

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

JEFERSON TURATTI PRAMIO

**ESTUDO SOBRE SELF HEALING: Conceitos, Metodologias e
Aplicações em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2014

JEFERSON TURATTI PRAMIO

ESTUDO SOBRE SELF HEALING: Conceitos, Metodologias e aplicações em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Valmir Oliveira

CURITIBA
2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que nos faz acreditar que tudo é possível e nos proporciona todas as oportunidades da nossa vida. A minha família que, sempre é fundamental em todos os momentos da minha vida.

Ao professor orientador, Dr Valmir Oliveira que foi prestativo e paciente nos momentos decisivos deste trabalho.

A minha namorada e amiga Thaise, que foi fundamental pois proporcionou apoio e compreensão desde o início do trabalho até sua conclusão.

RESUMO

PRAMIO, Jeferson Turatti. **Estudo sobre self healing: conceitos, metodologias e aplicações em redes de distribuição de energia elétrica.** 117 f. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2014.

O sistema de distribuição de energia elétrica, por apresentar a característica de utilizar redes aéreas na maior parte de sua composição é susceptível a defeitos oriundos de interferências do ambiente externo. Com a regulamentação do setor de energia elétrica através da implantação de índices de controle de qualidade, surge a necessidade das concessionárias de distribuição investirem em soluções para atender aos critérios de qualidade. Entre os inúmeros fatores que podem beneficiar os índices, o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica é um fator que influencia diretamente nos índices. Com o intuito de realizar essa operação de maneira mais rápida e automática surge a possibilidade de desenvolvimento de sistemas de recomposição. Neste trabalho serão identificadas as principais técnicas utilizadas no desenvolvimento da reconfiguração do sistema. Em primeiro lugar é realizado a pesquisa dos sistemas de localização da falta, embora seja tratado na literatura como um problema distinto. Na sequência serão identificadas as técnicas utilizadas em sistemas ditos como de inteligência centralizada e também os classificados como de inteligência distribuída. Para finalizar serão extraídos da literatura técnica casos aplicados em concessionárias do Brasil, tanto de inteligência centralizada como distribuída.

Palavras-chave: Recomposição. Sistemas de distribuição. Self healing.

ABSTRACT

PRAMIO, Jeferson Turatti. Study on Self healing: **concepts, methodologies and applications in power distribution networks**. 117 f. Monograph (Specialization in Industrial Automation) – Federal University of Technology -Paraná. Curitiba, 2014

The electricity distribution system, due to its feature of using air networks in most of its composition is susceptible to defects arising from interference from the external environment. With the regulation of the electricity sector through the implementation of quality control indices, there is the need of the distribution companies invest in solutions to meet the quality criteria. Among the many factors that may benefit rates, the restoration of electricity supply is a factor that influence directly in an index. In order to accomplish this more quickly and automatically operation comes the possibility of developing recovery systems. In this work identified the main utilizes techniques in the development of system reconfiguration. First is performed the research of fault location systems, although the literature is treated as a separate problem. Following are identified the techniques used in such systems as centralized intelligence and also those classified as distributed intelligence. Finally will be drawn from technical literature cases applied to utilities in Brazil, both centralized intelligence and distributed.

Keywords: restoration; distribution systems; self healing

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	- Baixa Tensão
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
DAS	- Sistema de Automação de Distribuição (<i>Distribution Automatic System</i>)
DMS	- Sistema de Gestão da Distribuição (<i>Distribution Management System</i>)
MAE	- Mercado Atacadista de Energia
MT	- Média Tensão
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
RNA	- Rede Neural Artificial
SCADA	- Controle Supervisório e Aquisição de Dados (<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
SE	- Subestação
SIN	- Sistema Integrado Nacional
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
SMA	- Sistema Multi Agente
UTR	- Unidade Terminal Remota
SRA	- Sistema de Recomposição Automática

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração atual do sistema elétrico brasileiro	19
Figura 2 - Arquitetura típica de um sistema SCADA.....	21
Figura 3 - Religador automático.....	24
Figura 4 - Sequencia de operação do religador.....	25
Figura 5 - Representação básica do neurônio artificial.....	41
Figura 6 - Modelo neural <i>perceptron</i> multicamadas.....	44
Figura 7 – configuração do sistema de distribuição aplicado na simulação....	45
Figura 8 - Arquitetura de RNA utilizada no esquema de localização de falta .	46
Figura 9 - Representação das funções de pertinência	49
Figura 10 - Diagrama típico de um modelo de inferência Mandami.....	51
Figura 11 - Algoritmo do sistema de falta	55
Figura 12 - Circuito alimentador usado na simulação.....	56
Figura 13 - Inteligência centralizada	57
Figura 14 – Agente	68
Figura 15 –Campos classes do <i>electricalAgent</i>	69
Figura 16 - Sistema exemplo em sua configuração normal.....	73
Figura 17 - Falta entre as chaves A,B e C.....	73
Figura 18 - Chaves J e F fecham.....	74
Figura 19 - Sistema após a reconfiguração automática.....	75
Figura 20 - Rede de distribuição de Aquiraz.....	76
Figura 21 - Resultado da recomposição - falta em T7 e T12.....	77
Figura 22 - Resultado obtido pelo SRA após a recomposição.....	78
Figura 23 - Rede de distribuição.....	79
Figura 24 - Rede de distribuição do teste	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado obtido com relação ao tempo de processamento	66
Gráfico 2 - Intersecção das funções de pertinência e definição da área de soluções.....	81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA	10
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	12
1.3 PROBLEMA	13
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos específicos.....	14
1.5 JUSTIFICATIVA	15
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO	16
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO: AUTOMAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO	18
2.1 INTRODUÇÃO	18
2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	18
2.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	19
2.4 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	20
3 REGULAMENTAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO	26
3.1 REGULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO	28
3.2 INDICADORES DE CONTINUIDADE	30
4 SELF HEALING: CONCEITOS E METODOLOGIAS	33
4.1 INTRODUÇÃO	33
4.2 SISTEMAS DE RECONFIGURAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E SELF HEALING...35	
4.2.1 Localização do distúrbio no sistema de distribuição:.....	37
4.2.2 Redes neurais artificiais	40
4.2.2.1 Perceptron multicamadas.....	43
4.2.3 Lógicas Fuzzy	47
4.2.3.1 Teoria de conjuntos Fuzzy	48
4.2.3.2 Funções de pertinência	48
4.2.3.3 Sistema Fuzzy	49
4.2.3.4 Fuzzyficação	51
4.2.3.5 Base de regras e inferência Fuzzy	52
4.2.3.6 Desfuzzyficação	52
4.2.3.7 Rede neural ARTMAP Fuzzy	53
4.3 INTELIGÊNCIA CENTRALIZADA	57
4.3.1.1 Método da troca de trechos.....	58
4.3.1.2 Método baseado em laços	59
4.3.1.3 Método construtivo	59
4.3.1.4 Otimização: Objetivos e restrições	60
4.3.1.5 Metaheurísticas	63
4.4 INTELIGÊNCIA DISTRIBUÍDA.....	67

5 APLICAÇÕES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO BRASIL	71
5.1 SISTEMA DE RECOMPOSIÇÃO AUTOMÁTICA INTELLITEAM.....	71
5.1.1 Princípio de Funcionamento do Sistema	72
5.2 SISTEMA DE INTELIGÊNCIA CENTRALIZADA.....	75
5.2.1 Plataforma de simulação de Sistema de recomposição automática -Coelce..	74
5.2.2 Aplicação não comercial desenvolvida na concessionária aes sul	78
5.2.2.1 Metodologia para cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição.....	79
5.2.2.2 Metodologia proposta para operação automática de equipamentos telecomandos para reestabelecimento de energia elétrica	79
5.2.2.3 Metodologia proposta para escolha das chaves telecomandadas a serem manobradas a partir de análise multicritério.....	80
5.2.2.4 Aplicação	82
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o tema, o problema, a justificativa, os objetivos e as metodologias aplicadas deste trabalho.

1.1 TEMA

O modelo estatal empregado no sistema elétrico brasileiro, até a década de 90, estava desgastado, principalmente por falta de investimentos (ABREU, 1999). Com o intuito de captar recursos para este serviço de suma importância, o mercado de energia elétrica foi aberto para a competição comercial, uma dessas formas é a concessão (AGÊNCIA..., 2014). Para regulamentar o sistema elétrico brasileiro foram criados órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 1996.

A Aneel pode ser considerada a mediadora entre os agentes do setor elétrico e consumidores (AGÊNCIA..., 2014). Além disso, é responsável pela concessão, pela permissão e pela autorização de instalações e serviços de energia. Outra função importante da Aneel é referente a garantia da qualidade do serviço e exigência em investimentos (AGÊNCIA..., 2014).

A partir deste marco regulatório, o sistema de distribuição, o qual sofreu os maiores impactos da privatização, passou a responder pela regulamentação imposta pela ANEEL (BANCO..., 2004). Desta maneira, modificou-se a relação entre o consumidor e a concessionária, da qual foi exigido um acréscimo nos índices que representam qualidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica (ALDABÓ, 2001)

Até a criação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) no final de 2008, o sistema de distribuição de energia elétrica era orientado pela forma de resoluções, que apenas indicava as diretrizes para as concessionárias (AGÊNCIA..., 2014). Com a criação do PRODIST, as concessionárias passaram a responder por uma série de índices e indicadores que refletem a qualidade do serviço prestado, tais como DEC (Duração Equivalente de

Continuidade), FEC (Frequência Equivalente de Continuidade), DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), entre outros (AGÊNCIA..., 2014).

As condições observadas para avaliar a qualidade de serviço de distribuição de energia estão ligadas diretamente a continuidade do serviço e tempo de restabelecimento (CYRILLO, 2011).

O entendimento consolidado é de que o sistema elétrico de potência brasileiro deve fornecer energia elétrica aos usuários, com a qualidade adequada, no instante em que for solicitada, sejam usuários de grande ou pequeno porte. (KAGAN; BARIONI; ROBBA, 2005, p. 5).

Neste mercado, qualquer interrupção ou falha no sistema de distribuição de energia elétrica gera uma despesa para a concessionária que provê o serviço. A concessionária deve responder rapidamente aos problemas que ocorrem no sistema para que não seja penalizada pelo órgão regulador, ou seja solicitado ressarcimento de danos materiais por parte de consumidores atingidos pela falha (FALCÃO, 2010).

Além disso, há os custos envolvidos com as equipes de manutenção, para percorrer o trecho defeituoso e sanar o defeito. Também, os custos relativos às manobras de fechamento e abertura de chaves não automatizadas, que tem o objetivo de minimizar o número de unidades consumidoras atingidas mediante manobras na rede de distribuição (FALCÃO, 2010).

Dentro deste mercado competitivo e regulamentado, a automação da rede de distribuição surge como um recurso para reduzir os custos operacionais e diminuir o tempo de descontinuidade de fornecimento de energia elétrica. (FALCÃO, 2012).

Com a automação da rede de distribuição, obtém-se maior facilidade para modificar a configuração da rede, sendo possível operar os equipamentos de manobra e seccionamento remotamente, otimizando a operação do sistema. Contribuindo tanto para situações de contingência quanto para melhoria nos níveis de tensão e carregamento (KAGAN, OLIVEIRA, 1998).

Após a ocorrência de um defeito em uma rede de distribuição, o tempo necessário para que a concessionária realize as manobras para isolar o defeito e restabelecer o sistema para os trechos não atingidos pode levar de 50 a 80 min. Por outro lado, em sistema dotado de automação pode-se executar a mesma operação com tempo inferior a 1 minuto (STASZESKY, CRAIG e BEFUS, 2005).

Com o objetivo de maximizar as condições operativas do sistema de distribuição, a automação desse sistema deve suportar a formação de uma rede inteligente ou *smart grid*.

O conceito de redes elétricas inteligentes, ou *smart grids*, é a utilização de sensores de monitoramento, de telecomando, de automação desde a geração de energia até o consumo, visando otimizar a operação e utilização do sistema *elétricos* (GELLINGS, 2009).

Uma das funcionalidades incorporadas ao conceito de *smart grids* é o *self healing*. A definição desta funcionalidade é descrita por Falcão (2010, p.27)

Define-se um sistema “*self-healing*” (auto regenerável ou auto recuperável) como aquele capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de energia elétrica de forma automática (e em alguns casos de forma instantânea).

Nesse contexto, pode-se observar a importância no estudo e desenvolvimento de sistemas de *self healing*, otimizando a operação da rede de distribuição.

Na aplicação destes sistemas são encontradas diversas linhas de desenvolvimento, desde *grafcet* e aplicação de lógicas em *Ladder* para casos mais simplificados até desenvolvimentos com inteligência artificial, algoritmos genéticos e aplicações de lógicas Fuzzy.

Neste estudo serão apresentados os conceitos predominantes, as metodologias utilizadas e exemplos de aplicação de sistemas *self healing* em uma concessionária de distribuição.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Tendo em vista a complexidade do tema *smart grid*, o foco deste trabalho será unicamente voltado para o estudo de sistemas *self healing* utilizados em redes de distribuição. O trabalho será desenvolvido focando nas metodologias para a resolução do problema de reconfiguração do sistema de distribuição, sendo que o objetivo é estudar a teoria e os conceitos aplicados para o desenvolvimento do

algoritmo ou lógica. O algoritmo ou lógica aplicada para a solução não será detalhado, e por consequência não é objeto deste estudo.

Os requisitos de comunicação necessários para a aplicação do sistema *self healing* não serão estudados.

Serão levantadas aplicações práticas de *self healing* na rede de distribuição de energia, tendo como limitação o território nacional.

1.3 PROBLEMA

O sistema de distribuição de energia elétrica é susceptível a falhas transitórias ou permanentes, independentemente da causa, o sistema precisa ser restabelecido com rapidez e confiabilidade, isolando o trecho defeituoso e restabelecendo o fornecimento de energia para o maior número de consumidores possível. O descumprimento dos índices de qualidade e continuidade de fornecimento de energia elétrico produzem prejuízos financeiros e de imagem para as concessionárias. Com o intuito de minimizar os efeitos decorrentes das contingências, surge a possibilidade da utilização da automação da rede de distribuição. Nesse contexto, existe a possibilidade de realizar processos de restabelecimento do fornecimento de energia de forma automática.

Para implantação de tal solução é necessário que a rede seja dotada de alguns requisitos como: comunicação dos equipamentos em tempo real, dispositivos de manobra capazes de identificar eventos de sobrecorrente e sensoriamento da presença da tensão na rede de distribuição. Os requisitos dos dispositivos e também da rede de comunicação variam de acordo com a tecnologia que será empregada.

Para desenvolvimento de um sistema de reconfiguração, ou até mesmo a aquisição de uma solução de mercado, é necessário que o profissional seja dotado de conhecimento dos conceitos, nos métodos, nas premissas e nas aplicações. A dificuldade na busca dessas informações concentradas sobre este tema, é a oportunidade para o desenvolvimento desta pesquisa.

