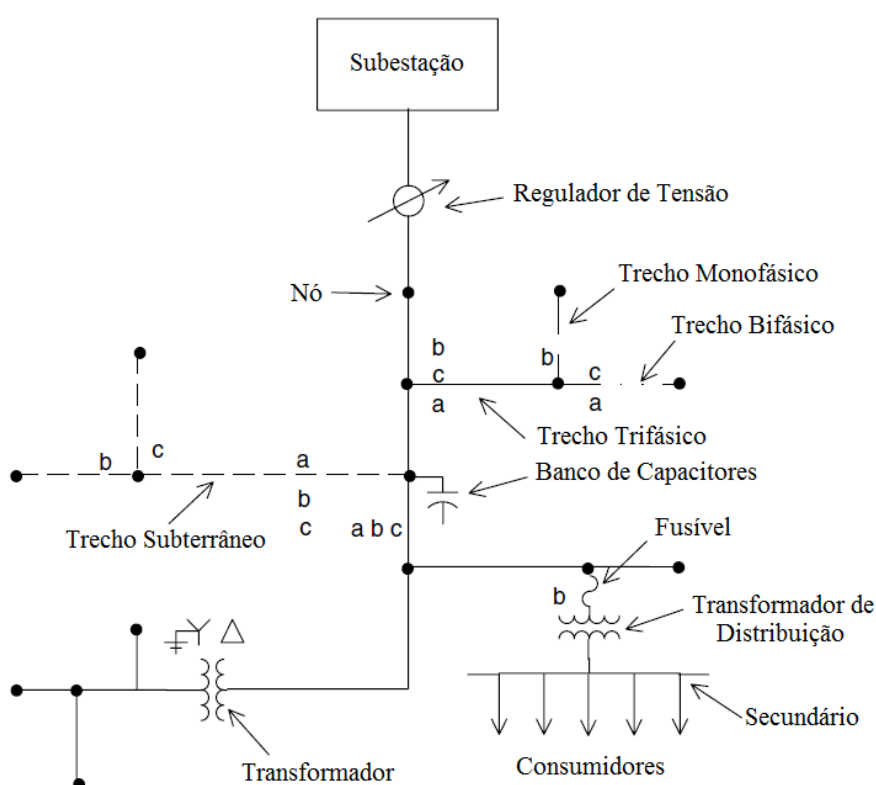
- a) alimentador trifásico principal;
- b) condutores aéreos ou subterrâneos;
- c) reguladores de tensão;
- d) transformadores de tensão;
- e) bancos de capacitores;
- f) transformadores de distribuição;
- g) secundários;
- h) cargas trifásicas, bifásicas e monofásicas;
- i) religadores;
- j) chaves manobráveis;

k) disjuntores;

l) fusíveis.

A Figura 2 apresenta um diagrama unifilar de um alimentador trifásico. A figura mostra também os componentes mais comuns de um sistema de distribuição. Os pontos de conexão dos componentes são referidos como *nós*. Aos condutores, são associados as fases, sendo elas representadas por A, B e C.

Figura 2 - Exemplo de diagrama unifilar de um alimentador trifásico



Fonte: Adaptado de KERSTING, 2002

Alguns dispositivos presentes tanto nas subestações quanto nos alimentadores merecem atenção especial neste trabalho. Por se tratar da resolução de isolamento de faltas em redes de distribuição, é necessário fazer uma descrição detalhada dos dispositivos de manobra, que são os religadores e chaves seccionadoras.

3.2.1 Religadores

Este equipamento possui a característica de interromper a corrente elétrica, porém, é dotado da capacidade de repetição em operações de abertura e fechamento de um circuito durante a ocorrência de uma falta elétrica. Ele é vastamente utilizados em circuitos de distribuição das redes aéreas de distribuição (Figura 3). Permitem que os defeitos transitórios sejam de alguma forma eliminados sem que haja a necessidade do deslocamento de uma equipe de campo para percorrer o alimentador.

Figura 3 - Religador instalado em rede de distribuição aérea



Fonte: SIEMENS

Os religadores são classificados quanto ao número de fases. Os religadores monofásicos são destinados às redes de distribuição monofásicas, ou podem ser empregados religadores monofásicos em cada fase. Os religadores trifásicos são destinados à proteção de redes aéreas onde é necessário o seccionamento tripolar para evitar que as cargas trifásicas ligadas ao alimentador funcionem com apenas duas fases. Os religadores também são classificados quanto ao seu sistema de controle. Existem dois tipos de controle para os religadores, sendo eles o controle por ação eletromagnética, no qual os equipamentos contêm uma bobina série pela qual circula uma corrente que, quando excede o seu nível de acionamento, o

religador abre os seus contatos devido a ação do núcleo da bobina sobre o mecanismo de disparo, e em seguida a mola de fechamento o predispõe à nova operação. Os religadores controlados eletronicamente possuem um sistema de estado sólido, no qual é possível guardar dados de ajustes necessários à execução das operações de religamento, os quais são a corrente de acionamento, o número de disparos, e a curva de atuação do dispositivo.

De forma resumida, os religadores são dispositivos sensíveis à variação de corrente. Os sensores, ao sentirem uma condição de corrente anormal, enviam um sinal ao sistema de manobra que efetua a abertura dos contatos principais. Após um determinado período denominado de *tempo de religamento*, o sensor envia outro sinal para que o sistema de manobra efetue o fechamento dos contatos, reenergizando os terminais do dispositivo. Se o regime de corrente anormal persiste, o religador inicia o *ciclo de religamento*. Este ciclo é o período em que este mesmo procedimento é repetido até que o dispositivo seja bloqueado para religamentos e seus contatos permaneçam abertos para que um comando externo ordene a energização dos terminais novamente. Este ciclo é determinado de acordo com as condições programadas no controle em função da condição de serviço desejada.

Devido às exigências crescentes de qualidade e continuidade dos sistemas elétricos, os religadores atuais possuem características importantes para aplicação em redes elétricas, principalmente quando se trata de sistemas automatizados. Estas características incluem comunicação com um centro de operações, localização de defeitos na rede, proteção direcional e monitoramento da qualidade de energia.

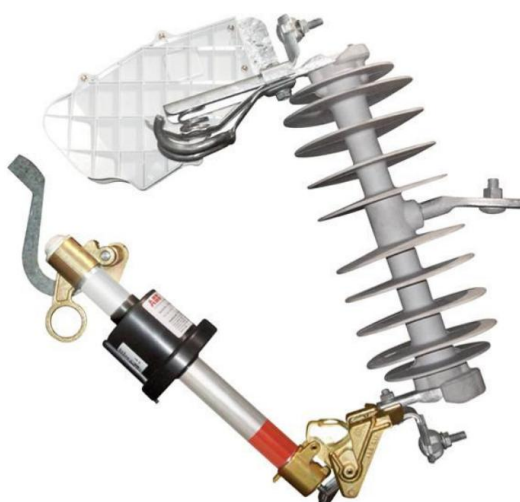
3.2.2 Chaves seccionadoras

Segundo a descrição da NBR6935, uma chave é um dispositivo mecânico de manobra que na posição aberta assegura uma distância de isolamento e na posição fechada mantém a continuidade do circuito elétrico em condições especificadas. De maneira semelhante aos religadores, fusíveis e outros dispositivos de proteção, é capaz de conduzir correntes elevadas durante um tempo específico, tais como curtos-circuitos. Também são fabricados tanto seccionadores monopolares quanto tripolares.

O seccionador, diferente do interruptor comum, é um dispositivo que além de desempenhar a função de interromper a circulação de corrente, é projetado de modo a garantir a distância de isolamento requerida pelo nível de tensão do circuito. Estes dispositivos são utilizados tanto nas subestações para permitir a manobra de circuitos elétricos e isolamento de barramentos, quanto em alimentadores nas redes aéreas de distribuição com a finalidade de isolar a porção da rede em manutenção, ou realizar manobras previstas pelos operadores, sejam elas de prevenção, manutenção de equipamentos para as chaves ligadas em *bypass* ou de transferência de carga.

Segundo Mamede (2013), os seccionadores podem ser classificados de duas formas quanto ao seu modo de operação. O primeiro modo de operação é o modo manual. Os seccionadores de operação manual são operados através de um mecanismo articulado, geralmente constituído de uma alavanca que gira em torno de um eixo, resultando na movimentação dos contatos do dispositivo (Figura 4). Estes seccionadores também podem ser operados através de varas de manobra, utilizadas em redes de distribuição de concessionárias. O segundo modo de operação é o motorizado, que é o modo decorrente do emprego de uma fonte não manual de acionamento ao mecanismo articulado do seccionador, que pode ser um motor, solenoides, sistemas pneumáticos, entre outros. Esta classe de dispositivos são mais utilizadas que os seccionadores manuais, e são acionados por meio de painéis de comando instalados a uma distância segura para operação.

Figura 4 – Chave-fusível com atuação programável



Os seccionadores automáticos cumprem a mesma função dos seccionadores de atuação estritamente manual, porém possuem a característica de oferecerem coordenação total com outros elementos de proteção ligados a montante. São projetados para serem instalados em série com a carga e após o religador. Possui medição de corrente que percorre o circuito onde ele é instalado, e controle do ciclo de religamento dos religadores ligados a montante. Se um seccionador automático detecta um nível de corrente acima dos ajustes prévios, o dispositivo fica predisposto a operar até que entre em atuação efetivamente ao contabilizar um número pré-definido de religamentos feitos pelo religador de retaguarda.

Por possuírem sensores de corrente, os seccionadores automáticos possuem sensoriamento de forma análoga aos religadores, sendo classificados como sensoriamento de ação eletromagnética, sensibilizando uma bobina série que é percorrida pela corrente do alimentador e predispondo o acionamento quando a corrente é superior a uma corrente pré-definida. Também há a classificação de seccionamento eletrônico, no qual um circuito de estado sólido é responsável por fazer a memorização dos ajustes de contagem de religamentos e de tempo de rearme, o monitoramento de corrente circulante para defeitos trifásicos e fase-terra, e a efetiva atuação dos mecanismos do dispositivo.

3.3 CADASTRO TÉCNICO

A análise de um alimentador de distribuição é importante para que seja possível determinar as condições de sua operação existentes, e também para que seja possível considerar os diversos cenários das mudanças futuras do alimentador.

Antes que o operador possa realizar a análise do alimentador, um banco de dados contendo informações de cadastro dos elementos deve estar disponível. Este cadastro contém informações importantes a respeito dos dispositivos instalados como a sua localização, posicionamento, orientação de instalação na rede, faseamento, ampacidade, potência máxima de operação ativa e reativa, status de operação, entre outros dados relevantes.

Além destes dados que definem a característica topológica da rede, o cadastro ainda deve conter dados referentes à características elétricas dos

equipamentos e componentes elétricos. Para os condutores, é necessário que se tenha informação do tipo de cabo que é utilizado, bem como a extensão dos condutores, diâmetro, geometria e sua resistência. Para reguladores de tensão, são necessários dados referentes a razão de transformação de tensão e corrente, parâmetros de compensação e dados de impedância. Para transformadores, é necessária a informação de classificação de tensão e potência nominais, impedância, perdas em geral, carga nominal instalada, informação esta que faz referência ao tipo e quantidade de consumidores.

4 REVISÃO SOBRE GRAFOS

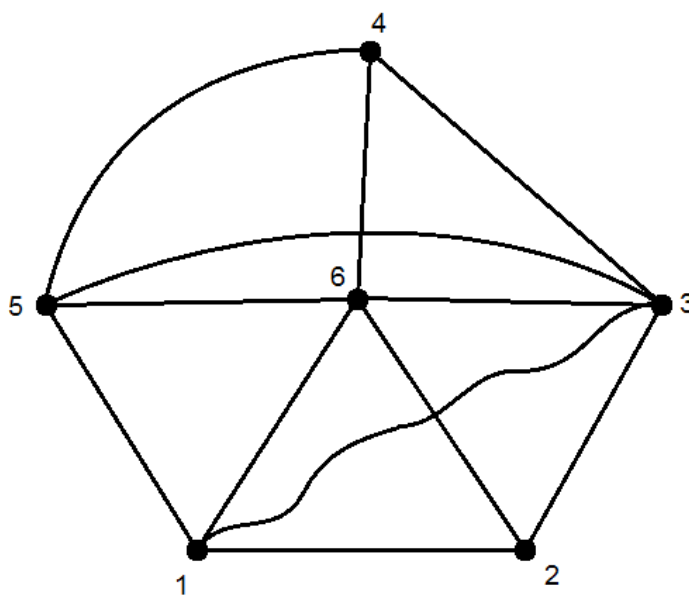
Em matemática, e mais especificamente na teoria de grafos, um grafo é uma representação de um conjunto de objetos em que pares desses objetos são conectados por ligações. Esses objetos interconectados são representados pela abstração matemática de vértices, e às ligações que conectam os pares de vértices são chamadas de arestas. Tipicamente, um grafo é descrito de forma diagramática como um conjunto de pontos para os vértices, ligados por linhas ou curvas, para as arestas.

Os grafos são um bom modelo para muitos problemas em vários ramos da matemática, da informática, da engenharia e da indústria. Muitos dos problemas sobre grafos tornaram-se célebres porque são um interessante desafio intelectual e porque têm importantes aplicações práticas.

4.1 REPRESENTAÇÃO

O desenho de um grafo é representado por pontos e linhas que interconectam esses pontos ou não, como mostra a Figura 5. Embora um grafo tenha uma representação equivalente, seu desenho não deve ser confundido com o grafo em si. O interesse principal é saber quais vértices estão interconectados e por quantas arestas eles estão conectados. Em outras palavras, “é possível coincidir dois pontos arbitrários de representações geométricas distintas de modo a preservar adjacência” (SZWARCFITER, 1984, p. 35).

Figura 5 - Exemplo de grafo



Fonte: Adaptado de SWARCFITER, 1984

O armazenamento das informações de um grafo é feita por uma lista de estruturas denominadas lista de incidência e lista de adjacência. A lista de incidência é um conjunto de arestas, representadas por conjuntos de pares não ordenados de vértices (com os quais esta aresta conecta), e ainda com a possibilidade de conter outras informações pertinentes, como peso, tamanho e orientação. A lista de adjacência por sua vez, de forma análoga a lista de incidência, é um conjunto de vértices representados por uma lista individual de arestas que se conectam a ele, contendo indiretamente a informação de quais vértices estão conectados ao vértice referido. Esta mesma informação de vértices adjacentes confere ao vértice um índice denominado *grau de vértice*. Confere-se grau n ao vértice quando ele contém n vértices adjacentes.

Com essa mesma estrutura de listas, ainda é possível criar matrizes que contêm as mesmas informações de conectividade entre os vértices e a relação de arestas entre eles. Essas matrizes são denominadas como Matriz Adjacência e Matriz Incidência. A matriz Adjacência é uma matriz quadrada de ordem n , onde n é o número de vértices do grafo e os elementos a_{ij} assumem os valores 1 se os vértices i e j são conectados por uma aresta, e o valor 0 caso contrário. Uma matriz incidência é uma matriz de ordem n por m , onde n é o número de vértices do grafo e m é o número de arestas. Os elementos a_{ij} assumem valor 1 quando o vértice i for

extremo da aresta j , e 0 caso contrário. As matrizes apresentadas em (5) e (6) são as matrizes adjacência e incidência da Figura 5.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

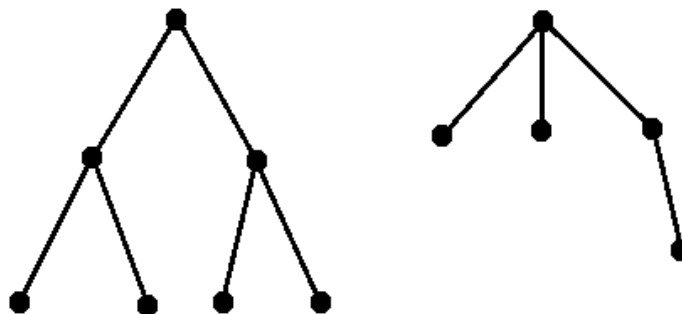
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4.2 DEFINIÇÕES

Uma sequência de vértices pode ser definida de tal maneira que forme um *caminho*. Este caminho só é possível se em uma sequência ordenada de vértices, o primeiro e o segundo vértice sejam adjacentes, bem como o segundo e o terceiro, o terceiro e o quarto, e assim sucessivamente até o final da sequência. Em outras palavras, um caminho pode ser definido como um trajeto em que se alcançam os próximos vértices por meio da existência das arestas entre eles. Entretanto, o caminho só pode ser definido se os vértices da sequência foram todos distintos (BONDY, 1982, p. 12). Se em um caminho definido, o mesmo vértice é alcançado duas ou mais vezes, este trajeto é denominado *ciclo*. A possibilidade de trajetos serem feitos em ciclos define este grafo como contendo um *circuito*.

Um grafo que não possui ciclos é *acíclico*. Denomina-se *árvore* o grafo que seja acíclico e conexo (Figura 6). Se o grau de um vértice for menor ou igual a um, define-se este vértice como uma *folha*, caso contrário, define-se este o vértice como um *vértice interior*. Um conjunto de árvores é denominado *floresta*. Assim sendo, todo grafo acíclico é uma floresta.

Figura 6 - Exemplo de grafos do tipo árvore



Fonte: O AUTOR

Um grafo ainda pode ser denominado *conexo* quando existe caminho entre cada par de vértices. Caso contrário, este grafo será desconexo. A representação de um grafo desconexo é necessariamente descontígua. Em caso extremo, um grafo será totalmente desconexo quando ele não possuir arestas.

A teoria de grafos ainda prevê a existência de subgrupos contendo um conjunto de vértices com apenas as arestas que interconectam estes vértices que os compõem. Esta definição é dada para os *subgrafos*, isto é, grafos que são gerados a partir de um grafo pré-estabelecido.

4.3 MÉTODOS DE BUSCA

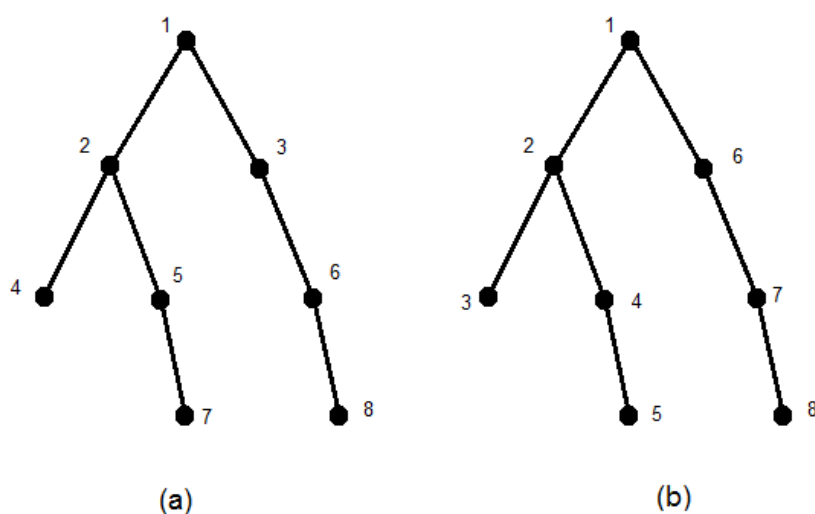
Dentre as técnicas existentes para a solução de problemas algorítmicos em grafos, a técnica de busca ocupa lugar de destaque, pelo grande número de problemas que podem ser resolvidos através de sua utilização. A busca visa resolver um problema básico, qual seja o de exploração um grafo. Isto é, dado um grafo, deseja-se obter um processo sistemático de como caminhar pelos vértices e arestas do mesmo.