Nesse contexto, surge a possibilidade de avaliar o estado da arte e quais as propostas e metodologias aplicadas para desenvolver estes sistemas de *self healing*, e quais as aplicações práticas que estão em operação no Brasil ?

Surge então a possibilidade, aqui explorada, de pesquisar o estado da arte, no intuito de produzir material que concentre informações sobre sistemas de *self healing*, dentro do escopo delimitado.

1.4 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

1.4.1 Objetivo Geral

Pesquisar os conceitos, as principais metodologias utilizadas e as aplicações de *self healing* em uma concessionária de distribuição de energia

1.4.2 Objetivos específicos

- Apresentar a regulamentação existente sobre a qualidade de energia elétrica e dos serviços prestados;
- Pesquisar as metodologias utilizadas para sistemas de *self healing*;
- Identificar as correntes atuais na solução do problema;
- Identificar as etapas de um processo de sistema de *self healing* autônomo;
- Levantar os objetivos e restrições básicos na teoria de sistemas *self healing*;
- Levantar informações das aplicações em território nacional, comerciais e proprietárias;

1.5 JUSTIFICATIVA

Com o mercado de energia mais competitivo e a intensa fiscalização da ANEEL, surge a necessidade das distribuidoras buscarem um ponto ótimo na operação dos sistemas elétricos (FALCÃO, 2010).

Como a maior parte do sistema de distribuição é composto de linhas aéreas, ocorrem eventos que levam ao desabastecimento do consumidor, sendo assim as distribuidoras, com o objetivo de não extrapolar os índices de qualidade de energia, têm de buscar alternativas viáveis para reduzir o tempo de interrupção no fornecimento e o número de consumidores atingidos (STASZESKY, CRAIG e BEFUS, 2005).

Os sistemas de *self healing* são capazes de restabelecer o sistema de maneira eficaz e automática reduzindo o número de unidades consumidoras atingidas, diminuindo as perdas com a energia não transmitida. Outra contribuição, é obtida quando o sistema é capaz de restabelecer as cargas em tempo inferior a três (3) minutos, que é o prazo estabelecido pela, no módulo 8 do PRODIST, para expurgar a ocorrência nos cálculos dos índices de qualidade para a unidade consumidora atingida (AGÊNCIA..., 2014).

Este estudo tem a intenção de contribuir na busca de informações sobre *self healing*, servindo de maneira orientativa para profissionais envolvidos na aplicação e desenvolvimento de sistemas *self healing*, pois além da revisão bibliográfica contempla exemplos de aplicação.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa apresentada será de natureza científica aplicada, com propósito descritivo (GIL, 2010, p. 27).

O foco principal do estudo é abordar os métodos e as aplicações que são adotadas em sistemas de *self healing*.

Para atingir estes objetivos, será realizada uma breve revisão bibliográfica sobre sistemas de distribuição de energia e sua regulamentação.

A abordagem, sob o aspecto físico, será focada nos aspectos topológicos, dispositivos de manobra e demais equipamentos da rede que são necessários para a formação de um sistema *self healing*.

Quanto ao aspecto regulatório, será realizada a apresentação dos índices que serão beneficiados com as aplicações de *self healing*.

Em um segundo momento, serão estudadas as metodologias utilizadas para desenvolvimento de sistemas *self healing*, tais como redes neurais artificiais, algoritmos multicritérios, lógica fuzzy e outros.

Os estudos terão como fonte principal os artigos apresentados em seminários e livros referentes aos métodos aplicados.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para realização desta pesquisa e entender a motivação para o investimento em sistemas *self healing*, serão necessários aprofundamentos de maneira a entender os aspectos regulatórios que impulsionam tais investimentos, os quais serão estudados mediante consultas ao PRODIST (AGÊNCIA..., 2014).

Para esclarecer os principais conceitos e metodologias utilizadas em aplicações de *self healing* na rede de distribuição, a revisão bibliográfica terá como base Falcão (2010) e Gellings (2009).

Para o estudo dos métodos implementados em sistemas de *self healing* serão observados artigos de simpósios e seminários. Além disso, a utilização de teses que apresentam novos critérios para a tomada de decisão dos algoritmos de *self healing*.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será apresentado de acordo com a seguinte estrutura:

- **Capítulo 1 - Introdução:** serão apresentados o tema, as delimitações da pesquisa, o problema e a premissa, os objetivos da pesquisa, a justificativa, os procedimentos metodológicos e a estrutura geral do trabalho.
- **Capítulo 2 – Sistemas de distribuição:** será abordado a regulamentação do sistema de distribuição e também os equipamentos que são necessários para aplicar um sistema de *self healing*.
- **Capítulo 3 – Regulamentação:** será abordado a regulamentação do sistema de distribuição sob o aspecto de continuidade do fornecimento.
- **Capítulo 4 – Self Healing: Conceitos e Metodologia :** será abordado o tema *self healing* da forma conceitual e na sequência serão apresentados os métodos utilizados na resolução de problemas de *self healing*.
- **Capítulo 5 – Aplicações de Self Healing:** o foco deste capítulo será na apresentação de aplicações em redes de distribuição no Brasil, como foco principal o estado do Paraná.
- **Capítulo 6 – Considerações finais:** este capítulo trará uma conclusão sobre o estado da arte do sistema de *self healing*.

2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO: AUTOMAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro possui diversas peculiaridades e é de grande complexidade. Uma das premissas operativas é que a energia elétrica deve ser consumida no momento em que é produzida, pois no atual desenvolvimento tecnológico não é possível o armazenamento em grande escala de energia a um baixo custo. Por esse motivo, é necessária a interligação dos setores de geração, transmissão e distribuição (ABREU, 1999).

Neste capítulo é feita uma breve descrição do sistema elétrico de potência, com o enfoque no sistema distribuição, com o objetivo nos aspectos referentes a automação e a regulamentação.

2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema elétrico brasileiro adota um modelo que busca a formação de um sistema interligado, sendo possível o aproveitamento e consumo da energia gerada pelas empresas geradoras em qualquer ponto desse sistema interligado.

O sistema de distribuição é parte integrante desse sistema interligado e representa a parte final da trajetória da energia elétrica, ou seja, é a parte integrante deste sistema que está em maior proximidade com a unidade consumidora, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Configuração atual do sistema elétrico brasileiro
 Fonte: Coletânea Eletrotécnica, (2014).

2.3 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Segundo Moura (2010), o sistema de distribuição é integrado da seguinte maneira:

- Sistema de subtransmissão – é responsável pela interligação entre as subestações de transmissão de 230, 500, 750 kV e as subestações de distribuição, cuja tensão usualmente adotada é 69 kV ou 138 kV.
- Subestação (SE) – Ponto de interligação, utilizada para modificar os níveis de tensão, controlar níveis de tensão e carregamento, seccionar linhas de subtransmissão e distribuir a energia através dos circuitos alimentadores utilizando equipamentos de proteção e controle.
- Alimentadores de distribuição primários (MT) – conduz a energia até os consumidores atendidos em média tensão e também aos transformadores de distribuição.

- Transformadores de distribuição – transformadores que são responsáveis por abaixar o nível de tensão média tensão para um nível de consumo em baixa tensão.
- Alimentadores de distribuição secundários (BT) – Leva energia até consumidores atendidos em BT pelos transformadores de distribuição.

Os circuitos alimentadores de distribuição são aqueles que estão em consonância com a topografia das cidades, ramificando-se através de ramais alimentadores pelas ruas e avenidas conectando fisicamente o sistema de distribuição aos consumidores da energia elétrica (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

No Brasil o número de unidades consumidoras soma mais de 74 milhões, sendo que uma unidade consumidora corresponde a um único ponto de entrega de energia, ou seja, com medição individualizada (ASSOCIAÇÃO..., 2014).

Nesse contexto é possível perceber que existe uma demanda para que a rede de distribuição seja dotada de mecanismo de atuação automática, seja por atuação de um simples telecomando ou até mesmo evoluindo para sistemas de redes inteligentes.

2.4 AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A automação do sistema elétrico é formada pela integração entre os dispositivos de controle, medição, sensoriamento através de sistemas de comunicação e de computação que são responsáveis pelo controle e supervisão de um sistema de distribuição e transmissão de energia. Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) são os responsáveis pela supervisão e controle, cujo objetivo é o aperfeiçoamento da operação do sistema elétrico visando à redução de custos operativos (JARDINI, 1996).

No sistema de distribuição, o qual possui equipamentos geograficamente distantes, o SCADA é responsável pela integração dos principais componentes, como a estação mestre, Unidades Terminais Remotas (UTR), Sistema de Comunicação (SC) e a Interface Homem-Máquina (IHM).

Um sistema SCADA típico de arquitetura aberta é composto de forma modular, sendo que os módulos são interligados através de uma rede de dados redundante, conforme a Figura 2.

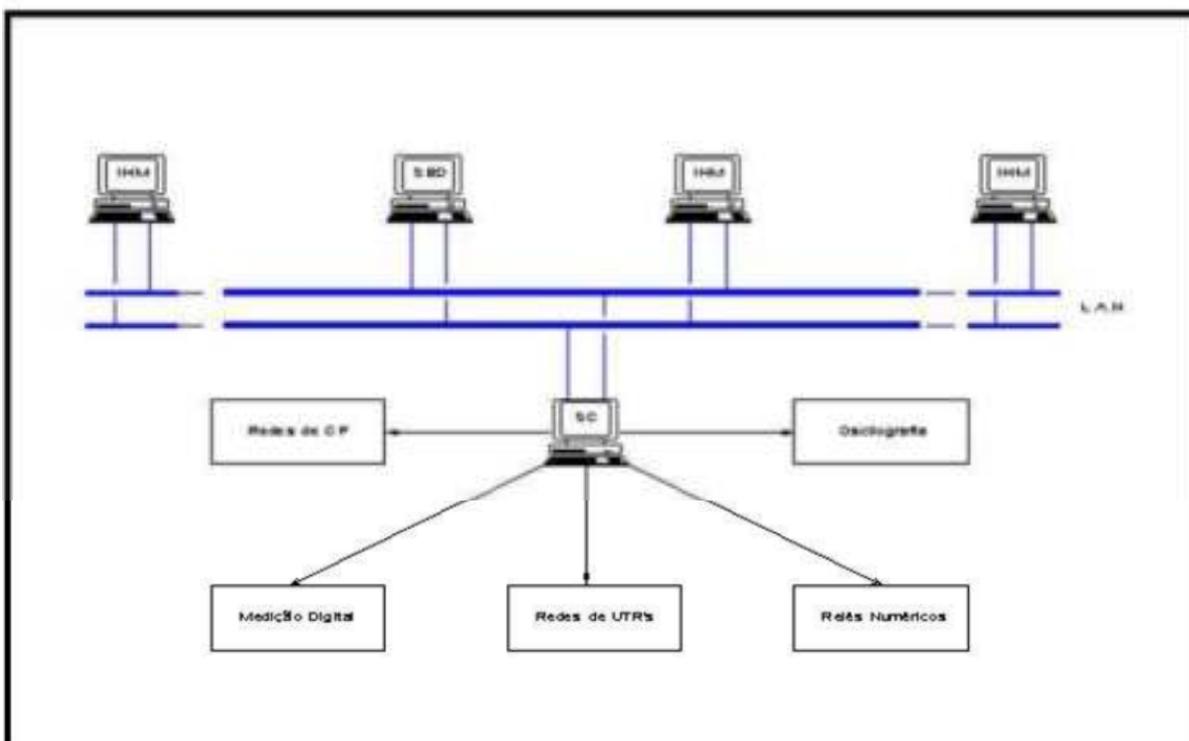


Figura 2 - Arquitetura típica de um sistema SCADA
Fonte: Lima (1998).

As UTRs são responsáveis pela aquisição dos dados e repassam para o banco de dados que disponibiliza as informações de maneira seletiva e ordenada através da rede de comunicação.

Com relação ao sistema SCADA, podemos destacar os seguintes componentes, de acordo com Gaushell e Block (1993) e Jardini (1996).

- Estação mestre – É um termo que se refere aos equipamentos responsáveis pela aquisição e formação de um banco de dados com as informações coletadas pelos equipamentos de campo, como as UTRs. O número de estações mestre varia de acordo com o tamanho do sistema SCADA.
- IHM (interface homem máquina) – Micro utilizado para visualizar dados de medição, estados das chaves e disjuntores e efetuar comandos, sendo responsável pela interação entre o operador e o sistema controlado.
- UTR (unidade terminal remota) – equipamento responsável pela aquisição de todos os dados de campo, repassando as informações para a estação

mestre. Além disso, distribuí os sinais de comando enviados pela estação mestre.

- Sistema de comunicação – é o termo utilizado para designar os diversos canais de comunicação entre a estação mestre e as unidades terminais remotas.

Um fator importante da rede de comunicação é a segurança por onde trafegam os dados de operação e controle do sistema de distribuição, por isso deve-se adotar procedimentos de controle de acesso e segurança da informação, pois nesta rede estão todos os dados e comandos dos equipamentos eletrônicos inteligentes - IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) (HECK et al, 2012).

Para o desenvolvimento da automação do sistema de distribuição a capacidade de comunicação entre as subestações e os equipamentos de proteção e controle instalados é fundamental, isto é, a disponibilidade e transferência dos dados e a operação dos equipamentos em tempo real é fator determinante no nível de automação desejado. A comunicação deve ter um nível de confiabilidade alto, visando que as informações tenham, de maneira confiável e rápida, condições necessárias para a operação do sistema elétrico. Com a junção das funções inerentes aos equipamentos locais a tomada de decisão, pode-se criar ferramentas de operação automática do sistema de distribuição. (NORTHCOTE-GREEN;WILSON, 2007).

O sistema de distribuição pode ter a automação dividida em automação das redes de distribuição de média tensão e das subestações de distribuição de energia. Com relação a automação das subestações, os equipamentos de proteção e controle estão situados dentro da subestação e são responsáveis por executar funções de maneira automática de proteção e controle. Os equipamentos também podem ser controlados através da utilização de um sistema SCADA instalado localmente na subestação e também a partir de um centro de operação da distribuição, o qual possui uma visão mais abrangente do sistema.

Já com relação à rede de distribuição nota-se que os equipamentos estão distribuídos pelos alimentadores troncos e derivações, sendo que devem estar dispostos em pontos estratégicos de controle e proteção, visando melhorar a operação e controle do sistema em casos de perturbação e em casos de restabelecimento do fornecimento de energia (DUARTE , 2008).

A automação dos sistemas de distribuição é um assunto de extrema importância para o setor elétrico, pois através destes mecanismos as concessionárias podem obter melhores resultados de desempenho, melhorando índices de qualidade de fornecimento de energia e também índices econômicos reduzindo os custos com as equipes para atendimento local (NORTHCOTE-GREEN; WILSON, 2007).

Entre os principais equipamentos do sistema de distribuição que são responsáveis pelo controle e proteção da rede de distribuição pode-se destacar os seguintes:

- Religador Automático

O religador é um equipamento de proteção que possui a capacidade de abertura e posterior fechamento de seus contatos automaticamente, isso ocorre a partir da detecção de um curto circuito no circuito em que esteja instalado, sendo capaz de repetir a operação inúmeras vezes (ALMEIDA, 2000).

O religador é projetado para atuar abrindo seus contatos em curto circuito ou sob carga, sendo comanda através das funções instantânea de proteção de sobrecorrente fase ou neutro e também pela função temporizada. O equipamento também possui a função de religamento automático. Além disso, existe a possibilidade de enviar comandos para o equipamento através de uma estação mestre do sistema SCADA.

O religador pode ser utilizado para proteção dos troncos alimentadores podendo ser instalado na saída do circuito na subestação e também posicionado ao longo do tronco alimentador, proporcionando seletividade na proteção da rede de distribuição (SILVEIRA; GALVANI E SOUZA, 2011). Este equipamento está ilustrado na Figura 3.

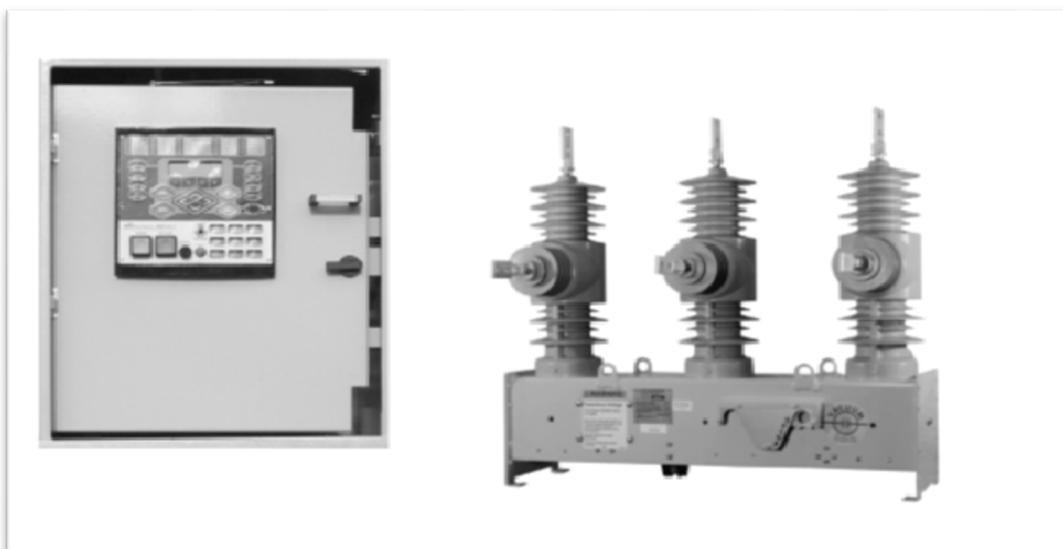


Figura 3 - Religador automático
Fonte: Cooper (2002).

Tais dispositivos possuem sistema interno de extinção do arco elétrico similar aos disjuntores, atualmente o sistema de isolação mais utilizado é o gás (SF₆). O início do ciclo de operação do religador é ao detectar uma situação de sobrecorrente suficiente para que ocorra a abertura o envio do sinal de comando de abertura para o mecanismo de operação. Após a abertura do mecanismo a função de religamento automático é acionada efetuando o fechamento. Caso o defeito no circuito seja transitório o equipamento permanece fechado, porém caso a falta seja permanente e o equipamento detecte novamente a sobrecorrente no circuito ocorre a segunda abertura do mecanismo. A partir deste momento o religador pode permanecer aberto e bloquear o seu religamento identificando o defeito como permanente, ou dependendo da configuração do número de tentativas de religamento o equipamento pode efetuar a tentativa de fechamento de acordo com o parâmetro ajustado. Na Figura 4 pode-se observar o ciclo de operação de um religador programado para efetuar três religamentos.

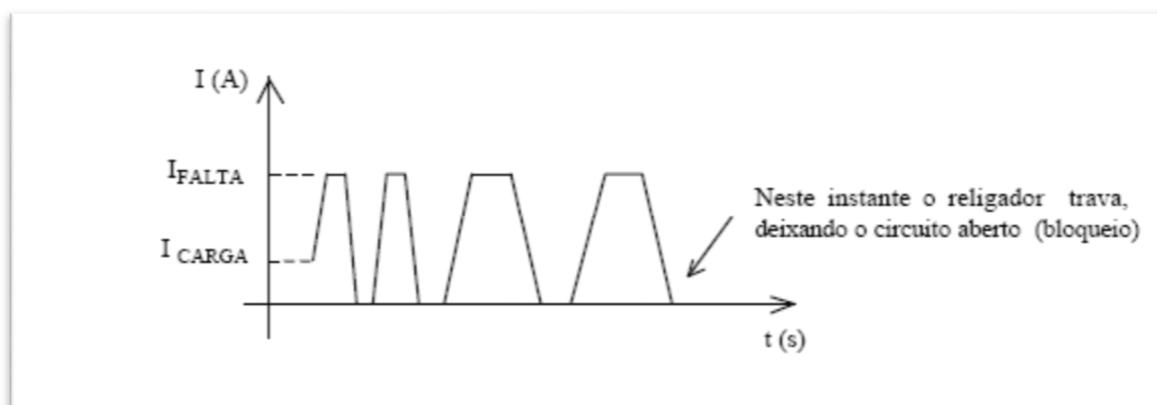


Figura 4 - Sequência de operação do religador
 Fonte: Almeida (2000).

Neste caso o que ocorre é que a falta identificada é permanente, sendo assim o religador efetua as tentativas de fechamento e ao executar o número de religamentos que está programado executa o bloqueio da operação e indica que o equipamento não executará mais nenhuma operação de forma automática.

- Chaves seccionadoras motorizadas

As chaves de operação seccionadoras motorizadas já dotadas de telecomando ou por procedimentos pré-determinados via programação, são equipamentos que aumentam a eficiência dos chaveamentos que são solicitados na rede de distribuição (NORTHCOTE-GREEN, J. 2007). As chaves de manobra devem possuir a capacidade de manobra em carga e de operação telecomandada. Para realizar as operações com carga, este dispositivo de seccionamento deve ser dotado de método de interrupção semelhante ao dos encontrados nos disjuntores. Para operação com carga, de uma maneira geral, os dispositivos de chaveamento/seccionamento dependem de um método de interrupção de corrente. Um dos sistemas mais utilizados para a extinção do arco elétrico é a isolação pelo gás SF₆, pelo fato de trabalhar com distâncias menores, reduzindo o tamanho do equipamento final. Em aplicações como a rede de distribuição aérea, a utilização destas chaves montadas em postes, tem apresentado alta confiabilidade operando em climas adversos e proporcionando baixo índice de manutenção (FERREIRA, 2010).

- Banco de capacitores

Equipamentos que proporcionam a redução das perdas de energia e elevação da tensão do sistema. Esses equipamentos proporcionam ao sistema uma melhor regulação do sistema elétrico, redução de perdas, correção do fator de

potência, redução de perdas por efeito Joule. O controle de atuação de um banco de capacitor pode ser através de um comando direto de operação de uma estação mestre do sistema SCADA, ou através de controle automático sendo ajustado para que atue observando o nível de tensão ou pelo nível potência reativa capacitiva do circuito (MAMEDE, 2011).

- Reguladores de tensão

Equipamento cuja função principal é controlar os níveis de tensão em patamares adequados através da comutação de taps dos transformadores. A grande importância está na qualidade do fornecimento de energia elétrica (MAMEDE, 2011).

3 REGULAMENTAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO

A década de 1990 marca profundas transformações no segmento de energia no Brasil, as mudanças são fruto do movimento de liberalização, ocorrido neste período. Durante muitas décadas o setor elétrico teve suas atividades estritamente verticalizadas (atuavam em geração, transmissão e distribuição) e estritamente regulamentadas e controladas pelo Estado. A reforma exigiu a reestruturação das companhias que passaram a ser divididas por atividade: geração, transmissão e distribuição. A distribuição e transmissão continuaram totalmente regulamentadas. A produção das geradoras passou a ser negociada no mercado livre – ambiente no qual as partes compradora e vendedora estabelecem contratos bilaterais que regem suas negociações (AGÊNCIA..., 2002).

Durante toda década de 1990 foram instituídos diversas leis, decretos e atos, de forma a dar prosseguimento às mudanças no modelo do setor elétrico. Segundo Ganin:

“...os principais marcos deste período são: Lei nº 8.987/1995, que dispôs sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art.175 da Constituição Federal; Lei nº 9.074/1995, que estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos, criando a figura do produtor independente; Decreto nº 1.717/1995, que tratou dos procedimentos para prorrogações das concessões; Decreto nº 2.003/1996, que regulamentou a geração de energia elétrica por produtores independentes e autoprodutores; Lei nº 9.427/1996, que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e disciplinou o regime econômico e financeiro das concessões de serviços públicos de energia elétrica; Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de

Gerenciamento de Recursos Hídricos; Lei nº 9.478/1997, que dispôs sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, e instituiu o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo” (GANIN, 2009, p.43).

Institucionalmente, além da criação da ANEEL, foram constituídos o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia (MAE), que mais tarde seria substituído pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. (AGÊNCIA..., 2008). A ONS é responsável pela coordenação da operação das usinas e redes de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da ANEEL.

Em dezembro de 2003, a Medida Provisória nº 144 foi convertida na Lei n.º 10.848, de 15.03.2004, e regulamentada pelo Decreto nº 5.163, de 30.07.2004. Deu-se início a outra reforma no setor elétrico brasileiro. Houve alteração na modalidade de comercialização de energia elétrica entre os agentes do setor elétrico participantes do Sistema Interligado Nacional – SIN. Foram instituídos dois ambientes para a efetivação de contratos de compra e venda de energia: o Ambiente de Contratação Regulada – ACR, ao qual estarão submetidas todas as concessionárias, permissionárias e autorizadas do serviço público de distribuição de energia elétrica, cujas operações se realizarão mediante leilões, com a participação dos agentes de geração; e o Ambiente de Contratação Livre – ACL, no qual ocorre a compra e venda de energia elétrica envolvendo os concessionários e autorizados de geração, comercializadoras e importadores de energia elétrica e os consumidores livres. (GANIN, 2009).

Por meio do mesmo instrumento legal, foram criados a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, com a finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica, em substituição ao Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE, bem como do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE, no âmbito do Poder Executivo e sob sua coordenação direta, com a função de acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o país. A Lei nº 10.847, de 18.03.2004, autorizou a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, que tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, ficando responsável pelo planejamento de curto, médio e longo prazo do setor elétrico. (GANIN, 2009)

Essas transformações caracterizaram a passagem do modelo monopolista para o de livre concorrência. Desde meados da década de 2000 todo mercado energético está aberto à livre competição. O Estado concentra-se essencialmente em formular as políticas energéticas e na regulação destas atividades. A elaboração de políticas e diretrizes para o setor energético está a cargo do Ministério de Minas e Energia (MME). A regulamentação e a fiscalização das referidas atividades, incluindo a operação do sistema interligado (função do ONS), são atribuições da ANEEL (AGÊNCIA..., 2008).

3.1 REGULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

No novo contexto do Sistema Elétrico Brasileiro, os segmentos de geração e comercialização atuam em um ambiente de livre concorrência, enquanto que a transmissão e distribuição de energia elétrica funcionam sob uma regulação para controlar a qualidade dos serviços e evitar preços abusivos.

A distribuição de energia se caracteriza como o segmento que entrega a energia elétrica para um usuário final. É a parte do sistema que se interrelaciona com o consumidor. Inicialmente, era suficiente e satisfatório ter acesso ao fornecimento de energia elétrica. Atualmente, os consumidores estão cada vez mais exigentes devido à essencialidade do serviço para o desenvolvimento econômico e o bem-estar social. Este novo cenário exigiu a criação de uma legislação específica que observasse a qualidade do serviço fornecido pelas empresas concessionárias de energia elétrica.

A regulação da distribuição da energia, sob a ótica da qualidade do serviço, tem dois principais marcos, o primeiro é a Portaria do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE - nº 46/1978, responsável por implementar a regulação do controle da continuidade do fornecimento de energia, introduzindo metas para os indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), e a Resolução ANEEL nº 24/2000, responsável pela adequação da regulação da continuidade ao novo contexto institucional.

A Portaria DNAEE tinha seu efeito prático bastante limitado em razão da inexistência de penalidades ao não cumprimento das metas. Com o surgimento da ANEEL, em substituição ao DNAEE, houve avanço significativo em razão de uma atuação mais vigorosa deste órgão. A Resolução nº 24/2000 da ANEEL reformulou os procedimentos de controle de qualidade. As concessionárias passaram a enviar os indicadores apurados à ANEEL e foram impostas penalidades pelo descumprimento das metas definidas (AGÊNCIA..., 2014).

Até a criação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) no final de 2008, o sistema de distribuição de energia elétrica era orientado por resoluções, que apenas indicava as diretrizes para as concessionárias (AGÊNCIA..., 2014). Com a criação do PRODIST, as concessionárias passaram a responder por uma série de índices e indicadores que refletem a qualidade do serviço prestado, tais como DEC (Duração Equivalente de Continuidade), FEC (Frequência Equivalente de Continuidade), DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), entre outros (AGÊNCIA..., 2014).

O PRODIST são documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (AGÊNCIA..., 2012). Tais documentos são elaborados pela ANEEL que conta com a participação dos demais agentes relacionados à distribuição de energia elétrica no Brasil.

A ANEEL estabelece limites para os indicadores de continuidade. Quando há violação desses limites, a distribuidora deve compensar financeiramente a unidade consumidora. A compensação é automática, e deve ser paga em até dois meses após o mês de apuração do indicador (mês em que houve a interrupção) (AGÊNCIA..., 2014).

A fiscalização do cumprimento dos indicadores de continuidade é uma atribuição da Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade (SFE). Caso a distribuidora não pague as compensações devidas aos consumidores, esta será submetida a penalidades previstas na Resolução nº. 63/2004, e poderá receber multa, de acordo com a avaliação da equipe de fiscalização, definida pela diretoria colegiada da Agência.

Até o ano de 2009, a compensação financeira, pela transgressão dos indicadores de continuidade se dava pela violação dos indicadores coletivos. A

legislação vigente utiliza como parâmetro a violação do limite de continuidade individual. (AGÊNCIA..., 2014)

3.2 INDICADORES DE CONTINUIDADE

A ANEEL e os consumidores podem avaliar a qualidade do serviço prestado bem como o desempenho do sistema elétrico por meio do cálculo dos indicadores de continuidade. O método de apuração dos indicadores é indicado no módulo 8 do PRODIST (AGÊNCIA..., 2012). Os principais indicadores são classificados como individuais e coletivos.

- Indicadores Individuais

São indicadores destinados a aferir a qualidade do serviço prestado diretamente ao consumidor.

Os indicadores DIC e FIC são definidos para períodos mensais, trimestrais e anuais. O limite do indicador DMIC é definido para períodos mensais. O limite do indicador DICRI é definido para cada interrupção em dia crítico.