A teoria de grafos apresenta procedimentos não informados de buscas, em que se utilizam apenas as informações disponíveis do problema. Dentre eles, os mais comuns e conhecidos são os métodos de busca em largura e em profundidade. Essas duas estratégias de busca se diferenciam entre si através da expansão dos vértices. Estes métodos podem também ser avaliados conforme: sua completeza,

isto é, se para problemas de busca objetiva podem achar ou não a solução se ela existir, otimalidade, complexidade temporal referente a tempo que se transcorre, complexidade espacial referente ao espaço de memória que o método pode utilizar,

No método de busca em largura, a propriedade especial está no fato de a árvore não possuir ciclos: dados dois vértices quaisquer, existe exatamente um caminho entre eles. Um percurso em extensão é visitar cada vértice começando do menor nível e mover-se para os níveis mais altos, nível após nível, visitando cada nó em uma dada ordem sequencial (da esquerda para a direita, por exemplo, como mostra a Figura 7a). Sua implementação é direta quando uma fila é utilizada. Depois que um vértice é visitado, seus filhos, se houver algum, são colocados no final da fila e o vértice no início da fila é visitado. Assim, os vértices do nível $n+1$ serão visitados somente depois de terem sido visitados todos os vértices do nível n .

Figura 7 - Sequência de visitas para os métodos de busca em largura e profundidade



Fonte: O AUTOR

Um algoritmo de busca em profundidade realiza uma busca não informada que progride através da expansão do primeiro vértice filho da árvore de busca, e se aprofunda cada vez mais, até que o alvo da busca seja encontrado ou até que ele se depare com um vértice que não possui filhos (Figura 7b). Então a busca retrocede e começa no próximo vértice. Numa implementação não recursiva, todos os vértices expandidos recentemente são adicionados a uma pilha para realizar a exploração.

5 O PROBLEMA DE ISOLAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Ao se tratar de uma rede cuja localização, isolamento e restauração da falta elétrica tenham de ser feitos sem o auxílio de inteligência computacional, a inspeção, busca e solução do problema certamente levará mais tempo. Para estes casos, e para todos os casos anteriores à era digital e da automação de redes de distribuição, em caso de ocorrência de falta elétrica, o disjuntor da subestação é sensibilizado pela detecção de uma corrente elevada e abre. Uma equipe de reparo é enviada para a inspeção da rede de distribuição, e faz a inspeção da linha para determinar a localização da falta. Se há a presença de chaves manobráveis ao longo da linha, a equipe é responsável por fazer manualmente as devidas manobras no sistema para isolar a falta, de forma que o serviço possa ser reestabelecido para os consumidores não afetados enquanto os reparos pontuais são feitos. Uma vez que os reparos são finalizados, a configuração original do alimentador será retornada ao normal, fazendo-se as devidas manobras sobre as chaves da linha de distribuição.

A ocorrência de falta é um evento que pode acontecer a qualquer instante, e os sistemas não estão completamente imunes a este tipo de problema. Reparos preventivos são feitos de maneira que estes eventos tenham pequena probabilidade de ocorrência. No entanto, como as ocorrências são inevitáveis, espera-se que o problema seja resolvido no menor espaço de tempo possível, e a dependência única e exclusiva por uma equipe em campo para fazer o reparo necessário aumenta este período em questão, podendo ter consequências graves e/ou severas em situações cruciais tais quais supracitadas.

A utilização de tecnologias, tanto nos centros de operação das empresas como na própria topologia da rede, com a presença de dispositivos automatizados e/ou telecomandados, têm como objetivo auxiliar na redução dos indicadores de continuidade. Além disso, a identificação dos próprios consumidores reportando problemas de fornecimento de energia à empresa por meio de ligações telefônicas auxilia a equipe de reparos na localização mais específica da falta elétrica.

Em meados da década de 90 foi viabilizada e iniciada a instalação de IEDs em sistemas de distribuição, os quais permitiram o sensoriamento local e remoto, e o

controle de equipamentos da subestação. A maior utilização dos IEDs proporcionou o desenvolvimento de comunicações embarcadas, e a inteligência na rede distribuição ofereceu novas oportunidades para o monitoramento e gerenciamento destas redes. Conseqüentemente, aumentou-se a confiabilidade geral, e os custos operacionais caíram, com reparos preventivos e remediáveis menos onerosos.

Os primeiros dispositivos inteligentes indicavam a direção de ocorrência da falta e reportavam essa informação a um centro de operação. Uma vez identificada a falta, comandos eram enviados aos IEDs para fazer seu devido isolamento, e logo após, o disjuntor da subestação poderia ser chaveado novamente para reestabelecer o fornecimento de energia aos consumidores não afetados (GORAJ, 2011). As faltas elétricas passaram a ser reparadas mais rapidamente, devido ao fato de as equipes terem conhecimento prévio do segmento avariado da rede e localizarem a falta com mais rapidez. Isto causa um grande impacto nos indicadores de continuidade das empresas.

A maneira como estes dispositivos inteligentes interagem, a utilização de inteligência artificial como suporte da operação de redes de distribuição, e o requerimento de ações humanas em situações variadas, são elementos interrelacionados na operação de um sistema de distribuição. A interação destes elementos é baseada em dados transformados em informação e conhecimento, potencializados por ferramentas analíticas de solução avançadas que têm sido desenvolvidas em um período relativamente recente. Os métodos, técnicas e interpretação de dados para tratamento deste tipo de problema são discutidos nos capítulos seguintes.

5.1 COMO O PROBLEMA É RESOLVIDO?

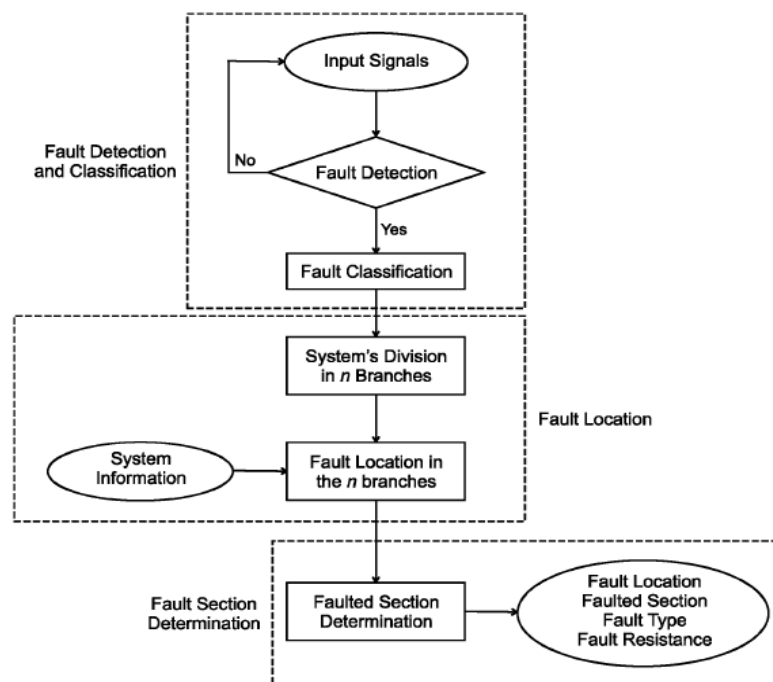
De uma forma resumida, o problema de isolamento em redes de distribuição é resolvido com o efetivo isolamento da porção faltosa, para que os reparos sejam feitos, e se possível, sejam feitas manobras para reenergizar as unidades consumidoras prejudicadas pela ocorrência da falta. Entretanto, é necessário verificar as etapas deste procedimento até que as devidas manobras sejam estipuladas:

- i. é preciso detectar e classificar a falta;
- ii. é preciso localizar a falta;
- iii. é preciso identificar a falta.

Várias técnicas e métodos têm sido desenvolvidos por pesquisadores da área de sistemas de potência ao longo dos anos. Dentre os vários trabalhos publicados e apresentados pela comunidade científica, Salim (2008) propõe um sistema híbrido de diagnóstico de faltas que abrange os três pontos supracitados. Em seu trabalho, a detecção e classificação de faltas são baseadas em *wavelets*, a localização de falta é determinada pela análise de impedância de faltas, e a identificação é obtida através da análise de redes neurais artificiais e sinais de tensão e corrente locais. A Figura 8 apresenta uma visão global de como o diagnóstico de detecção, classificação e localização de faltas é feito. O trabalho ainda faz referência a outros trabalhos publicados que apresentam métodos alternativos e critérios de avaliação destas três questões.

A literatura ainda apresenta alguns métodos que são capazes de determinar a localização da falta a partir de um ponto do qual é feita a observação. Zhu (1997) apresenta uma técnica para diagnóstico e localização de faltas em alimentadores de redes de distribuição baseado na integração de informações disponíveis dos registros de distúrbio da rede e do conhecimento da configuração do alimentador. Em seu trabalho, Zhu sinaliza os limites de erro para a distância de falta calculada baseado na modelagem e análise probabilística do problema. Zimmerman (2004) apresenta um trabalho que analisa performances e o resultado de vários métodos de localização de faltas que consideram a impedância de falta para sua resolução, como o método de reatância simples, Takagi e corrente de sequência zero. Ainda há outros trabalhos que apresentam métodos de localização de faltas por ondas viajantes e dados de dispositivos de automação da rede como os trabalhos de Zhang (2008) e Gong (2013).

Figura 8 - Diagrama simplificado do diagnóstico de faltas



Fonte: SALIM, 2008

Observa-se que os métodos que podem ser utilizados em redes de infraestrutura menor são incapazes de determinar com precisão a exata localização da falta. As incertezas de medidas, aproximações e limitações dos métodos prejudicam a determinação de um resultado que indique a localização da falta de forma adequada. Por mais próximo que sejam os resultados ao indicar a provável localização da falta, é necessário admitir uma tolerância quanto à atribuição desta certeza, e por este motivo, o algoritmo de isolamento admite a associação de uma probabilidade de ocorrência de faltas em cada zona de proteção considerada.

A ocorrência de uma falta em qualquer ponto do sistema deve desencadear a atuação de dispositivos de proteção que podem ou não ser monitorados via software – religadores e disjuntores, chaves-fusível protetoras de ramais e transformadores de distribuição. A determinação do tipo e localização da falta são capazes de atribuir à porções da rede um índice referente a possibilidade de ocorrência de falta permanente para as estimativas levantadas.

O algoritmo de isolamento tem como propósito determinar a sequência de manobras necessária para isolar a região onde ocorreu o defeito. Embora o isolamento da parte faltosa da rede possa ser feito com numerosas combinações de

chaveamentos, deseja-se que os chaveamentos ocorram o mais próximo possível da região que apresenta o problema.

São entradas para o problema de isolamento:

- a) localização da falta: para cada falta permanente monitorada, um algoritmo de localização de falta determina o *grau de confiança* (GC) das zonas de proteção a jusante do dispositivo estarem sob falta. A faixa de valores do GC está compreendida entre 0 e 1, onde o valor 1 indica certeza absoluta que a falta está na zona de proteção enquanto 0 indica a impossibilidade de falta;
- b) cadastro técnico da rede: cadastro técnico com todos os parâmetros elétricos e conectividade dos elementos da rede;
- c) estado elétrico pré-falta: estado de todas as chaves no instante anterior a ocorrência da falta;
- d) índice de restrição de GC: número indicativo para delimitar e distinguir as regiões fronteiriças da provável localização da falta das regiões em que a probabilidade de que tenha ocorrido a falta sejam menores.

A saída do problema de isolamento será:

- a) plano de manobra de Isolamento: indica todas as ações a serem executadas pelo operador para isolar o defeito da rede.

5.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

O correto isolamento de faltas consiste em isolar uma determinada região da rede de distribuição que esteja apresentando comportamento irregular na distribuição de energia. Deve-se assegurar que os condutores que se encontram seccionados ou que estejam em curto circuito estejam fisicamente desconectados da rede para que os reparos possam ser feitos, e que seja possível a reconfiguração

da rede para que os consumidores de regiões próximas afetadas não sejam prejudicados pela desenergização generalizada.

De acordo com as definições descritas nos capítulos anteriores, uma rede de distribuição é composta por condutores, dispositivos de proteção, de manobra, de regulação e controle alimentando cargas consumidoras e transformadores de distribuição. Analisando sob o ponto de vista lógico, a rede de distribuição pode ser modelada pela existência do que pode ser chamado de *blocos de carga* da rede.

Um bloco de carga pode ser definido como uma porção da rede delimitada por dispositivos lógicos de manobra, sejam eles os religadores, chaves e seccionadores manuais e automáticos. Todo o conjunto de dispositivos do sistema e elementos instalados que estejam entre chaves ou seccionadores vai compor um bloco de carga. Desta forma, é possível fazer o devido seccionamento da rede para que se a ocorrência de uma falta elétrica for identificada em algum dos blocos de carga, a manobra das chaves seccionadoras seja feita, e a região seja isolada.

A fase de detecção do GC é realizada por algoritmos de detecção e localização de faltas que são responsáveis por indicar o tipo e o local em que a falta elétrica ocorreu. Os meios utilizados para estas estimativas são diversificados e conferem aos blocos de carga um fator indicativo GC. Este índice pode ser obtido utilizando-se uma metodologia de inferência fuzzy tal qual apresentado por Santos (2013) com a inferência de graus de possibilidade da localização da falta nos blocos de carga, Este grau pode ser expresso tanto como um nível percentual quanto um número real entre 0 e 1. Se ao bloco de carga é atribuído um GC de 0.2, define-se que a probabilidade de que a ocorrência de falta elétrica tenha ocorrido nele é de 20%. Ressalta-se que esta é uma atribuição de inferência individual normalizada do GC em cada bloco de carga.

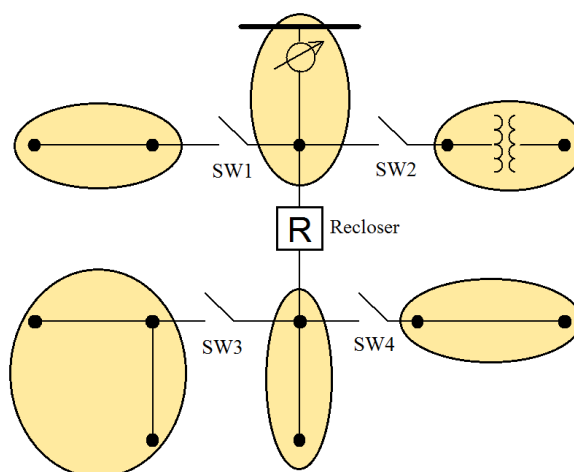
Cabe aos operadores do sistema definir um nível *limiar de grau de confiança* (LGC) adequado, fazendo um levantamento de estimativas e informações externas para que seja possível definir quais blocos de carga poderão/deverão ser isolados da rede.

5.2.1 Tratamento em Grafos

Por ser dividida em chaves lógicas e blocos de carga, é possível criar um modelo análogo da rede em grafos. Os vértices de um grafo representarão os blocos de carga de uma rede de distribuição, e as arestas por sua vez, os dispositivos lógicos da mesma.

De acordo com as descrições supracitadas, um grafo irá representar da forma mais simples a rede de distribuição. As chaves por não possuírem restrições quanto a direção do fluxo de potência tornam as arestas do grafo bidirecionais. De forma análoga a informação de peso e tamanho de arestas, para o problema estudado, será associada a cada aresta a informação de *status* dos dispositivos lógicos, indicando se o dispositivo está aberto ou fechado. Também, a existência de uma aresta para cada dois vértices exprime uma característica evidente do sistema de ter apenas uma chave interconectando dois blocos de carga. A Figura 9 apresenta um sistema simples em que os nós são elementos diversos da rede que agrupados formam blocos de carga, assinalado pelas elipses em amarelo. Essas elipses designam a concepção de vértices em um grafo.

Figura 9 - Representação dos blocos de carga de uma rede de distribuição



Fonte: O AUTOR

5.2.2 Método de busca abrangente

Para que seja possível determinar quais chaves devem ser manobradas no sistema, é possível se aplicar um algoritmo de busca no grafo que percorra os vértices e faça um levantamento de quais regiões podem e quais não podem ser

energizadas. Para isso, é necessário utilizar métodos de busca em grafos. Estes métodos de busca tem a função de fazer visitas aos vértices dos grafos fazendo checagens e marcando os vértices visitados.

Para se fazer as visitas desejadas, o algoritmo utiliza o método de busca abrangente ao grafo que se assemelha ao método de largura e profundidade de grafos apresentado nos capítulos anteriores. Entretanto, o problema deste trabalho não apresenta ordem combinatória, na qual se deseja obter soluções ótimas de caminho, e busca de mínimos e máximos, por exemplo. O objetivo é apenas se fazer visitas de forma não necessariamente ordenada aos vértices do grafo, determinando-se quais arestas devem representar modificação de status de chave. O algoritmo ainda deve contemplar buscas por todos os tipos de grafos, sejam eles grafos simples, bipartidos, em árvore, cíclicos, entre outros.

A vantagem da utilização de grafos é a analogia que se pode fazer com a rede de distribuição. A simples atribuição das chaves a uma aresta do grafo configurando as conexões e características topológicas da rede facilitam a compreensão e o tratamento do problema. Além disso, da forma como o algoritmo é proposto neste trabalho, ele pode retornar o plano de manobras sem que haja a necessidade de se percorrer o grafo por completo, economizando assim tempo computacional.

O método de isolamento de faltas publicado por Wang (2011) propõe a utilização da representação de grafo em matriz adjacência para que seu algoritmo retorne os devidos chaveamentos que determinam o isolamento da falta. Todavia, dependendo do tamanho do sistema analisado, as operações com matrizes podem durar um tempo que pode não ser hábil para que o problema seja resolvido da forma ágil devido ao crescimento exponencial do tempo em operações com matrizes de ordem elevada.

Com base nos métodos de busca em grafos, o algoritmo de isolamento de faltas foi desenvolvido e adaptado às restrições e necessidades para esta aplicação, procurando evitar a obtenção de soluções por resolução matricial.

5.3 METODOLOGIA

Como já mencionado, a representação da rede em grafos é uma maneira eficiente para resolver o problema de isolamento e reconfiguração da rede. Para fazer o isolamento de determinadas regiões da rede assim que o GC a cada bloco de carga é associado, o algoritmo criado para esta finalidade de busca é responsável por fazer uma varredura nos vértices determinando quais blocos de carga ainda podem ser alimentados.

O algoritmo inicia a varredura a partir do bloco de carga que possui injeção de potência no sistema. Nas redes nas quais se deseja aplicar o algoritmo de isolamento, estes blocos de carga são as regiões que contém uma ou uma fonte de geração de energia elétrica, e é responsável por distribuir a energia para as demais regiões. Mesmo o algoritmo sendo capaz de tratar o problema em redes com geração distribuída e topologia em anel, esta é uma restrição que se considera, pois será utilizada a premissa que a rede é radial e não possui multigeração e/ou outros elementos que injetam energia na rede. Embora a representação visual dos grafos possa indicar a existência de circuitos, os estados das chaves devem ser definidos de tal maneira que a radialidade dos alimentadores seja garantida.

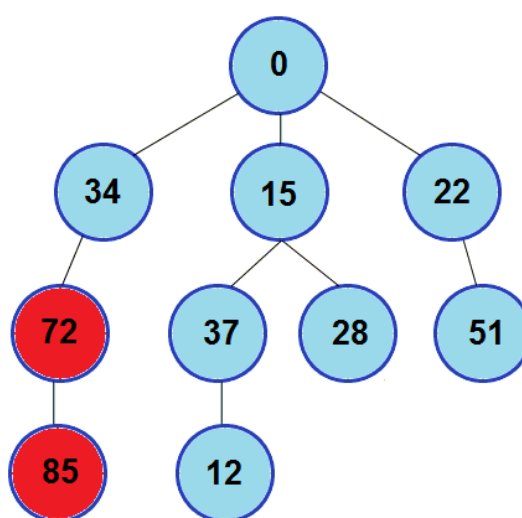
A partir do momento em que se inicia a varredura na rede, o algoritmo se encarrega de verificar todas as arestas contidas no vértice associado ao bloco de carga com injeção de potência. A partir deste ponto, o algoritmo tem a capacidade de verificar quais vértices estão interconectados com o vértice inicial, uma vez que a cada chave lógica estão associados dois blocos de carga, informação esta prévia e pré-estabelecida ao carregar os dados de cadastro da rede pelo banco de dados. Portanto, o algoritmo sabe quais vértices são possíveis de serem verificados a partir do primeiro.

Ao se obter os possíveis vértices visitáveis, é necessário comparar o LGC determinado pelos operadores da rede. Esta comparação é feita a partir das possíveis visitas a partir de um vértice para determinar se os próximos ainda poderão ser alimentados. Em um exemplo, se um vértice contendo GC menor que o LGC tenta visitar um vértice que contém GC igualmente menor que o limiar, este vértice é marcado como *energizável*. Em contrapartida, se o vértice tenta visitar outro que contenha GC maior que o LGC, este vértice é marcado como *não*

energizável. A Figura 10 mostra uma representação de vértices que excedem o LGC, e que por consequência estão marcados em vermelho como não energizáveis.