DIC: Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ocorreu interrupção do fornecimento de energia elétrica.

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

FIC: Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): Número de interrupções no fornecimento de energia elétrica ocorridas em cada unidade consumidora ou ponto de conexão

$$FIC = n$$

DMIC: Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (DMIC): Tempo máximo de interrupção contínua de energia elétrica, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão.

$$DMIC = t(i)_{max}$$

DICRI: Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI): Duração de cada interrupção ocorrida em dia crítico, para cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

$$DCRI = t_{critico}$$

Onde:

i = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n ;

n = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;

$t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração;

$t(i)_{max}$ = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada, expresso em horas e centésimos de horas;

$t_{critico}$ = duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

- Indicadores Coletivos:

A ANEEL avalia a continuidade do fornecimento por meio de subdivisões das distribuidoras, denominadas Conjuntos Elétricos. Existem limites para indicadores associados a cada conjunto.

Ao longo do tempo, os indicadores vão sendo revisados e tornam-se cada vez mais rigorosos, a fim de melhorar a qualidade do serviço prestado ao consumidor. É a partir do DEC e do FEC que a ANEEL estabelece os indicadores individuais de continuidade (DIC, FIC e DMIC).

DEC: Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC): Intervalo de tempo que, em média, em cada unidade consumidora do conjunto elétrico, ocorreu interrupção do fornecimento da energia elétrica para o período considerado, mês, trimestre ou ano.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc}$$

FEC: Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC): Número de interrupções no fornecimento de energia elétrica que ocorreram, em média, em cada unidade consumidora do conjunto elétrico, para o período considerado, mês, trimestre ou ano.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC (i)}{Cc}$$

Onde:

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções;

i = índice de unidades consumidoras atendidas em baixa ou média tensão faturadas do conjunto;

Cc = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT e MT.

Segundo a ANEEL (2012, p.45), na apuração dos indicadores *DEC* e *FEC* devem ser consideradas todas as interrupções, admitidas apenas as seguintes exceções:

- i. falha nas instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros;
- ii. interrupção decorrente de obras de interesse exclusivo do consumidor e que afete somente a unidade consumidora do mesmo;
- iii. interrupção em situação de emergência;
- iv. suspensão por inadimplemento do consumidor ou por deficiência técnica e/ou de segurança das instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros, previstas em regulamentação;
- v. vinculadas a programas de racionamento instituídos pela União;
- vi. ocorridas em dia crítico;
- vii. oriundas de atuação de esquemas de alívio de carga solicitado pelo ONS.

No ano de 2013 os brasileiros ficaram, em média, 18,27 horas sem luz, de acordo com o balanço publicado na página eletrônica da Agência. O número ultrapassa o limite estipulado para o ano de 15,18 horas. Já com relação ao número de interrupções, ocorreram 10,49 contra o limite estabelecido de 12,47. A transgressão dos limites DEC e FEC não gera multa automaticamente, porém subsidia a ANEEL na programação das fiscalizações (AGÊNCIA..., 2014).

Os consumidores de energia elétrica receberam R\$ 346 milhões em compensação por interrupções no fornecimento de energia elétrica em 2013. Foram pagas 100,2 milhões de compensações pelo descumprimento dos indicadores individuais de Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC), Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC), Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC) e Duração da Interrupção Ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora (DICRI) (AGÊNCIA..., 2014).

4 SELF HEALING: CONCEITOS E METODOLOGIAS

4.1 INTRODUÇÃO

Os investimentos das concessionárias de energia na automação da rede de distribuição estão aumentando, pois neste mercado competitivo e regulamentado, a automação da rede de distribuição surge como um recurso para reduzir os custos operacionais e diminuir o tempo de descontinuidade de fornecimento de energia elétrica. (FALCÃO, 2012).

Os equipamentos utilizados para a automação possuem valores cada vez mais atrativos devido ao grande número de fabricantes e de novas tecnologias para os sistemas de comunicação. A tecnologia adotada para realizar o controle destes equipamentos é de suma importância, devendo ser analisada criteriosamente, pois existem diversos métodos e tecnologias para executar as funções de restabelecimento e controle da rede de distribuição de maneira automática.

A maior parte da rede de distribuição de energia é composta por condutores aéreos, sem proteção mecânica, estando assim desprotegida perante as

interferências do meio ambiente e contatos acidentais de galhos de árvores, aumentando consideravelmente o índice de falhas neste tipo de rede (AZEVEDO, 2010).

As intervenções e contingências não programadas na rede de distribuição acontecem a todo momento e causam prejuízos tanto para a concessionária, com as perdas de faturamento pelo não fornecimento de energia e também as multas impostas pelo órgão regulador, já para a sociedade, podem ocorrer avarias em equipamentos, transtornos em hospitais, trânsito, e perda de produção em indústrias, entre outros. Um sistema de distribuição de energia elétrica moderno terá de satisfazer múltiplos objetivos, incluindo a melhoria da confiabilidade, eficiência e segurança do sistema. Dentro desta perspectiva, faz-se necessário, então, desenvolver um sistema integrado, combinando aquisição, processamento e análise de dados com o propósito de proporcionar a assistência necessária para realizar a automação, o controle e a tomada de decisão no ambiente de subestações de distribuição de energia elétrica (NORTHCOTE-GREEN; WILSON, 2007).

Sendo assim, com o objetivo maximizar as condições operativas do sistema de distribuição, a automação desse sistema deve formar uma rede inteligente ou *smart grid*.

O conceito de rede inteligente é a capacidade de tornar o sistema eficiente e seguro. Quando aplicamos este conceito ao sistema de distribuição, utilizando tecnologias de monitoramento, processamento de dados e rede de comunicação, pode-se otimizar a sua operação, tem-se a oportunidade de tornar o sistema capaz de monitorar, avaliar e autorregenerar quando da ocorrência de distúrbios no sistema. Pode-se dizer que a automação de uma rede de distribuição de energia elétrica, em forma completa, é capaz de tomar as decisões operativas com o uso de lógica de automação e ferramentas de *software* de maneira automática em tempo real (FERREIRA, 2010).

Dentro do conceito de *smart grid* destaca-se a funcionalidade de autorregenerar ou *self healing*. A definição desta funcionalidade é descrita por Falcão:

Define-se um sistema “*self-healing*” (auto regenerável ou auto recuperável) como aquele capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de energia elétrica de forma automática (e em alguns casos de forma instantânea) Falcão (2010, p. 27.)

De acordo com o DOE (Department of Energy – USA), o conceito de *Self Healing* é a capacidade que a rede tem de isolar o problema, minimizar o número de clientes afetados e restabelecer ao estado normal o mais rápido possível e com a menor intervenção humano possível, de maneira que a Inteligência do sistema defina e execute as decisões, minimizando o deslocamento de equipes (OHARA, 2009).

Outro conceito que também surge para definir a automação da rede de distribuição em forma completa, é descrito em Inglês como *Distribution Automation System*, conhecido por DAS, e no Brasil denominado sistema de distribuição automatizado.

Segundo Parikh (2008), entende-se que um verdadeiro sistema DAS não é somente para realizar controle de chaves remotamente e realizar o monitoramento de dados, o sistema deve formar um conjunto que seja capaz de avaliar as situações operativas e responder de maneira automática restabelecendo o sistema em tempo real.

Vale lembrar, que todas as decisões envolvidas para a formação de um sistema robusto de automação são críticas, pois envolvem uma infinidade de equipamentos e tecnologias de proteção, controle e telecomunicações. Além disso, a integração entre as novas tecnologias e as já utilizadas deve ser analisada criteriosamente. Com relação à alocação de dispositivos de manobras e expansão da rede de distribuição, é importante que este planejamento considere a reconfiguração da rede de distribuição. Desta maneira será possível executar chaveamentos e transferências de cargas entre os alimentadores, minimizando a quantidade de consumidores atingidos quando da ocorrência de distúrbios na rede distribuição (NORTHCOTE-GREEN; WILSON, 2007).

4.2 SISTEMAS DE RECONFIGURAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E *SELF HEALING*

Os sistemas de distribuição são, geralmente, operados de forma radial, com objetivo de simplificar estudos de coordenação da proteção e custos com equipamentos, pois desta maneira os valores da corrente em casos de curto-circuito são reduzidos (BERNARDON, 2007)

Para dotar a rede de opções de operação para atender requisitos de balanceamento de carga, manobras emergências isolando defeitos e transferência de carga, são instaladas na rede de distribuição equipamentos de manobra que atendem basicamente as condições de chaves normalmente abertas (NA) e normalmente fechadas (NF) (SCHMIDT, 2005).

Não é de hoje que é reconhecida a importância da reconfiguração de redes de energia elétrica, pois é um tema que vem sendo estudado há mais de 30 anos. Durante este período foram explorados inúmeros métodos de resolução, programação e funções objetivas para solucionar o problema da operação da rede.

A importância deve-se ao fato de que a reconfiguração de sistemas de distribuição de energia é capaz de solucionar ou otimizar a operação da rede de distribuição auxiliando na resolução de alguns problemas. Uma das aplicações é quanto ao objetivo de redução das perdas por efeito Joule, executando a transferência de cargas de circuitos carregados para outros que possuem folga, executando um balanceamento de carga. Outra aplicação, é com relação ao planejamento da distribuição, servindo de apoio nas decisões de planejamento da topologia da rede em um horizonte de 5 a 10 anos.

Neste trabalho a ênfase é com relação a aplicação da reconfiguração das redes de distribuição no tratamento de contingências, atuando de maneira a isolar o defeito através da operação de equipamentos de manobra e restabelecendo o maior trecho possível durante a manutenção do trecho afetado. Após a solução do defeito, o retorno da rede ao estado normal é objeto de nova análise.

A evolução da tecnologia e a inserção de inteligência nos equipamentos de manobra da rede de distribuição, assim como o aumento de investimento na automação, contribuem sobremaneira para a formação de sistemas inteligentes que podem operar de forma automática, ou auxiliar os operadores na tomada de decisão.

Os dispositivos eletrônicos inteligentes, conhecidos como IED (*inteligente electronic devices*) aplicados na rede de distribuição, como novos religadores, chaves motorizadas, unidade terminal remota e dispositivos de controle são fundamentais para a criação dos chamados *self-healing systems*, ou sistemas de auto-recuperação (FALCÃO, 2010).

Os IEDs que são instalados na rede de distribuição têm a função de sensoriamento da tensão, indicação da passagem de correntes de curto-circuito e

possibilidade de acionamento remoto, ou seja, são responsáveis por alimentar o banco de informações da lógica de isolar e reconfigurar a rede de distribuição, por isso outro fator importante a ser considerado é a implementação de sistemas de comunicação de alta disponibilidade e confiabilidade.

Vale lembrar que antes de executar o processo de recomposição o sistema deve ser capaz de identificar e localizar a falta, determinando o trecho do circuito que não pode ser energizado, possibilitando o restabelecimento do restante pelo sistema de recomposição.

Na literatura técnica estes problemas são objetos de estudos distintos. A seguir serão apresentadas as técnicas comumente aplicadas em sistemas de diagnósticos de faltas.

4.2.1 Localização do distúrbio no sistema de distribuição:

Com a crescente utilização de sistemas de operação SCADA mais sofisticados e utilização de equipamentos microprocessados, a operação do sistema de distribuição de energia torna-se mais robusta e confiável. Porém, para os profissionais da área de operação do sistema a análise e interpretação dos dados de um defeito torna-se complexa, principalmente devido à grande quantidade de informações disponíveis.

Para solucionar o problema o profissional deve identificar a localização do problema, acionar as equipes de manutenção e restabelecer os trechos não afetados, executando isso em tempo inferior ao tempo estipulado de falha momentânea pela ANEEL. Este processo ocorre por diversas vezes no centro de operação da concessionária, tornando-se exaustivo e estressante, principalmente em casos que ocorrem falhas da proteção, descoordenação ou múltiplas contingências.

Neste sentido, para restabelecer o sistema elétrico, o operador deve avaliar todas as informações referentes aos possíveis equipamentos, como disjuntores, chaves, religadores, envolvidos no defeito. A priori, o sistema SCADA reporta uma série de dados referentes aos eventos que estão ocorrendo no sistema, ou seja, o

volume de informações é grande e algumas delas não são necessárias no momento da operação em tempo real, prejudicando a análise e interpretação do operador.

Para a solução do problema de localização de faltas foram desenvolvidos uma série de métodos. A maioria das abordagens na detecção de faltas são para estimar a distância de falta através da aquisição de dados da falta dos equipamentos de proteção. Os desempenhos dessas técnicas são afetados pelas características específicas do sistema de distribuição, como a presença de condutores diferentes, sistema desequilibrado, ramificação do sistema, etc (SPATTI, 2011).

Sendo assim, é necessário que no desenvolvimento do método de localização de faltas sejam considerados aspectos inerentes ao sistema de distribuição tais como:

- Grande diversidade dos alimentadores tanto pelo tamanho, carga, bitola dos cabos, presença de ramais;
- Sistema desequilibrado pela presença de linhas não transpostas e pela conexão de cargas conectadas em uma, duas ou três fases;
- Grande número de ramificações partindo do tranco do alimentador;
- Utilização de equipamentos de controle de tensão ao longo do tronco alimentador e ramificações.

A não observação destas peculiaridades é capaz de introduzir erros na estimação da localização da falta quando da adoção de modelos simplificados de sistema de distribuição.

Os tipos de distúrbios mais comuns em sistema de distribuição são os curto-circuitos. As faltas encontradas podem ser do tipo fase a terra, bifásicas, bifásicas a terra, trifásicas com valores de resistência de falta variando de 0 a 50 ohms.

Nesse contexto, o processo de identificação, localização e classificação de faltas, designado na literatura de processo de detecção de faltas, é objeto de estudo e desejo tanto nos setores de transmissão como na distribuição de energia. As principais linhas de pesquisa, segundo Spatti (2011) são:

- Estudo das formas de onda fundamentais de corrente e tensão, utilizando a medição das impedâncias;
- Estudo de ondas viajantes;
- Aplicação de sistemas inteligentes

Na aplicação de sistemas inteligentes pode-se ter a subdivisão de acordo com os métodos utilizados na resolução do problema, sendo esses métodos classificados da seguinte maneira: (MIRZAEI et al.,2009)

- Métodos baseados em inteligência artificial ou em análise estatística;
- Métodos baseados em equipamentos distribuídos;
- Métodos híbridos;

No desenvolvimento das linhas de pesquisas ditas como convencionais, são utilizadas diversas técnicas para executar o procedimento de diagnóstico de falhas de forma plena, como a utilização técnicas de injeção de ondas viajantes, verificação do estado de equipamentos de proteção, informações obtidas de sensores instalados na rede e também pela utilização das medições de corrente e tensão pré e pós-falta. Na utilização destas técnicas observou-se um grande esforço computacional, técnicas de modelagem complexas e um custo elevado referente à aquisição de equipamentos.