À medida que os vértices são marcados como energizáveis, os mesmos são adicionados a uma pilha. Esta pilha contém os vértices dos quais devem se verificar as subsequentes visitas. Ou seja, o vértice com injeção já é previamente inserido nesta pilha e os vértices energizáveis são incluídos na pilha no ato que se verifica o status de energizável.

Figura 10 - Representação dos blocos de carga hipotéticos que devem ser isolados



Fonte: O AUTOR

À medida que a pilha é totalmente percorrida e não há mais vértices a serem visitados, energizados e, portanto, adicionados a ela, o algoritmo passa para outra etapa que é determinar quais serão os chaveamentos necessários. Determina-se que as arestas que estão entre dois vértices com GC maior e menor que o LGC (não importando a ordem) contenham a informação de status das chaves alterada para aberto, determinando a desconexão elétrica dos blocos de carga. Entre os vértices definidos como não energizáveis, o status das chaves deve ser mantido inalterado, e por fim, entre os vértices que detêm o status de energizáveis existem duas situações. Para uma primeira situação em arestas já previamente definidas entre dois vértices energizáveis, a aresta deve ser obviamente mantida e, portanto, o mesmo acontece com o status da chave. Em uma segunda situação em que há uma visita, se é determinado que é possível alimentar um vértice a partir de outro com o

qual inicialmente não havia conexão elétrica, determina-se que é possível se fazer uma manobra de recomposição topológica do sistema, e o valor da aresta correspondente à chave é alterado para fechado, mas sua informação é salva em uma estrutura paralela, por haver a necessidade de se fazer uma análise de contingências e de condições pré-falta a serem observadas.

A alteração de status de chaves inicialmente abertas para fechadas define o que se chama de reconfiguração do sistema. Embora o algoritmo não determine as manobras de fechamento, se encarrega de verificar se há a possibilidade de se fazer uma alimentação por outros trechos da rede de distribuição. O algoritmo trata o problema de isolamento e auxilia no problema de reconfiguração do sistema de forma única, uma vez que ele tem condições de determinar se as chaves deverão ter seus status alterados de fechado para aberto e vice-versa. A verificação da reconfiguração do sistema se conclui parcialmente ao considerar outros vértices com injeção. Desta forma, há a possibilidade da interconexão de subgrafos que representam partes a priori distintas da rede de distribuição, mas que se apoiam para eventuais situações em que seja preciso recorrer às manobras para se recuperar a distribuição parcial de energia em alguns setores.

O fluxograma do algoritmo (APÊNDICE A) implementado mostra detalhadamente o que foi descrito nos parágrafos acima. A partir dele, o entendimento de quais operações são feitas pelo algoritmo é facilitado.

6 RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados do algoritmo proposto, foram utilizados três tipos de sistemas teste de distribuição. São sistemas de teste do IEEE⁴ adaptados. Os testes consistem na atribuição de graus de confiança aos blocos de carga assim que eles são criados a partir de uma estrutura auxiliar, execução do algoritmo sobre o sistema com as suas informações topológicas da rede e status iniciais das chaves, avaliação do plano de manobras para a condição dada, e o tempo de execução do algoritmo desde a entrada dos dados até a obtenção do plano de manobras.

São sistemas apresentados contendo 4, 13 e 123 nós. Estes sistemas são apresentados contendo todos os parâmetros elétricos que caracterizam uma rede de distribuição. Entretanto, estes parâmetros serão desconsiderados, e alterações serão feitas com o propósito de aumentar a complexidade dos sistemas, e portanto, a possibilidade de se obter mais opções de isolamento de faltas. Estas opções são possíveis substituindo-se trechos por chaves *Normalmente Fechadas* (NF) ou *Normalmente Abertas* (NA) entre os nós da rede de distribuição.

Os testes com o sistema de 4 nós tem o intuito de validar os resultados do algoritmo de isolamento de faltas da forma como ele é proposto, de maneira simples. O teste com o sistema de 13 nós tem o mesmo propósito de validar o resultado, considerando que a busca no grafo contempla todos os vértices que ainda podem ser alimentados. O teste com o sistema de 123 nós apresenta mais de uma subestação e alimentadores, e há interconexão entre trechos dos alimentadores por meio de NAs, de modo que haja a possibilidade de um trecho desenergizado ser alimentado por outro alimentador, e o chaveamento seja feito de forma adequada.

Os testes feitos são baseados na associação de graus de confiança definidos aos blocos de carga dos sistemas. Para comprovar o desempenho do algoritmo, o autor atribui GC arbitrários com o intuito de validar o resultado do algoritmo na determinação do plano de manobras, observando-se o isolamento adequado da porção da rede onde se localiza uma falta permanente. É necessário observar se o número mínimo de chaveamentos é obedecido de acordo com a condição imposta.

⁴ (Fonte: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>)

Para a realização dos testes, estes sistemas modificados foram modelados no software PSL® DMS. Este programa é um simulador de sistemas elétricos de distribuição, no qual é possível modelar uma rede de distribuição contendo todos os parâmetros elétricos dos elementos e dispositivos presentes. É possível também carregar curvas de consumo por faixa horária das cargas instaladas, e atribuir consumidores com características de consumo próprio aos transformadores de distribuição.

Ao salvar o modelo da rede, o software gera um arquivo em formato de script XML de extensão dst contendo o modelo da rede de distribuição. Este arquivo é lido por uma estrutura em software auxiliar de propriedade da empresa PowerSysLab Engenharia e Sistemas Ltda., responsável por fazer o processamento topológico da rede de distribuição. Este processamento, dentre outras funções, tem o objetivo de criar os blocos de carga da rede. O algoritmo que é apresentado neste trabalho recebe a informação dos blocos de carga, do cadastro técnico, da estrutura topológica da rede, e dos estados iniciais dos dispositivos de proteção. A atribuição dos graus de confiança como informação complementar aos blocos de carga é feita no início do algoritmo.

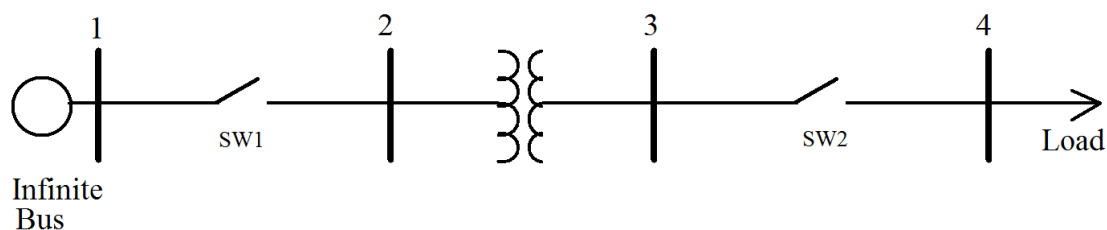
O algoritmo foi desenvolvido em linguagem de programação C++ utilizando o paradigma de programação orientada a objetos. Os resultados que serão apresentados fazem parte da inspeção das variáveis e vetores contidos ao longo do código em tempo de execução. O tempo transcorrido que é apresentado ao final de cada teste é baseado no tempo de execução do algoritmo em um computador da marca Dell® modelo XPS-L502X equipado com processador Intel® Core I7-2670QM com clock de 2,2 GHz.

O código fonte desenvolvido para as simulações deste algoritmo é apresentado no final do documento (APÊNDICE B).

6.1 TESTE COM SISTEMA DE 4 NÓS

O diagrama unifilar do sistema teste de 4 nós adaptado é apresentado na Figura 11.

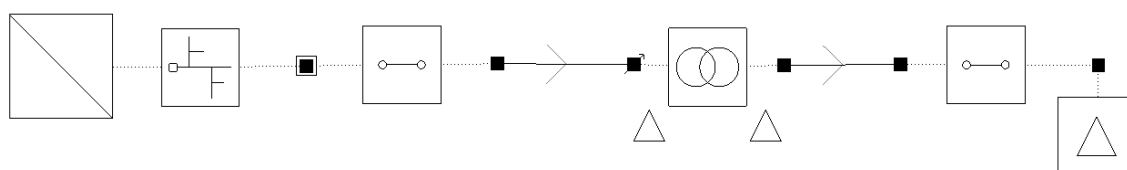
Figura 11 - Sistema teste de 4 nós



Fonte: Adaptado de IEEE

O respectivo sistema teste equivalente modelado no software PSL® DMS é apresentado pela Figura 12.

Figura 12 - Sistema teste de 4 nós modelado



Fonte: O AUTOR

Após esta estrutura ser carregada, o algoritmo recebe o sistema em questão e o índice LGC. Fazendo a inspeção das variáveis, obtêm-se os seguintes resultados.

Blocos de Carga: 3

Dispositivos lógicos: 2

A Tabela 1 apresenta a composição dos blocos de carga em relação aos nós dos quais o compõe, os graus de confiança a eles atribuídos e a informação de bloco de carga com injeção de potência.

Tabela 1 - Dados dos blocos de carga do sistema de 4 nós

Bloco de Carga	Nós	GC [%]	Bloco c/ Injeção
1	1	20	Sim
2	2, 3	20	Não
3	4	80	Não

Com o índice LGC selecionado em 50%, o algoritmo retorna o plano de manobras apresentado pela Tabela 2

Tabela 2 - Status de chaves para o sistema de 4 nós

Chave	Status Pré-falta	Plano de Manobras
SW1	Fechado	Fechado
SW2	Fechado	Aberto

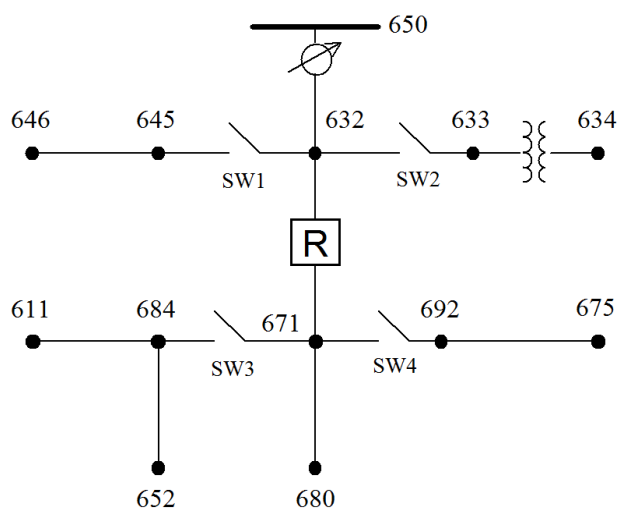
O tempo transcorrido para a obtenção do resultado

Tempo transcorrido = 31 microssegundos

6.2 TESTE COM SISTEMA DE 13 NÓS

O diagrama unifilar do sistema de teste de 13 nós adaptado com a adição de chaves e um religador representado pelo R inscrito no quadrado é apresentado na Figura 13.

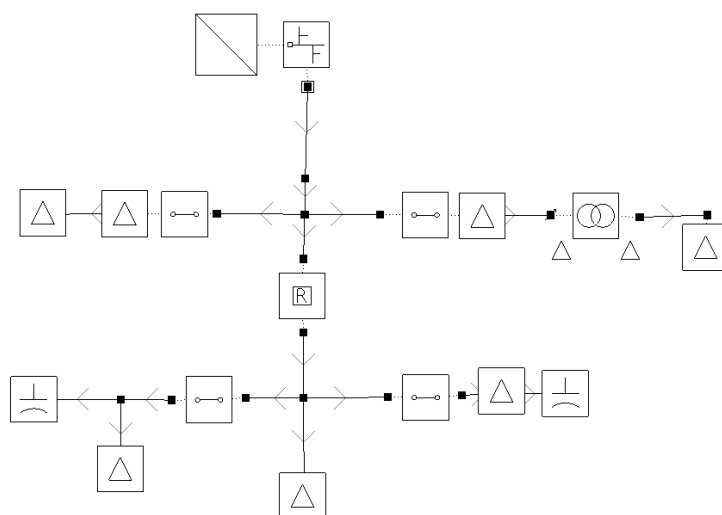
Figura 13 - Sistema teste de 13 nós



Fonte: Adaptado de IEEE

O sistema modelado equivalente é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Sistema teste de 13 nós modelado



Fonte: O AUTOR

A inspeção das variáveis que contém as informações relevantes após carregar o sistema de potência referido apresentam os valores a seguir.

Blocos de Carga: 6

Dispositivos lógicos: 5

A Tabela 3 apresenta os dados dos blocos de carga que são gerados, os graus de confiança a ele atribuídos, e a informação de geração.

Tabela 3 - Dados dos blocos de carga do sistema de 13 nós

Bloco de Carga	Nós	GC [%]	Bloco c/ Injeção
1	650, 632	20	Sim
2	646, 645	20	Não
3	633, 634	20	Não
4	671, 680	20	Não
5	611, 684, 652	80	Não
6	692, 675	20	Não

Como no teste apresentado anteriormente, o LGC é definido como 50%. O algoritmo retorna um plano de manobras que é apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Status de chaves para o sistema de 13 nós

Chave	Status Pré-falta	Plano de Manobras
SW1	Fechado	Fechado
SW2	Fechado	Fechado
SW3	Fechado	Aberto
SW4	Fechado	Fechado
R	Fechado	Fechado

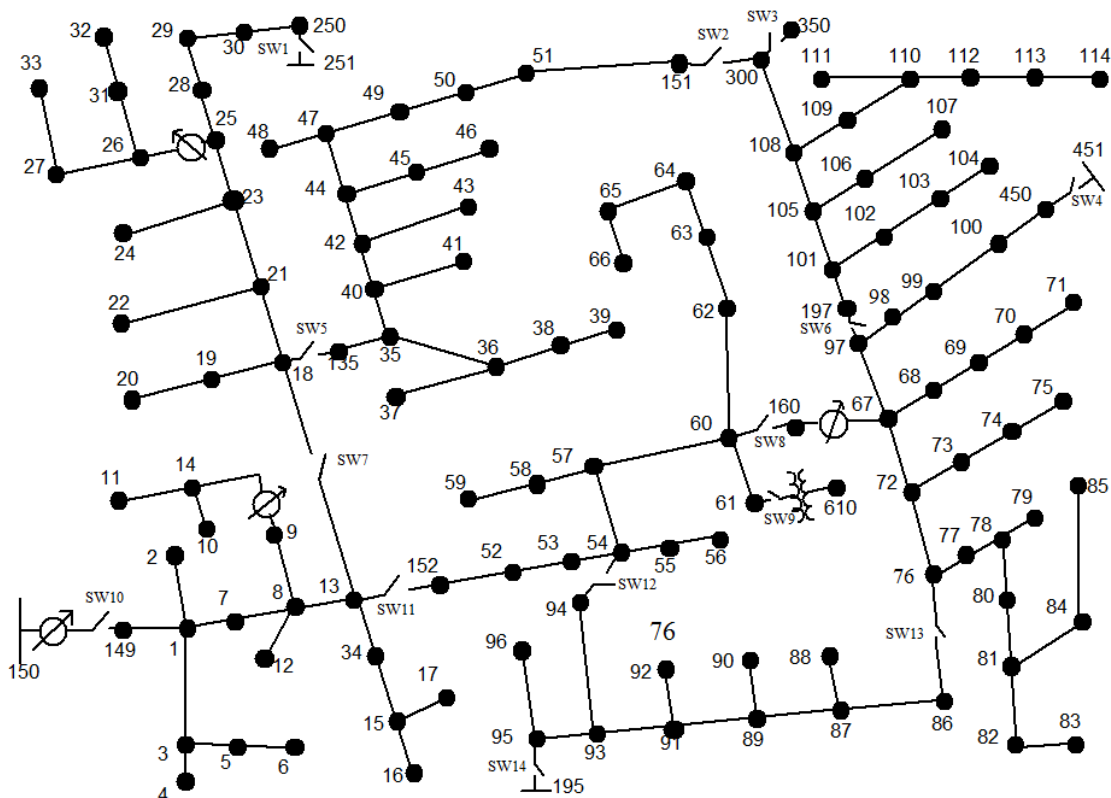
O tempo transcorrido para a obtenção deste resultado:

Tempo transcorrido = 63 microssegundos

6.3 TESTE COM SISTEMA DE 123 NÓS

O teste seguinte é feito com o sistema de 123 nós. A representação unifilar do referido sistema é apresentado na Figura 15.

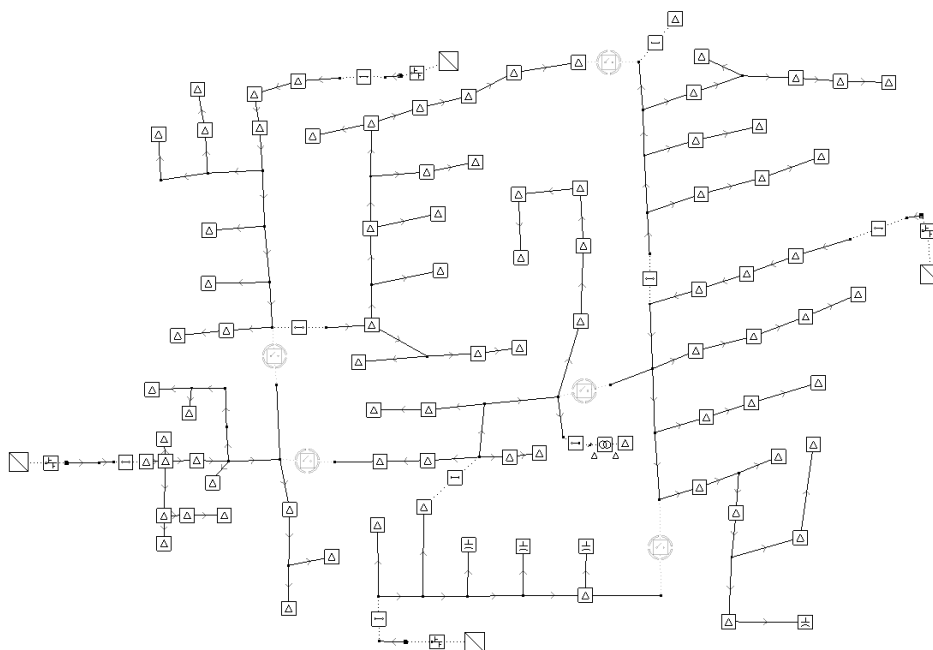
Figura 15 - Sistema teste de 123 nós



Fonte: Adaptado de IEEE

O sistema modelado equivalente é apresentado pela Figura 16

Figura 16 - Sistema de 123 nós modelado



Fonte: O AUTOR

Para este sistema maior, pode-se simular a situação de uma ocorrência de falta em um bloco de carga cuja desenergização afeta uma porção maior da rede a jusante da provável localização de faltas, e que poderia ser reconfigurada por alimentadores adjacentes a ela. Desta maneira, espera-se que a rede seja adequadamente isolada para que a reconfiguração do sistema seja possível de ser feita.

Para provocar esta situação, são atribuídos os seguintes graus de confiança para os blocos de cargas apresentados pela Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de blocos de carga do sistema de 123 nós

Bloco de Carga	Nós	GC [%]	Bloco c/ Injeção
1	150	20	Sim
2	195	20	Sim
3	251	20	Sim
4	451	20	Sim
5	1-17, 34, 149	20	Não
6	18-33, 250	20	Não
7	86-96	80	Não
8	67-85, 97-100, 160, 450	20	Não
9	101-114, 197, 300	20	Não
10	350	20	Não
11	36-51, 135, 151	20	Não
12	52-66, 152	20	Não
13	610	20	Não

De forma análoga aos testes apresentados anteriormente, ao se definir o LGC para o algoritmo, este retorna o plano de manobras apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Status de chaves para o sistema de 123 nós

Chave	Status Pré-falta	Plano de Manobras
SW1	Fechado	Fechado
SW2	Aberto	Aberto
SW3	Fechado	Fechado
SW4	Fechado	Fechado
SW5	Fechado	Fechado
SW6	Fechado	Fechado
SW7	Aberto	Aberto
SW8	Aberto	Aberto
SW9	Fechado	Fechado
SW10	Fechado	Fechado
SW11	Aberto	Aberto
SW12	Fechado	Aberto
SW13	Aberto	Aberto
SW14	Fechado	Aberto

O tempo transcorrido do início ao término do algoritmo de isolamento:

$$\text{Tempo transcorrido} = 245 \text{ microssegundos}$$

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos testes feitos demonstram que o plano de manobras retornado é adequado para que seja feito o isolamento marginal da porção faltosa da rede. Os dois primeiros testes demonstram que como não há a possibilidade de uma reenergização dos blocos de carga afetados a jusante da provável localização da falta, as manobras são estipuladas apenas para que a falta seja eletricamente desvinculada do sistema.