Além disso, as dificuldades para o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas eficaz estão relacionadas ao dinamismo que a rede de distribuição apresenta, devido as mudanças de carregamento, constante modificação da configuração, curto-circuitos de alta e baixa impedância e a presença de ruídos na oscilografia.

Com o intuito de contornar as limitações das técnicas convencionais, a grande aposta para o desenvolvimento de um sistema capaz de tratar com a identificação-classificação-localização é o uso de sistemas inteligentes. Pois, esses sistemas são capazes de tratar de maneira precisa, robusta e eficaz o processo de diagnóstico de faltas no sistema de distribuição, tratando de maneira adequada o grande número de variáveis e a característica não linear do problema.

Sendo assim, segundo Decanini (2012) e Alves e Machado (2010) para resolver estes problemas de forma satisfatória são utilizadas técnicas de inteligência artificial, pois combinam as informações já adquiridas pela experiência dos operadores com a capacidade de executar rotinas de maneira segura e com custo de processamento relativamente baixo. Além disso, essas técnicas não necessitam de formulações analíticas e ainda assim apresentam resultados interessantes.

As principais técnicas utilizadas para o desenvolvimento de um processo de diagnóstico de faltas de maneira automatizada são:

- Redes Neurais artificiais;

- Lógica *Fuzzy*;
- Sistemas especialistas;
- Redes de Petri;
- Redes de causa e efeito

Para Spatti (2011) a integração entre as técnicas de sistemas inteligentes com às convencionais é válida principalmente pela evolução das ferramentas de processamento de sinais, gerando sistemas de diagnósticos de faltas que têm apresentado os resultados mais eficientes e convincentes, pois obtém-se robustez, confiabilidade e eficiência.

Dentro destas técnicas podemos destacar as aplicações com redes neurais artificiais no reconhecimento de padrões e aproximação de funções não-lineares, as lógicas *Fuzzy* no tratamento das incertezas, agregando funcionalidades ao sistema inteligente. Já com relação ao tratamento de ondas viajantes destaca-se a utilização de transformada *wavelet*, pela característica de processamento digital de sinais.

4.2.2 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) são regidas pelos princípios gerais utilizados pelo cérebro humano para a solução de problemas. Quando utilizamos uma RNA estamos aplicando esses princípios em sistemas computacionais.

Na comunidade científica acredita-se que o cérebro, constituído de neurônios, possui suas próprias estratégias para interpretar as informações, sendo isso conhecido como “experiência” (GOES, 2010).

A RNA trata-se de um sistema distribuído e paralelo, que podem ser dividido em diversas unidades de processamento simples, sendo dotadas de capacidade de armazenar e utilizar conhecimento. Com esta definição observa-se que existe uma série de semelhanças entre um sistema RNA e o sistema nervoso, dentre as quais destacam-se a capacidade de processador a informação em diversas unidades simples denominadas neurônios artificiais, a capacidade de interligação entre essas unidades estabelecendo a RNA e a transmissão de informações através de conexões entre os elementos. Com relação ao armazenamento das informações destaca-se que cada interação entre as unidades simples ou sinapse, é

representada por um peso associado, variando de acordo com a eficiência da conexão. A avaliação do conhecimento adquirido através do ambiente, faz parte do processo de aprendizagem, sendo que este processo é basicamente responsável por adaptar pesos para as conexões realizadas em reação aos estímulos do ambiente (DECANINI, 2012).

O elemento básico e fundamental de uma RNA é o neurônio artificial que na esfera computacional é um elemento integrador, sendo responsável pelo processo das informações. As principais partes deste elemento são:

- junção somadora;
- sinapses, utilizando os pesos associados;
- função de ativação;

A Figura 5 traz a representação básica do neurônio artificial.

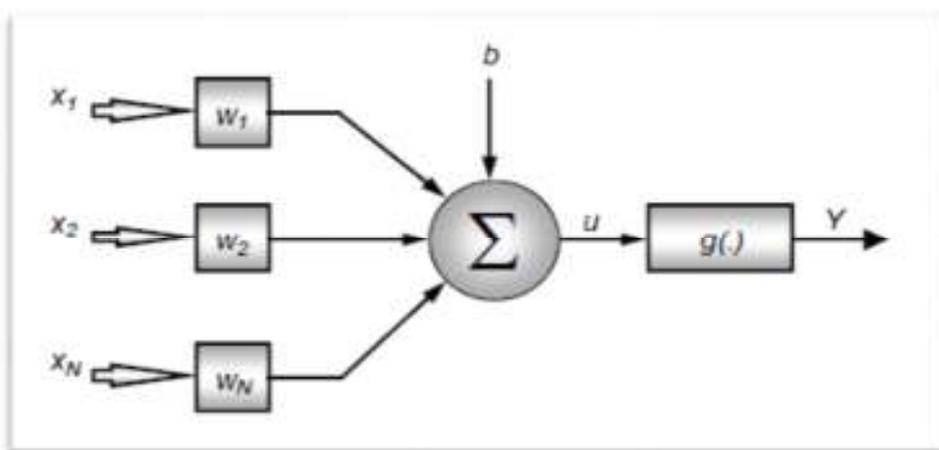


Figura 5 - Representação básica do neurônio artificial
Fonte: SPATTI (2011).

Na utilização de uma RNA normalmente são aplicadas arquiteturas padronizadas, que são desenvolvidas especialmente para a solução de uma classe de problemas. As conexões entre os neurônios artificiais é que leva a formação de uma RNA. As RNAs são constituídas em camadas, sendo usualmente denominadas de camada de entrada, camada intermediária ou escondida, camada de saída. Nem toda RNA possui uma camada intermediária (SPATTI, 2011).

As arquiteturas básicas utilizadas em RNA podem ser classificadas em uma rede feedforward de uma única camada, redes feedforward de múltiplas camadas e redes recorrentes.

- Redes FeedForward (camada única) : A característica desta arquitetura é de ter duas camadas, sendo uma camada de entrada e uma única camada de neurônios já sendo a própria saída. Essa configuração é normalmente utilizada para reconhecimento de padrões e para memória associativa.
- Redes FeedForward (Multicamadas): A diferença com relação a camada única é que a multicamadas possui uma ou mais camadas intermediárias entre a entrada e a saída. A operação dessa rede inicia-se na camada de entrada com o recebimento dos sinais, que são processados nas camadas intermediárias e disponibilizados na camada de saída. Usualmente essa configuração é utilizada para o reconhecimento de padrões e como aproximador de funções, já que aproxima funções não-lineares.
- Redes recorrentes: A diferença desta rede está no fato de possuir realimentação entre os neurônios de camadas diferentes. Essa rede tem a capacidade de utilizar os padrões anteriormente apresentados, tornando-se capaz de processar sequências de informações. São utilizadas em séries temporais, previsões e sistemas dinâmicos.

As RNAs são aplicadas em diversos campos de estudo como robótica, processamento de fala e no sistema elétrico de potência atuando em linhas de pesquisa relativas a proteção, identificação de falta, detecção e outros.

As principais vantagens relativas a utilização das metodologias das RNAs para a solução de problemas são:

- Não existe a necessidade de modelar o sistema matematicamente ou topologicamente;
- A RNA é dotada de mecanismos aprendizagem através da experiência adquirida, isso ocorre quando a rede possui soluções para uma classe de problema;
- Eficiência na determinação de soluções em processos em que não existe conhecimento explícito de uma solução factível;
- A rede apresenta alta estabilidade com relação a entrada eventual de parâmetros incorretos ou ausentes, não entrando em colapso na presença de ruídos.

Para os casos de aplicação de RNAs para a resolução de problemas de localização do distúrbio, observa-se que a principal vantagem é a ausência da modelagem da rede de distribuição.

Para a utilização de uma RNA existe um passo importante que é a etapa de treinamento, sendo que neste processo deve ser verificado a capacidade do sistema em modificar o padrão de interconexão adaptando o modelo para a resolução do problema. No treinamento de uma RNA são utilizadas técnicas distintas para o aprendizado, sendo uma delas o modo supervisionado onde é fornecido o resultado esperado, e, o não supervisionado sendo a própria RNA responsável pelos ajustes para o seu funcionamento. Usualmente a técnica de aprendizado aplicada é o supervisionado, sendo a RNA capaz de se adaptar, comparando o resultado obtido com a resposta esperada.

Na solução de problemas referentes a detecção e localização de distúrbios na rede de distribuição a arquitetura usualmente empregada é a *perceptron* multicamadas, adotando como técnica de aprendizagem a *backpropagation*.

4.2.2.1 Perceptron multicamadas

Também conhecidas como redes MLP (*multilayer perceptron*) tem melhor desempenho computacional comparando-se as redes sem camadas intermediárias, principalmente pois são capazes de tratar dados que não são linearmente separáveis. Este tipo de arquitetura RNA apresenta como característica a não linearidade da função de ativação, sendo usualmente emprega a função sigmoide (DECANINI, 2012).

A composição de uma RNA do tipo MLP é através de unidades sensoriais na camada de entrada, podendo ter uma ou mais camadas ocultas de neurônios computacionais e uma camada de saída, conforme a figura 6. Sendo que o sinal de entrada propaga-se em único sentido partindo da camada de entrada e segue avançando nas camadas da rede (SPATTI, 2011).

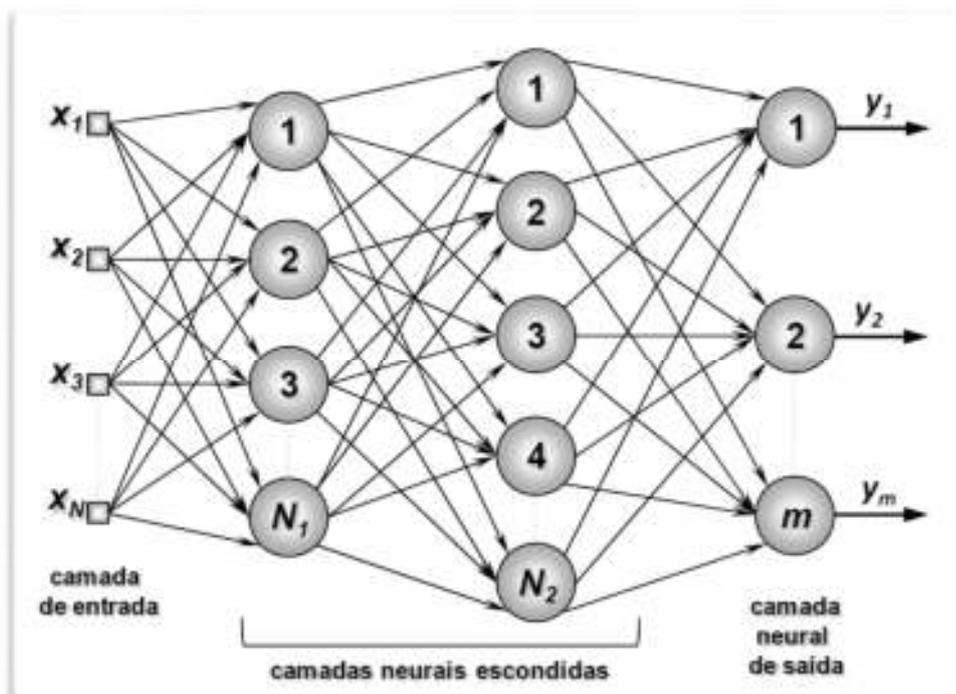


Figura 6 - Modelo neural *perceptron* multicamadas
 Fonte: SPATTI (2011)

O treinamento para este tipo de RNA é o supervisionado, usualmente com o algoritmo conhecido por *backpropagation*. Sendo que este algoritmo é composto de duas etapas, uma conhecida como *forward* e outro por *backward*.

Na primeira etapa são obtidos os valores dos pesos das conexões e os limiares da ativação. Já na segunda etapa são utilizados os valores esperados para a entrada usada, onde são obtidos os desvios, sendo paralelamente ajustados os gradientes de cada neurônio, pesos de conexão e limites de atuação sendo ajustados os gradientes e pesos para cada neurônio das camadas intermediárias.

Em Fanuchi et. Al (2013) é feita uma análise comparativa entre a aplicação de duas topologias de RNA. O problema abordado neste trabalho é com relação a identificação de faltas de impedância no sistema de distribuição, diferenciando este evento de eventos de energização de transformadores e chaveamentos de banco de capacitores. O problema de identificação de faltas de alta impedância é conhecido por ser o de mais difícil ou até impossível diagnóstico para os equipamentos de proteção. Na análise comparativa são utilizadas duas topologias de RNA, sendo que uma utiliza a rede *perceptron* multicamadas e a outra a rede de função de base radial.

A rede *perceptron* apresentou desempenho superior, apresentado índice de acertos de 100% com a utilização de no mínimo dois neurônios na camada intermediária. Já a rede de função de base radial apresentou como melhor índice de acertos o valor de 97,83% utilizando 5 neurônios camada intermediária, ou seja, expressando um esforço computacional maior para executar a mesma tarefa, porém com menor precisão.

Em Goes (2010) é utilizada uma RNA *perceptron* multicamadas para localização do trecho em falta em sistema de distribuição pequeno com três linhas de distribuição, conforme Figura 7.

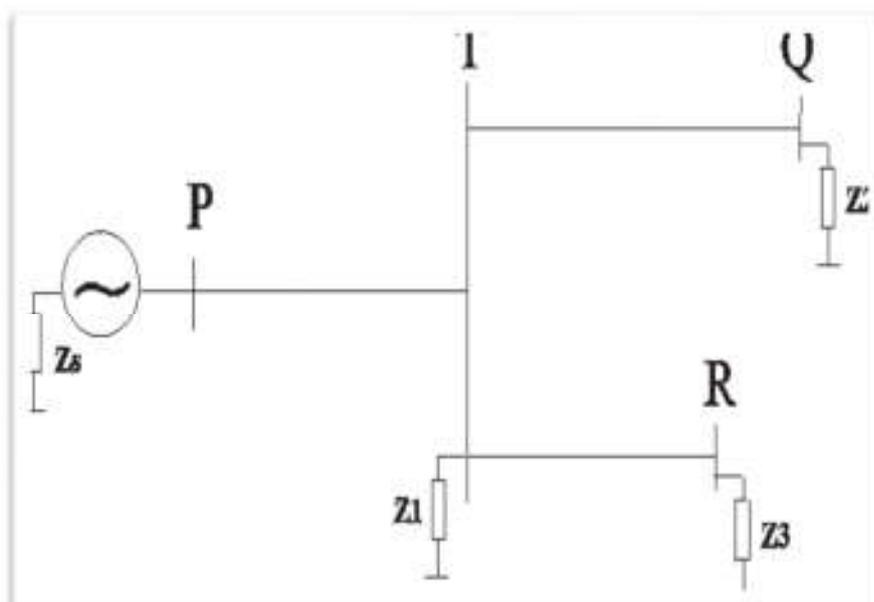


Figura 7 – configuração do sistema de distribuição aplicado na simulação.
Fonte: GOES (2010).

A rede *perceptron* aplicada para a resolução deste problema possui 4 camadas, sendo uma de entrada com os sinais de corrente e tensão da barra fonte, duas camadas intermediárias para processamento entre as sinapses e uma camada de saída que informa a localização do trecho com defeito, conforme Figura 8.

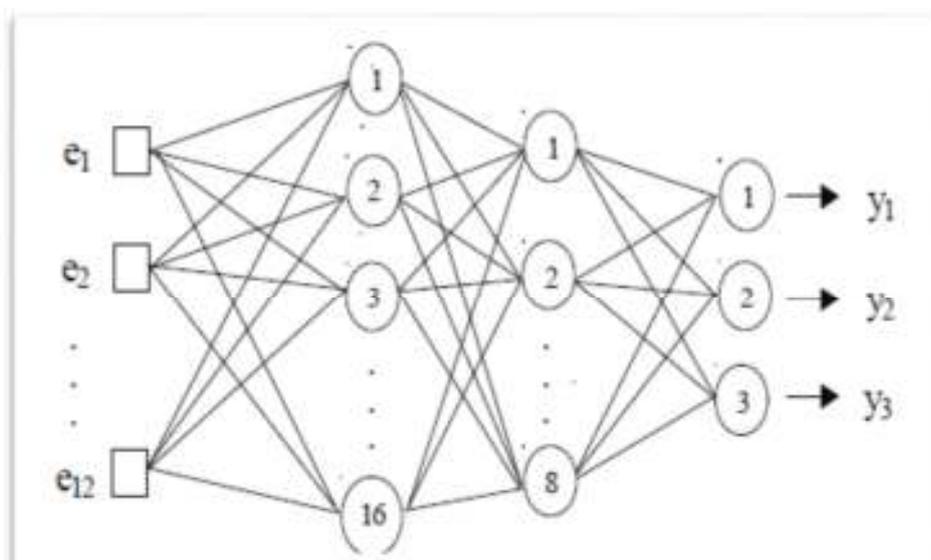


Figura 8 - Arquitetura de RNA utilizada no esquema de localização de falta
Fonte: GOES (2010).

Para o treinamento foi utilizado o software ATP simulando a ocorrência de 12 defeitos em cada trecho do circuito alimentador num total de 36 simulações. Destas simulações é extraído uma janela de 7 sinais de amostra após o curto circuito. Sendo assim, forma-se uma matriz de treinamento de 252 linhas e 12 colunas.

O treinamento realizado é do tipo *backpropagation* sendo realizadas 178 épocas para o treinamento.

Para avaliação do sistema implementado foram realizadas 18 simulações, diferentes das utilizados no treinamento, e a RNA proposta apresentou bons resultados na identificação do trecho afetado. Em alguns casos, a RNA não conseguiu acertar todas as 7 amostras, porém teve um aproveitamento superior a 86%.

A solução apresentada independe das condições da falta, possibilitando uma fácil adequação de RNAs na tratativa destes estudos, pois não são utilizadas as formulações de equações das linhas de distribuição. Porém, a etapa de levantamento de dados no simulador de faltas é de extrema importância nesse caso.

Na literatura técnica existem muitos trabalhos que aplicam a técnica de RNA para a solução de alguma etapa no processo de diagnóstico de faltas, seja na identificação, classificação ou até mesmo na localização.

Outra técnica utilizada são as lógicas *Fuzzy* devido ao potencial em tratar as incertezas do problema.

4.2.3 Lógicas Fuzzy

O tratamento de problemas com lógicas Fuzzy é baseado na teoria de conjuntos Fuzzy, que difere dos sistemas lógicos tradicionais em diversas características e detalhes. Na lógica Fuzzy, o raciocínio exato é igual a um resultado limite do raciocínio aproximado, sendo exposto através da composição de relações nebulosas (GOMIDE, 1995).

Este tipo de tratamento para a solução de problemas foi proposto por Lofti Zadeh, em 1965 (ZADEH, 1965). O mérito da teoria de conjuntos Fuzzy é a verificação de que algumas vezes não são encontrados em problemas fatos absolutamente verdadeiros ou falsos, sendo então necessário representar os valores de pertinência intermediários dessas condições.

No tratamento do problema de sistema de diagnósticos de faltas surgem incertezas inerentes a modelagem do sistema de distribuição, devido a seu alto grau de ramificação e variedade de cargas. Além disso, surge também a variável atribuída a geração distribuída, que apesar de ser capaz de tornar o sistema mais robusto e confiável, promove o acréscimo de incertezas na modelagem do sistema de distribuição. A abordagem em cenários dotados de grau de incerteza na modelagem ou informação, pode ser tratada de maneira probabilística, sendo as variáveis representadas em funções de densidade de probabilidade, utilizando de ferramentas estatísticas. Outra maneira de tratar as incertezas é a abordagem possibilística, onde as variáveis são estudadas dentro de intervalos de variação em inúmeros cenários, para este tipo de tratamento uma das ferramentas utilizadas é a lógica Fuzzy. (BATISTA, 2013)

O Controle Fuzzy é capaz de tomar decisões baseado em informações qualitativas, gerando resultados racionais em um ambiente de incertezas e imprecisões. Com a aplicação da Lógica Fuzzy é possível representa os dados do problema em um sistema com utilizando conceitos imprecisos tais como “muito alto”, “mais ou menos perto”, “usualmente”. Com a utilização dessas propriedades é possível avaliar o sistema a partir do próprio conhecimento existente sobre ele (GOMIDE, 1995; SPATTI, 2011).

4.2.3.1 Teoria de conjuntos Fuzzy

Na formação de um conjunto Fuzzy um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto. O grau de pertinência é definido através de uma função típica, chamada de função de pertinência (ZADEH,1965). A função de pertinência é representada pela seguinte equação:

$$\mu_A(x):U \rightarrow [0,1]$$

Na equação para cada elemento x de U é associada um grau de pertinência, indicando o valor com o qual x pertence ao conjunto.

A função de pertinência possui valores reais definidos em um intervalo de $[0,1]$. Desta maneira, são definidos os níveis de pertinência do elemento x de U com o conjunto A .

- $\mu_A(x) = 0$: x não pertence ao conjunto A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$: x pertence parcialmente ao conjunto A , com grau $\mu_A(x)$;
- $\mu_A(x) = 1$: x pertence completamente ao conjunto A .

Com as definições dos conjuntos podem ser executadas operações entre conjuntos Fuzzy. As principais operações são: interseção, união, complemento.

4.2.3.2 Funções de pertinência

São as variáveis linguísticas que caracterizam o conjunto Fuzzy dentro do domínio de intervalo do conjunto Fuzzy $[0,1]$. A representatividade dessas funções é dada de maneira gradativa conforme a representação do conjunto Fuzzy, diferente do que ocorre com conjuntos da teoria clássica, chamados de *crisp*, onde a representatividade é expressa pelas condições de “pertence” ou não “pertence” (TONELLI NETO, 2012).

A definição do grau de pertinência é maneira de ilustrar a veracidade da função, estabelecendo uma relação entre os elementos do domínio Fuzzy e um valor real, indicando assim o grau de pertinência no conjunto. (BAER, 2000).

A Figura 9 representa a função de pertinência utilizada em um alimentador para definição do nível de carregamento do circuito.

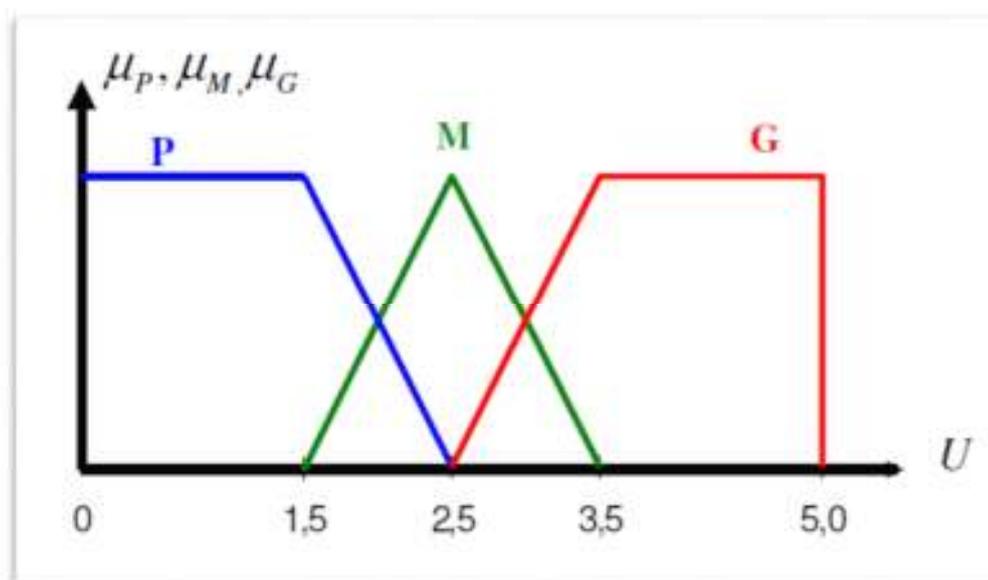


Figura 9 - Representação das funções de pertinência
Fonte: Pinto (2010)

Pode ser observado que nesta análise são adotados dois tipos de função de pertinência. A parte da figura em vermelho e azul representa duas funções de pertinência trapezoidal e figura em verde é uma função triangular.

As escolhas das funções de pertinência para a resolução do problema dependem da natureza da aplicação e podem ser de diversas formas. As funções que se destacam são as triangulares, trapezoidais, gaussianas e exponenciais. A escolha da função a ser utilizada é de responsabilidade do usuário, o qual tem a liberdade de definir inclusive uma função distinta dessas apresentadas, caso seja interessante e apresente melhores resultados.

4.2.3.3 Sistema Fuzzy

A aplicação de sistemas Fuzzy tem apresentado resultados satisfatórios nas áreas de controle automático, classificação de dados, tomada de decisão e sistemas

especialistas. O sistema Fuzzy possuem natureza multidisciplinar e por isso são conhecidos por diferentes nomenclaturas, entre eles estão o sistema Fuzzy baseado em regras, sistemas especialistas Fuzzy, sistema de modelagem Fuzzy entre outros.

A principal característica do sistema Fuzzy é a capacidade de utilizar parâmetros numéricos de entrada e saída, sendo que na análise são utilizadas variáveis linguísticas. O princípio utilizado no funcionamento desse sistema é baseado na filosofia do raciocínio humano para tomar decisões, sendo capaz de lidar com situações onde a incerteza e imprecisão estão presentes.

Com relação aos modelos de inferência Fuzzy, o de Mamdani, é o mais aplicado desde o aparecimento dos primeiros sistemas de controle Fuzzy. Esse modelo é composto por módulos, que executam as etapas do sistema de Fuzzy, realizando a compatibilização de entradas reais em conjuntos Fuzzy equivalentes, e após a aplicação das regras e operações de inferência transforma os novos conjuntos Fuzzy formados em valores reais de aplicação.

A Figura 10 mostra um diagrama típico das etapas de um sistema Fuzzy, que utiliza o modelo de inferência Mamdani (PINTO, 2010).

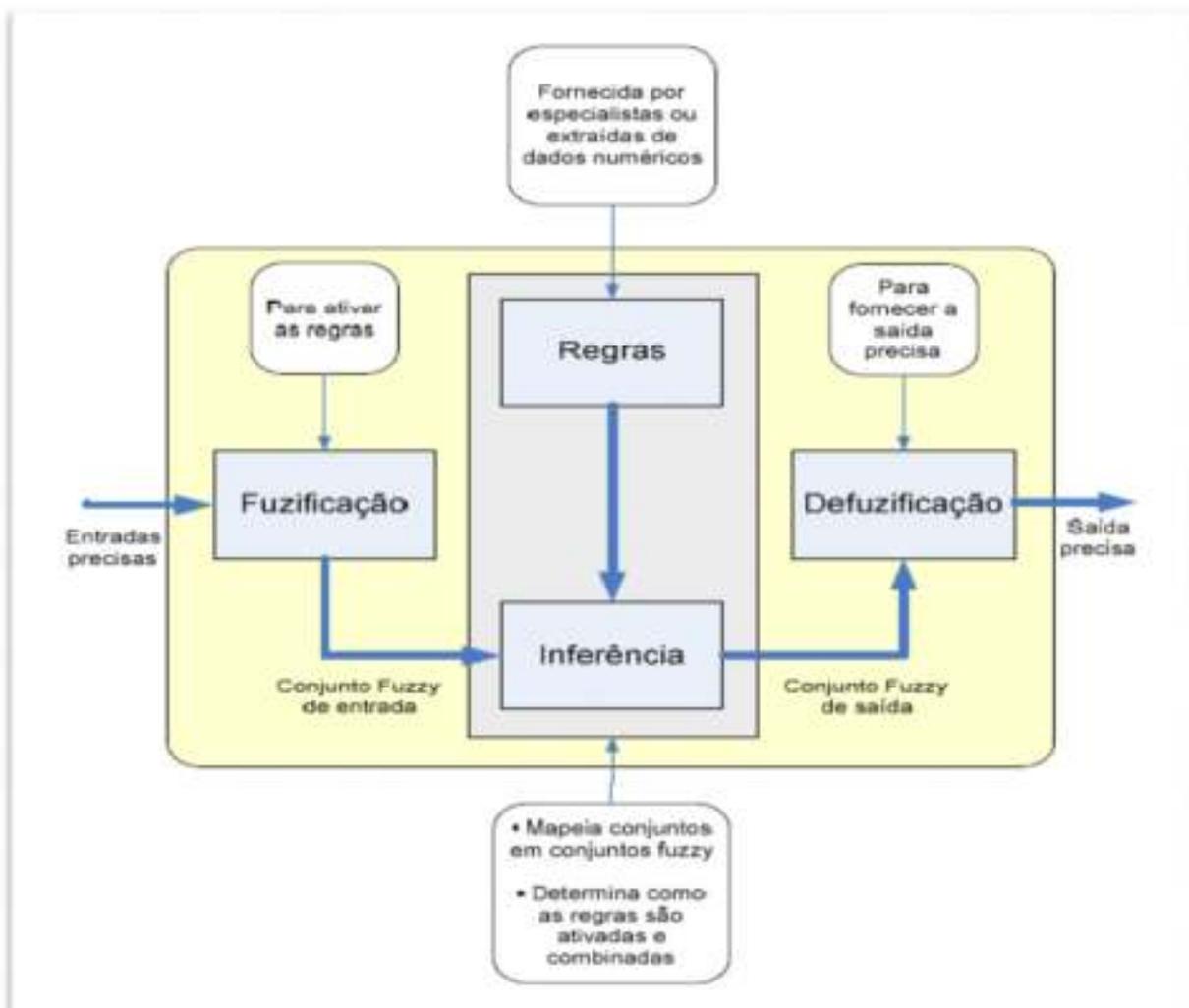


Figura 10 - Diagrama típico de um modelo de inferência Mandami
 Fonte: Pinto (2010).

O processo de aplicação do sistema de lógicas Fuzzy pode ser dividido em 4 partes: Fuzzyficação, regras fuzzy, técnicas de inferência, desfuzzyficação (ALVES et al,2011).