Para o caso do teste realizado no sistema de 123 nós foi definido um cenário em que os algoritmos identificam a localização de uma falta em um bloco de carga que além de desenergizar uma porção a jusante do estimado ponto de curto-circuito, esta porção apresenta possibilidades de reconfiguração. Desta forma, é necessário que o algoritmo não só isole o problema da rede, como também isole o problema das outras partes sadias da mesma. Portanto, de acordo com o resultado obtido, ao se determinar a abertura das chaves SW12 e SW14, o sistema apresenta possibilidades de reconfiguração do bloco sadio desenergizado por meio do chaveamento das chaves SW8 e SW11.

Finalmente, como o bloco de carga 13 do mesmo sistema também é afetado pela desenergização, o algoritmo alcança o vértice que representa este bloco por meio dos blocos 1 e 4, e portanto a chave SW9 mantém seu status inalterado, o que está de acordo com o proposto, uma vez que os dois blocos de carga interligados por ela estão na mesma situação em relação ao fornecimento de energia elétrica.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um algoritmo que oferece suporte aos operadores de sistemas de distribuição para a resolução de um problema comum em sistemas de potência. Situações de faltas elétricas podem ser resolvidas com a atuação de dispositivos de proteção automatizados e coordenados entre si para que faltas elétricas sejam isoladas. Entretanto, a obtenção de um plano de manobras demonstra ser um método mais abrangente por considerar todos os elementos lógicos de um sistema de distribuição e pela possibilidade de utilização tanto em sistemas robustos com muitos dispositivos de automação instalados quanto em sistemas de infra estrutura limitada.

Propor a integração e utilização deste tipo de algoritmo em um sistema real aumenta a autonomia da rede de tomada própria de decisões. O plano de manobras que se obtém como resultado do algoritmo de isolamento pode determinar a atuação dos dispositivos lógicos remota e instantaneamente. Para que isto seja possível, exige-se o aprimoramento do algoritmo para considerar situações que contornem as restrições assinaladas neste trabalho.

Por se tratar de um algoritmo computacional, ele é fortemente dependente do cadastro técnico da rede, e das informações que são coletadas por ele. Uma vez que o cadastro não esteja de acordo com a situação real da rede instalada, os chaveamentos podem ser determinados de forma equivocada, e as avarias podem ter proporções maiores do que as esperadas. Portanto, é de necessidade extrema que as concessionárias mantenham atualizado seus cadastros técnicos, e que contenham todas as informações relevantes disponíveis.

Por fim, é necessário que os dados de entrada do algoritmo sejam confiáveis para que o algoritmo possa obter o resultado adequado. Resolver o problema de isolamento da forma como é proposto por este trabalho envolve a coleta de muitos dados da rede de distribuição. Dentre os já mencionados com frequência como a situação pré-falta das chaves, é necessário confiar nos dados que um algoritmo de suporte oferece ao estabelecer os devidos graus de confiança aos blocos de carga. A integridade destes dados recebidos remotamente deve ser considerada, e assim

que possível mantida em níveis elevados de qualidade, sem os quais, não há a possibilidade de validação do que se obtém como resultado.

Os trabalhos futuros têm como objetivo desenvolver técnicas que melhorem o processo, diminuindo o tempo de execução do algoritmo. Os testes apresentados por este trabalho apenas validam o que o trabalho propõe, mas em uma situação real de obtenção de plano de manobra, o algoritmo teria de lidar com sistemas verdadeiramente grandes, e por consequência, grafos muito maiores contendo centenas ou milhares de vértices e arestas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AGÊNCIA CANAL ENERGIA, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO. **Canal Energia**. Disponível em <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Operacao_e_Manutencao.asp?id=87324>. Acesso em: 23 set. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Por Dentro da Conta de Luz da CEEE**. Parte II. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/cartilha_CEEE_partell.pdf>. Acesso em 23 set. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 345/2008**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8. Brasília, 2008.

AHMED, M. M. **New Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Based Fault Isolation System for Low Voltage Distribution Systems**. IEEE. International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia: Maio, 2010.

BIGNUCOLO, F. *et al.* **Fault Isolation in Overhead Distribution Networks: New Developments in Outdoor Fault Detectors**. CIRED. 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, Czech Republic: Junho, 2009.

BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph Theory with Applications**. 2nd ed. New York, USA: North Holland, 1982.

GONG, Y.; GUZMÁN, A. **Integrated Fault Location System for Power Distribution Feeders**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 49, Issue: 3. Junho, 2013.

GORAJ, M.; LIPES, L.; MCGHEE, J. **IEC 61850 Goose Over WiMAX For Fast Isolation And Restoration of Faults in Distribution Networks**. CIRED. 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, Germany: Junho, 2011.

IEEE PES DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE'S DISTRIBUTION TEST FEEDER WORKING GROUP. **Power & Energy Society**. Disponível em <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acesso em: 22 out. 2013.

KERSTING, W, H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Electric power engineering series. Boca Raton, Florida. CRC Press LLC. 2002.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NICHOLS, R. S. **The first electric power transmission line in North America-Oregon City, Oregon**. Industry Applications Magazine, IEEE. Agosto. 2003

OLIVEIRA, T. C. *et al.* **Analysis of the Relation Between Voltage Sags Severity and Fault Characteristics.** IEEE. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo: Setembro. 2010.

SALIM, R. H. *et al.* **Hybrid Fault Diagnosis Scheme Implementation for Power Distribution Systems Automation.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, p. 1846-1856. Junho, 2008.

SANTOS, T. T. *et al.* **Fault Identification Using Multiple Information Sources in Smart Distribution Grids.** CIRED. 22nd International Conference on Electricity Distribution. Stockholm, Sweden: Junho, 2013.

SZWARCFITER, J. L. **Grafos e Algoritmos Computacionais.** Rio de Janeiro: Campus, 1984.

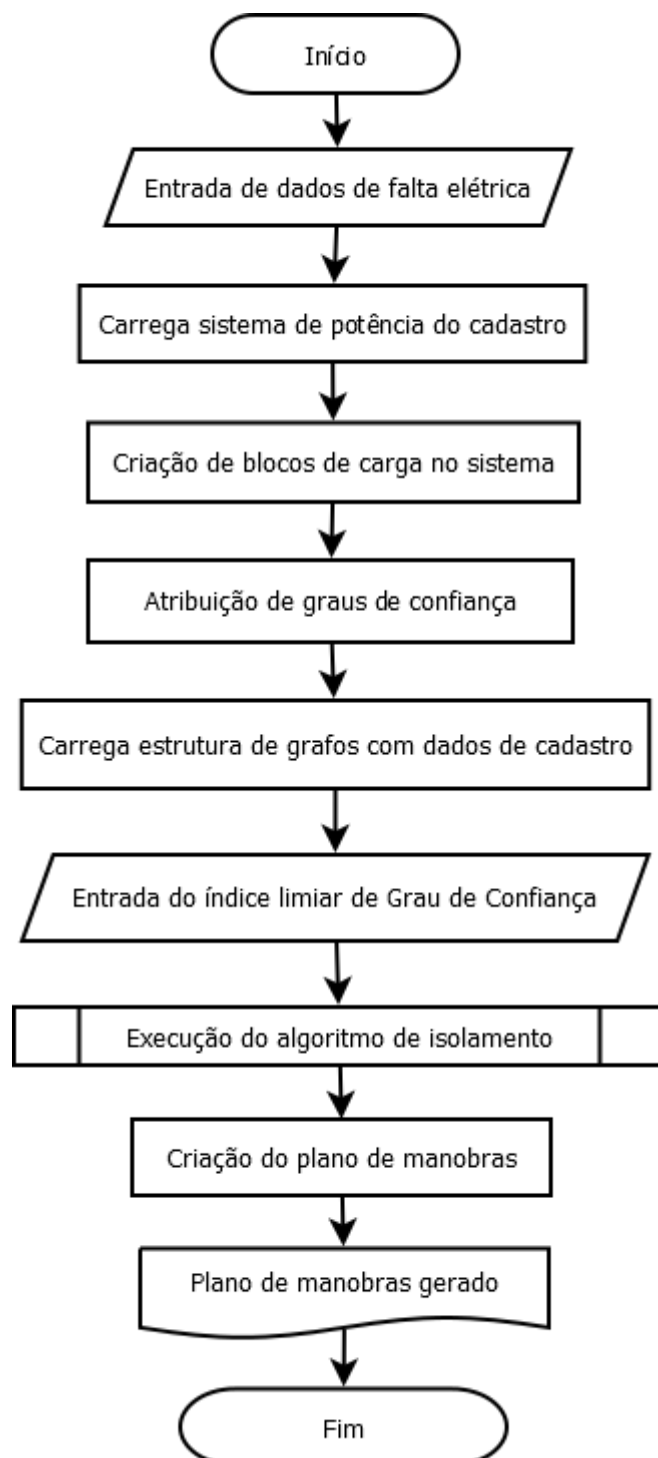
WANG, H. *et al.* **A Fault Detection and Isolation Algorithm for Distribution Systems Containing Distributed Generations.** IEEE. The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Outubro, 2011.

ZHANG, H.; TIAN, Z.; ZHANG, E. **An Improved Algorithm for Fault Location in Distribution Network.** IEEE, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China. Abril, 2008.