4.2.3.4 Fuzzyficação

Na aplicação de modelagem e controle Fuzzy os valores de entrada *crisp* são adaptados para uma representação Fuzzy, sendo este processo conhecido como Fuzzyficação ou codificação. A codificação fuzzy ou fuzzyficação é responsável por determinar em que região da variável fuzzy está a variável de entrada. Para isso é necessário realizar a leitura da variável de entrada e realizar seu escalonamento e sua normalização. Há a necessidade da aplicação de função

de pertinência para converter as entradas normalizadas em variáveis linguísticas (ALVES et al, 2011).

Após a entrada a entrada crisp ser tratada para tornar-se um conjunto Fuzzy através das funções de pertinência, cada elemento do conjunto Fuzzy formado recebe um grau de pertinência com valores compreendidos entre 0 e 1. O resultado destes conjuntos é a representatividade para a qual o valor de entrada é membro do conjunto em particular. A sobreposição de valores limites na representação do conjunto Fuzzy é fundamental para que o tratamento do sistema não seja brusco. Com isso as aplicações das regras são simplificadas até mesmo em um problema complexo (ALVES et al, 2011).

4.2.3.5 Base de regras e inferência Fuzzy

Nesta etapa estão alocadas as sentenças, que são do tipo SE-ENTÃO, responsáveis pela definição de uma condição e em consequência uma ação, a ser executada sobre os dados de um conjunto Fuzzy.

Os conjuntos Fuzzy usualmente trabalham com mais de uma regra na execução da análise do processo. As regras podem ser definidas pela experiência ou através de dados numéricos.

A inferência fuzzy é a aplicação de regras nas variáveis de entrada já em conjunto Fuzzy, utilizando operadores de implicação Fuzzy nos conjuntos Fuzzy de entrada formando conjuntos Fuzzy de saída (ALVES et al., 2011).

4.2.3.6 Desfuzzyficação

A desfuzzyficação é a etapa onde os resultados obtidos pela aplicação das regras e pela inferência no sistema Fuzzy são transformados de conjuntos Fuzzy para valores reais que podem ser utilizados.

Os métodos com maior destaque para a execução da desfuzzyficação são os métodos: critério do máximo, média do máximo e o centro da área. Dentre esses

o mais utilizado é método de centro da área, que calcula o centro de gravidade do conjunto Fuzzy de saída, sendo este valor o resultado final da aplicação.

4.2.3.7 Rede neural ARTMAP Fuzzy

A aplicação de metodologias que utilizam como base a inteligência artificial é ideal para extrair o conhecimento de processos complexos, que é o caso da automação do sistema de distribuição. (DECANINI, 2012).

A solução para o problema da localização de falta apresenta a utilização de diversas ferramentas e métodos, de uma maneira geral as técnicas aplicadas durante a solução do problema podem apresentar limitações. De uma maneira macro as limitações são as seguintes (DECANINI, 2012):

Os algoritmos de localização de faltas iterativos podem apresentar demora na obtenção do resultado, podendo inclusive apontar para uma solução divergente;

Procedimentos heurísticos podem realizar um número elevado de tentativas na busca da identificação da localização do problema, dificultando a aplicação em sistemas reais devido ao tempo que em que é necessário localizar e restabelecer o trecho do alimentador não afetado;

Métodos de sistemas inteligentes baseados em inteligência distribuída exigem a instalação de equipamentos inteligentes praticamente em todos os nós e ramos da rede de distribuição

Segundo (MIRZAEI et al., 2009) a utilização de sistemas inteligentes apresenta maior precisão e rapidez na obtenção de resultados. Sendo que, dentre as diversas técnicas utilizadas, os métodos de inteligência artificial como a aplicação de redes neurais é o que apresenta os melhores resultados e possibilidade de evolução para este tipo de aplicação.

A aplicação de sistemas inteligentes combinando técnicas de processamento de sinais e Inteligência artificial são capazes de produzir excelentes resultados para a formação do sistema de diagnóstico de faltas robusto, rápido e confiável.

No trabalho de Decanini (2012) é desenvolvido um sistema de diagnóstico de faltas, que é capaz de identificar, classificar e localizar a falta em um alimentador

do sistema de distribuição. A metodologia utilizada para a localização da falta é a utilização de uma rede neural da família ARTMAP Fuzzy.

A rede neural ARTMAP Fuzzy é um sistema de rede neural que possui a capacidade de aprendizado auto organizável. A estrutura desta rede neural é similar ao conjunto de redes neurais da família ART, ou seja, utilizam da teoria da ressonância adaptativa para formação da estrutura.

A rede ARTMAP consistem de um sistema de aprendizado supervisionado, tendo dois módulos ART Fuzzy unidos por uma memória associativa. A rede incorpora operador Fuzzy e a teoria de conjuntos Fuzzy, tornando a rede capaz de responder a padrões de entrada binários e analógicos.

A diferença entre uma rede neural de arquitetura multicamadas e a de uma com estrutura ART é percebida na etapa de treinamento, pois em uma rede multicamadas a entrada de dados de um novo padrão pode representar as perdas das informações anteriores.

A teoria da ressonância adaptativa é inspirada em estudos sobre detectores de características biológicas, ocorrendo interferência entre os padrões de atividades das camadas de entrada e saída, formando uma rede recorrente. Sendo a vantagem na utilização de uma RNA ARTMAP Fuzzy em comparação com a Perceptron Multicamadas é o alto desempenho computacional na execução de testes e treinamento, e a capacidade de aprendizado contínuo, tendo em visto a dinâmica da rede de distribuição (DECANINI, 2012).

O algoritmo apresentado na figura 11 mostra o sistema de diagnóstico desenvolvido por Decanini (2012), o qual utiliza as RNA ARTMAP Fuzzy nas etapas de classificação e localização do distúrbio.

A localização de falta é realizada por uma RNA ARTMAP Fuzzy específica para cada tipo de curto circuito que é classificado anteriormente por outras RNA ARTMAP Fuzzy. A entrada de dados destas RNAs são os coeficientes de corrente e tensão obtidos através da utilização de discretização pelas transformadas wavelet.

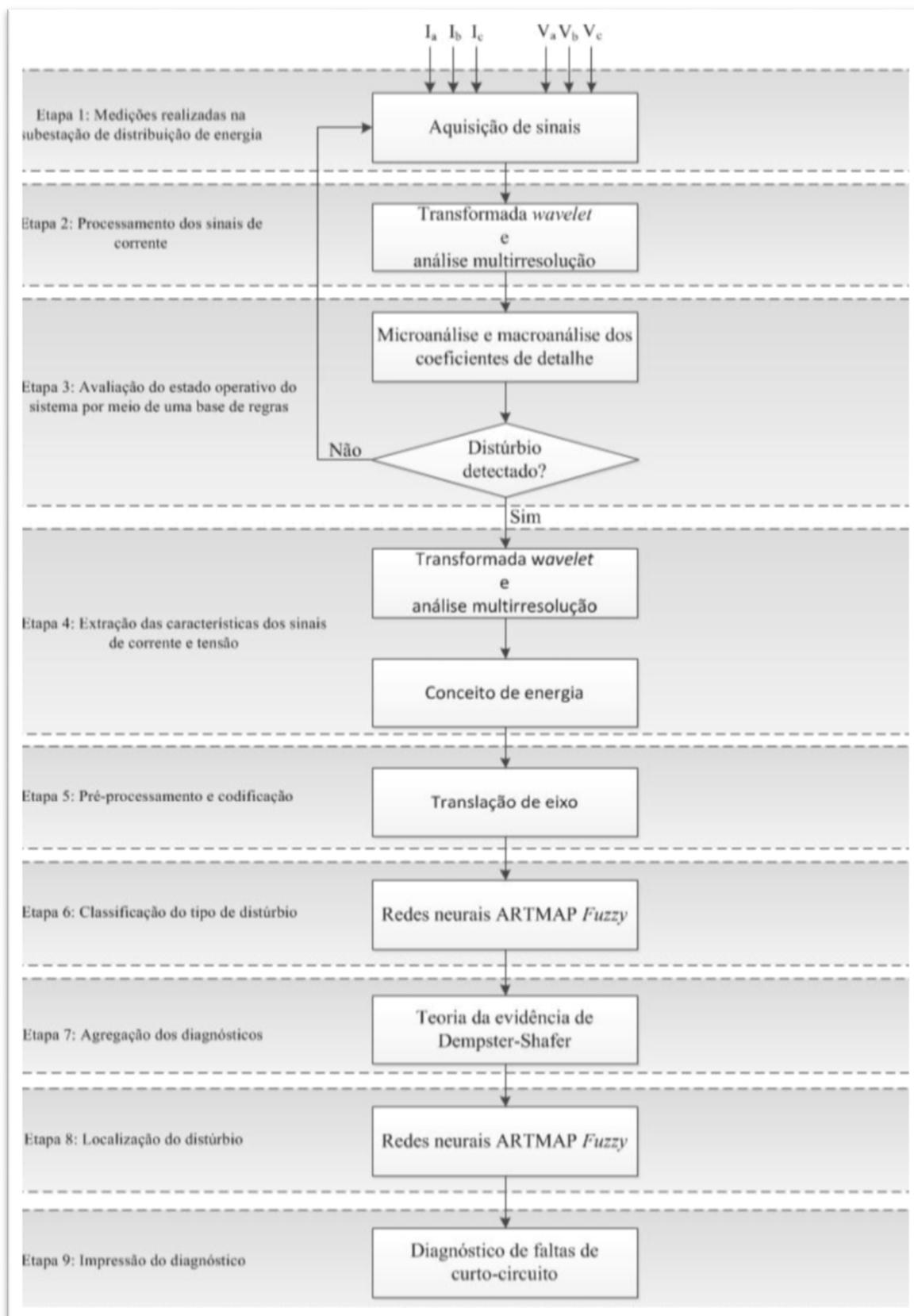


Figura 11 - Algoritmo do sistema de falta
 Fonte: Decanini (2012).

O sistema teste utilizado neste caso é um alimentador com 135 barras, sendo que o mesmo foi subdividido em 15 seções para a localização da falta, tendo como critério de divisão das seções os equipamentos de proteção do sistema. Para cada seção de falta é atribuído um código, que representa os estímulos de saída para a RNA. O alimentador é apresentado na Figura 12.

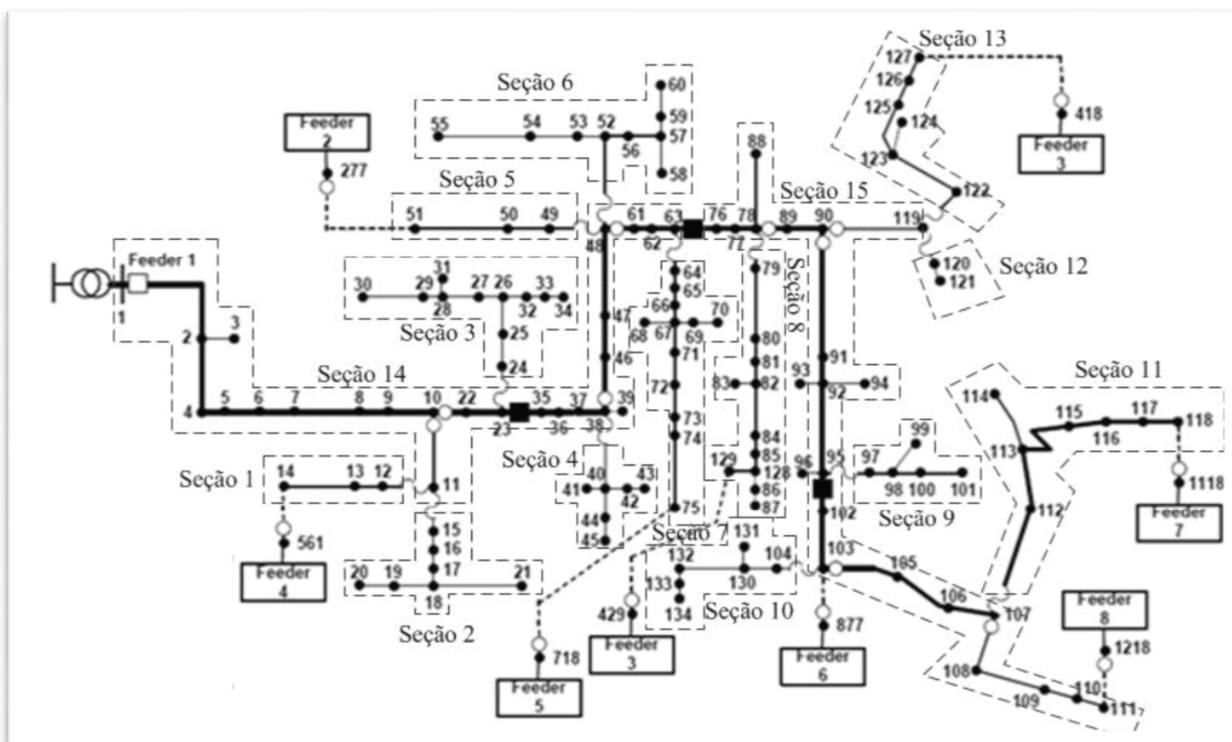


Figura 12 - Circuito alimentador usado na simulação
Fonte: Decanini (2012).

Para a aplicação deste sistema de detecção é apenas necessário a obtenção dos valores de medição de tensão e corrente na saída do alimentador.

Na etapa de simulação foram executadas 1398 diferentes aplicações de curto circuito, tendo como variáveis o ângulo de inserção da falta, resistência da falta, carregamento do sistema e localização da falta.

Na etapa de classificação da falta foi necessária apenas uma época de treinamento para que fosse obtido o resultado de 98,64% de acerto. Identificando uma diferença considerável com relação aos métodos usualmente empregados na literatura como as RNA multicamadas em conjunto com o algoritmo de treinamento *backpropagation*.

Na etapa de localização da falta foram utilizadas 80% das contingências estudadas e 20% foram utilizadas na etapa de teste, com o objetivo de verificar a

capacidade do sistema em reagir ao dinamismo da rede. Os índices de acertos foram superiores a 90% para as faltas monofásica, bifásicas e trifásicas, sendo que o sistema completo apresentou a resposta com tempo inferior a 80ms, indicando a possibilidade de utilização em tempo real, tanto pela questão de tempo de processamento como também pela falta de necessidade de equipamentos adicionais e precisão.

Com relação a estratégia aplicada para a execução da reconfiguração da rede de maneira inteligente, pode-se adotar soluções de inteligência distribuída e de inteligência centralizada.

4.3 INTELIGÊNCIA CENTRALIZADA

Nesse tipo de solução a inteligência é baseada em sistema SCADA, sendo que todas as informações retiradas dos IEDs são recebidas pelo sistema SCADA, o qual será responsável por executar os algoritmos desenvolvidos para isolar e reconfigurar a rede após o distúrbio, conforme se observa na Figura 13.