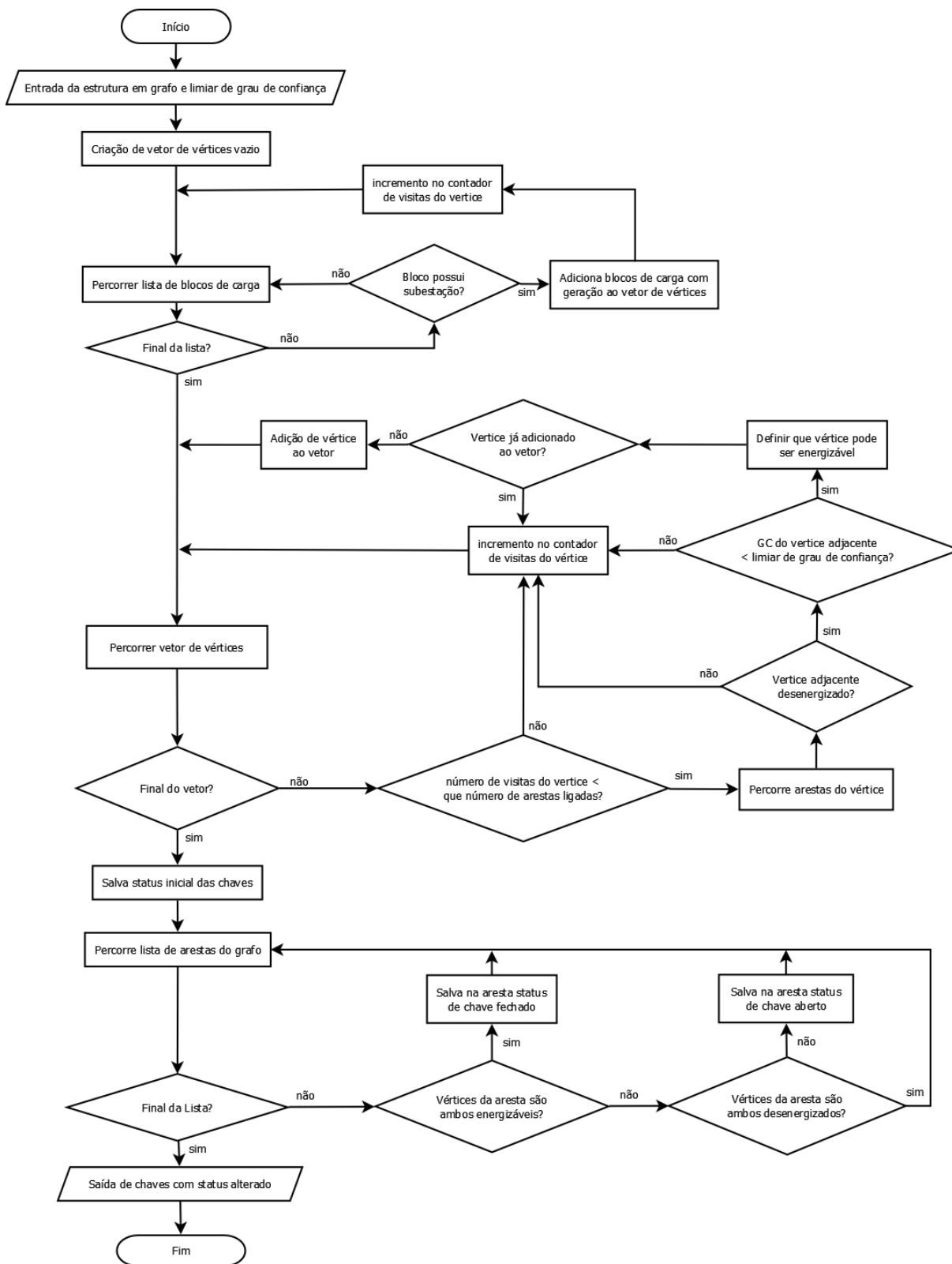
ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. **Automated Fault Location And Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2. Abril, 1997.

ZIMMERMAN, K.; COSTELO, D. **Impedance-Based Fault Location Experience.** IEEE 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington. Outubro, 2004.

APÊNCIDE A – FLUXOGRAMAS DO ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS



Fluxograma do subprocesso “Execução do Algoritmo de Isolamento”



APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE EM C++ DO ALGORITMO DE ISOLAMENTO DE FALTAS ELÉTRICAS

Código-fonte do método SetupReconfigPlan

```

SFSwitchPlan SFEngine::SetupReconfigPlan(double degreeOfTrust)
{
    //Criação de objetos
    SFSwitchPlan switchPlan;
    SFGraph graph;

    //Algoritmo percorrendo os blocos de carga do sistema de potência carregado
    //Atribuição de graus de confiança e adição do bloco de carga e chaves ao grafo
    for (auto itLoadBlock = powSys->GetLoadBlocks().begin(); itLoadBlock != powSys-
>GetLoadBlocks().end(); ++itLoadBlock)
    {
        std::string loadBlockSwitches = "LoadBlock.";
        for (auto itLogics = (*itLoadBlock)->GetLogics().begin(); itLogics !=
(*itLoadBlock)->GetLogics().end(); ++itLogics)
        {
            loadBlockSwitches += (*itLogics)->GetName() + ".";
            graph.AddLogic(*itLogics);
        }

        std::cout << loadBlockSwitches << std::endl;
        double degreeOfTrust;
        std::cin >> degreeOfTrust;

        (*itLoadBlock)->SetFaultLocationIndex(degreeOfTrust);

        (*itLoadBlock)->SetName(loadBlockSwitches);
        graph.AddLoadBlock((*itLoadBlock).get());
    }

    // Montar a estrutura de grafos
    std::set<SFLoadBlock*> setLB = graph.GetLoadBlocks();
    for (auto itGraphLoadBlock = setLB.begin(); itGraphLoadBlock != setLB.end();
++itGraphLoadBlock)
    {
        for (auto itElectricalNode = (*itGraphLoadBlock)->GetEletricalNodes().begin();
itElectricalNode != (*itGraphLoadBlock)->GetEletricalNodes().end();
++itElectricalNode)
        {
            for (auto itLogic = (*itGraphLoadBlock)->GetLogics().begin(); itLogic !=
(*itGraphLoadBlock)->GetLogics().end(); ++itLogic)
            {
                if ((*itElectricalNode) == (*itLogic)->Terminal(1)->GetEletricalNode())
                {
                    (*itLogic)->SetLoadBlock01(*itGraphLoadBlock);
                }
                if ((*itElectricalNode) == (*itLogic)->Terminal(2)->GetEletricalNode())
                {
                    (*itLogic)->SetLoadBlock02(*itGraphLoadBlock);
                }
            }
        }
    }

    LARGE_INTEGER freq, start, stop;
    QueryPerformanceFrequency(&freq);

```

```

QueryPerformanceCounter(&start);

// Execução do algoritmo de isolamento
std::set<SFLogic*> logicsState = graph.Isolate(degreeOfTrust);
QueryPerformanceCounter(&stop);
std::cout << (stop.QuadPart - start.QuadPart)*1000000/freq.QuadPart << "
microseconds." << std::endl;

unsigned int order = 1;

// Criação do plano de manobras
for (auto itLogic = logicsState.begin(); itLogic != logicsState.end(); ++itLogic)
{
    SFSwitchPlanItem* switchPlanItem = new SFSwitchPlanItem((*itLogic),(*itLogic)-
>GetState());
    switchPlan.Add(switchPlanItem,order);
    ++order;
}
return switchPlan;
}

```

Código-fonte do método Isolate

```

std::set<SFLogic*> SFGraph::Isolate(double degreeOfTrust)
{
    std::vector<std::pair<SFLoadBlock*,size_t>> checkBlock;
    std::set<SFLoadBlock*> setLoadBlock = GetLoadBlocks();

    for (auto itLoadBlocks = setLoadBlock.begin(); itLoadBlocks != setLoadBlock.end();
        ++itLoadBlocks)
    {
        if ((*itLoadBlocks)->IsGenerator())
            checkBlock.push_back(std::make_pair((*itLoadBlocks),1));
    }

    for (auto itCheckBlock = checkBlock.begin(); itCheckBlock != checkBlock.end();
        ++itCheckBlock)
    {
        if (itCheckBlock->second <= itCheckBlock->first->GetLogics().size())
        {
            for (auto itCheckLogics = itCheckBlock->first->GetLogics().begin();
                itCheckLogics != itCheckBlock->first->GetLogics().end(); ++itCheckLogics)
            {
                if ((*itCheckLogics)->GetLoadBlock02()->GetFaultLocationIndex() <
                    degreeOfTrust && !(*itCheckLogics)->GetLoadBlock02()->CanBeFedeed())
                {
                    (*itCheckLogics)->GetLoadBlock02()->SetCanBeFedeed();
                    checkBlock.push_back(std::make_pair((*itCheckLogics)->GetLoadBlock02(),1));
                    itCheckBlock = checkBlock.begin();
                    itCheckLogics = itCheckBlock->first->GetLogics().begin();
                }
                else if ((*itCheckLogics)->GetLoadBlock01()->GetFaultLocationIndex() <
                    degreeOfTrust && !(*itCheckLogics)->GetLoadBlock01()->CanBeFedeed())
                {
                    (*itCheckLogics)->GetLoadBlock01()->SetCanBeFedeed();
                    checkBlock.push_back(std::make_pair((*itCheckLogics)->GetLoadBlock01(),1));
                    itCheckBlock = checkBlock.begin();
                    itCheckLogics = itCheckBlock->first->GetLogics().begin();
                }
                else if (itCheckBlock->second <= itCheckBlock->first->GetLogics().size())

```

```

        {
            ++itCheckBlock->second;
        }
    }
}

for (auto itLogics = _logics.begin(); itLogics != _logics.end(); ++itLogics)
{
    if ((*itLogics)->GetLoadBlock01()->CanBeFeeded() && (*itLogics)->GetLoadBlock02()-
>CanBeFeeded() || !(*itLogics)->GetLoadBlock01()->CanBeFeeded() && !(*itLogics)-
>GetLoadBlock02()->CanBeFeeded())
        /*do nothing*/;
    else
        (*itLogics)->SetState(LogicStateOpen);
}

std::set<SFLogic*> logicsToSwitch;
for (auto itLogics = _logics.begin(); itLogics != _logics.end(); ++itLogics)
{
    if ((*itLogics)->GetState() != (*itLogics)->GetNormalState())
        logicsToSwitch.insert(*itLogics);
}
return logicsToSwitch;
}

```