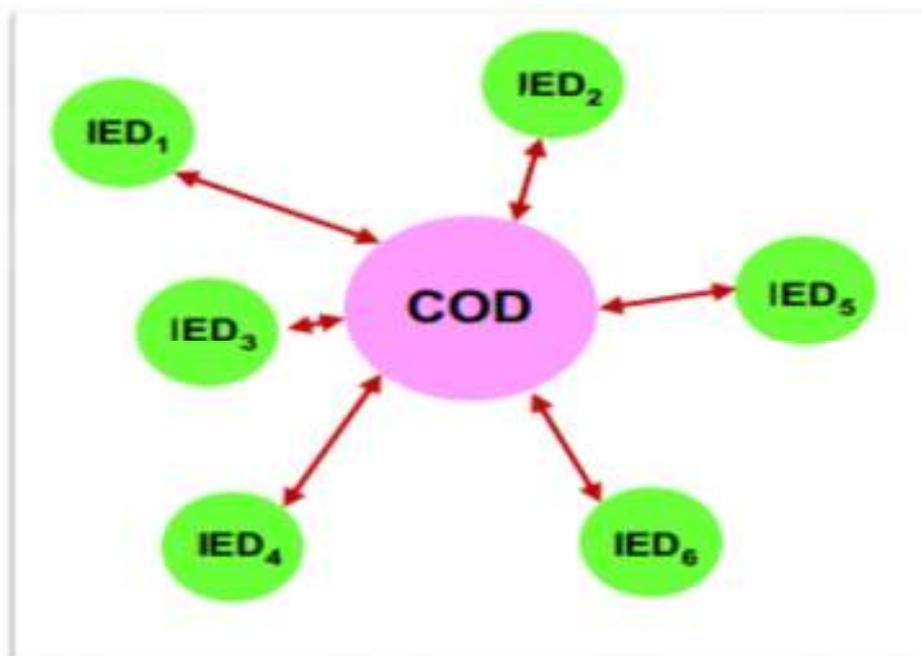


Figura 13 - Inteligência centralizada
Fonte: Falcão (2014).

Em algumas aplicações os algoritmos implementados podem apresentar uma sequência de manobras de reconfiguração, com a finalidade de auxiliar a operação, sendo apresentado na forma de relatório. Neste relatório o algoritmo determina quais as chaves que devem ser manobradas, podendo conter equipamentos que podem ser comandados remotamente ou localmente.

Sendo que com o aumento de tamanho do sistema de distribuição torna-o complexo e de inúmeras possibilidades de interligações. Além disso, ocorre também o acréscimo de chaves e equipamentos dotados de automação, tornando a análise da reconfiguração um problema que provoca uma explosão combinatória de possibilidades de configurações radiais. Sendo assim, a dificuldade por parte da operação em realizar a reconfiguração é considerável, surgindo assim a necessidade de utilização de métodos e técnicas heurísticas, utilizando as mais diversas ferramentas matemáticas (FERREIRA, 2010).

Segundo Hashimoto:

“a heurística, ou “arte de encontrar” constitui uma classe de algoritmos utilizada para a obtenção de soluções aproximadas em problemas de otimização combinatória. A heurística procura alcançar uma solução satisfatória, sem ter que varrer todo o espectro de soluções de proporções exponenciais (natureza combinatória), procedimento conhecido como Enumeração Completa” (HASHIMOTO, 2004, p.38).

Na literatura os métodos e técnicas heurísticos utilizados na reconfiguração podem ser divididos em três métodos clássicos (SILVA JUNIOR, 2012).

4.3.1.1 Método da troca de trechos

De acordo com a literatura técnica o método utilizado por Civanlar (1988) para reconfigurar a rede de distribuição é de grande representatividade no tema. Para manter a característica radial o algoritmo identifica as chaves operáveis do sistema e executa a abertura e fechamento das chaves aos pares, proporcionando uma troca de ligações “*Branch Exchange*”, que é o nome adotado para esta técnica. O objetivo do trabalho desenvolvido era reduzir as perdas elétricas mantendo a radialidade na operação da rede. Após o fechamento da chave era executado um cálculo simplificado de fluxo de potência, verificando se a operação atendia ao objetivo

esperado. O método é melhorado por Baran e Wu (1989) incluindo novas equações de cálculo de fluxo de potência para a formação de redes radiais (SILVA JUNIOR, 2012).

4.3.1.2 Método baseado em laços

Na apresentação original deste método em Merlin e Back (1975) o passo inicial do algoritmo é o fechamento de todas as chaves presentes no circuito. Na aplicação em contingência de uma rede de distribuição, é necessário identificar e isolar o defeito, tornando as chaves que isolam o defeito inoperáveis para o algoritmo. A partir disso os laços de interligação do circuito configuração os laços vão sendo abertas com o objetivo de atender a uma função objetiva, usualmente a minimização de perdas. Quando esgotam-se as possibilidades de aberturas de laços, e o sistema assume uma configuração radial, a reconfiguração está concluída. Posteriormente em Shirmohammadi e Hong (1989) são aproveitados os pontos positivos do método de Merlin e Back como a convergência para uma solução quase ótimo ou ótima e a independência da solução final do estado inicial das chaves. Além disso, foram implementadas melhorias com relação a modelagem da rede e também com relação as restrições, não sendo utilizada mais a representação das cargas de maneira puramente resistiva e também a corrente que possuía valor fixo, não sendo possível verificar a restrição por sobrecarga nos equipamentos. Outras adaptações a este método foram propostas, destacando-se a que adota o fechamento de uma chave de cada vez para compor uma malha, sendo proposta por Goswami e Basu (1992) (SILVA JUNIOR, 2012).

4.3.1.3 Método construtivo

O conceito básico dos algoritmos desenvolvidos com base no método construtivo é a consideração inicial de que as chaves candidatas a serem manobradas são consideradas abertas. Para manter a característica radial do

sistema de distribuição, as chaves são manobradas fechando o circuito alimentador a partir da barra da subestação. Alguns trabalhos utilizam verificações intermediárias para manter as condições de restrição como fluxo de potência, queda de tensão, sensibilidade da proteção, etc. O algoritmo proposto por McDermott, Drezga e Broadwater (1999), inicialmente faz o levantamento de todas as chaves disponíveis para operação. O trecho que está sob defeito é isolado e as chaves ficam restritas a operação e introduzindo o conceito de “programação ascendente discreta ótima”, analisando a escolha do fechamento da chave NA pelo critério de menor perda incrementando a carga por passos discretos a barra final do trecho anterior. Este algoritmo pode ser caracterizado como do tipo guloso, pois avalia a melhor decisão para o momento, sem vislumbrar as consequências futuras.

Em suas aplicações o método clássico para a recomposição do sistema de distribuição apresenta como objetivo a maior parte do circuito atingido com o objetivo de minimizar as perdas por efeito Joule. Avaliando a sequência do algoritmo base que são utilizados nestes métodos, observa-se que primeiramente as chaves de operação que isolam o defeito seriam descartadas da análise e impossibilitadas de executar qualquer operação, porém todo o restante do sistema estaria disponível para realizar a recomposição, possivelmente executando a abertura e fechamento de chaves que não tem relação alguma com o alimentador afetado, podendo causar prejuízos a concessionária e insatisfação nos clientes (SILVA JUNIOR, 2012).

4.3.1.4 Otimização: Objetivos e restrições

Através da fundamentação desses métodos clássicos surgiram várias outras heurísticas para estudos de reconfiguração de redes de distribuição, sendo que a minimização de perdas ativas é na maior parte dos estudos a função objetivo principal.

Segundo Ferreira (2010) a reconfiguração da rede é um problema típico de otimização combinatória, sendo que um problema matemático de otimização com múltiplos objetivos é composto de um conjunto de variáveis que satisfaz a algumas restrições em busca de um valor otimizado para atender a mais de uma função objetiva.

Sendo assim, a reconfiguração é tratada como um problema de programação não linear inteira mista devido a utilização de equações não lineares na sua formulação, presença de variáveis binárias e valores analógicos que apresentam variação dentro de um certo intervalo de tempo (SCHIMDT,2005; FERREIRA,2010).

Na solução de problemas de programação inteira mista, são utilizadas técnicas de otimização clássica como o método Branch-and-Bound, que busca um ponto ótimo, ou métodos não convencionais de otimização como as metaheurísticas, que podem não obter o ponto ótimo, porém apresentam boas soluções.

Na utilização de métodos que exploram todas as soluções, identificou-se a situação denominada de explosão combinatória para sistemas reais de distribuição, pois o espaço combinatório das soluções possíveis é o equivalente a 2^x , sendo x o equivalente ao número de chaves, tornando o conjunto de soluções infinito para sistemas de distribuição reais. Além disso, muitas dessas chaves NA e NF não podem permanecer em algumas condições topológicas, pois não atenderiam as condições estabelecidas como restrições operativas, dificultando a solução do problema (RUPOLO, 2013; SCHIMDT,2005).

A reconfiguração é um problema que possui inúmeros estudos com os mais diversos métodos na busca de uma solução com qualidade. A melhoria a ser atingida na maioria dos métodos desenvolvidos é com relação ao tempo de processamento dos algoritmos e as simplificações na modelagem do sistema de distribuição (RUPOLO, 2013).

Sendo assim, os métodos com heurísticas aproximados têm sido sugeridos para solucionar o problema de reconfiguração, pois apesar de não obterem uma resposta ótima, tem demonstrados resultados eficientes. A aplicação desses métodos em conjunto com ferramentas para a redução do espaço de busca tem apresentado resultados na dimensão do problema e conseqüente redução do tempo de processamento (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

A recomposição de serviço em redes de distribuição é um caso particular de reconfiguração de rede de distribuição, ocorrendo sempre após a ocorrência de um defeito na rede ou retirada de algum trecho para manutenção programada.

Uma das primeiras aplicações da aplicação de reconfiguração para sistemas de distribuição de energia em situações de contingência é proposta por Aoki et al (1989), sendo apresentado um método de transferências de cargas isoladas de um

circuito afetado por um defeito para outros alimentadores, que são denominados como alimentadores de apoio. Destaca-se que o problema da recomposição da rede de distribuição é complexo e demorado por trata-se de um problema de otimização combinatória, principalmente devido ao número de ramificações e equipamentos de seccionamento. Sendo assim, adota-se um algoritmo sistemático de natureza não combinatória para contornar estas dificuldades. O algoritmo é formulado para considerar as condições de restrição de tensão e carga suportada pelos transformadores e equipamentos, além de ter a preocupação em manter a característica radial da rede de operação.

No que concerne a um sistema de reconfiguração em tempo real, os principais objetivos a serem atingidos na recomposição são os seguintes:

- Restabelecer o maior número de clientes no menor tempo possível;
- Minimizar o número de chaveamentos;
- Priorizar a integração de alimentadores de mesma fonte;

Para atender a esses objetivos é permitindo um relaxamento maior quanto aos aspectos de qualidade de energia. Com relação a tensão de referência o sistema pode apresentar um nível de variação de 10% em situações de contingência (SILVA JUNIOR, 2012).

Além disso, no desenvolvimento de um sistema de reconfiguração deve-se levantar quais as características operativas que serão consideradas restritivas no restabelecimento de energia. Entre as principais restrições utilizadas no restabelecimento do fornecimento de energia destacam-se as seguintes (BERNARDON,2007; RUPOLO;2013; FERREIRA, 2010):

- Os alimentadores em sua configuração final devem manter a configuração radial;
- Atentar para o limite operativo dos equipamentos instalados na rede, como chaves de manobra, transformadores, religadores;
- As tensões devem estar dentro do limite aceitável pelo órgão regulador;
- Atentar para o critério de sensibilidade dos equipamentos de proteção;
- limitar fluxo de corrente máximo e fluxo máximo de potência ativa.

O paralelismo de alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica é uma situação que acontece nos sistemas de distribuição, normalmente para interligações de curta duração, visando a transferência de cargas entre alimentadores em situações de contingência ou mudança de configuração, bem

como em paradas programadas para manutenção de transformadores de potência ou equipamentos de manobra. Ressalta-se que para manter uma condição de paralelismo momentâneo, a concessionária deve realizar estudos prévios de análise deste procedimento. (PONCE 2008).

O desenvolvimento de um método universal e eficiente para o problema de reconfiguração torna-se impraticável, pois existem uma série de fatores e particularidades que são inerentes a cada sistema de distribuição das concessionárias, como o tipo de equipamentos, ramificações da rede, estrutura da rede, nível de automação e sistema SCADA, interface de comunicação entre equipamentos, os quais são fatores que influenciam sobremaneira nas quantidade e qualidade das informações (BERNARDON, 2007).

4.3.1.5 Metaheurísticas

Além destas técnicas tidas como convencionais há também inúmeros estudos que utilizam de métodos de busca não convencionais, denominados de metaheurísticos. A definição de metaheurística segundo Arroyo:

“...o prefixo “meta” é utilizado para descrever uma heurística que está sobreposta a uma outra heurística, constituindo um outro “nível heurístico”. Em geral, uma metaheurística constitui uma estrutura mais genérica baseada em princípios ou conceitos, sobreposta a uma heurística específica do problema em estudo” (ARROYO, 2002, p.37).

Os estudos envolvendo técnicas metaheurísticas de programação no tratamento da reconfiguração são bastante numerosos, bem como o número de métodos e variantes, tais como Busca Tabú, algoritmo de recozimento (“*simulated annealing*”), algoritmos evolucionários, nuvens de partículas (“*particle swarm Optimization*”), algoritmo genético, colônia de formigas.

A metaheurística trata da aplicação de métodos heurísticos para a solução de diferentes problemas. No campo de reconfiguração de sistemas de distribuição encontram-se os algoritmos genéticos, *simulated annealing*, colônia de formigas e algoritmo de busca de tabu (OLIVEIRA, 2011).

O algoritmo genético objetiva solucionar problemas complexos de otimização. Fundamenta-se no conceito de evolução da espécie, no qual a sobrevivência é

restrita aos indivíduos melhor adaptados ao ambiente. Cada indivíduo representa uma solução e as melhores soluções competem entre si para garantir sua permanência. Por meio do operador de recombinação, são combinados diferentes indivíduos, que trocam informações e, através do operador de mutação são criados novos indivíduos, frequentemente melhor adaptados do que os da geração anterior. Neste processo, cada indivíduo é associado a um valor numérico, correspondente a sua qualidade, que determina sua função objetivo. Indivíduos com boa função objetivo se sobressaem aos outros, o que permite uma melhoria contínua na população (OLIVEIRA, 2011).

A *annealing* consiste em um tratamento térmico aplicado na construção de cristais perfeitos. Este processo inicia-se com a exposição do material a temperaturas altas, até atingir o ponto de liquefação. Em seguida, ele é lentamente esfriado, até atingir um estado mínimo de energia, concluindo a transformação. O algoritmo *simulated annealing* é utilizado para resolver problemas combinatórios de otimização e é baseado nesta técnica metalúrgica. Comparativamente, a mudança de estado físico do material corresponde ao espaço solução de um problema de otimização. A energia livre é associada à função objetivo do problema. A temperatura corresponde a um parâmetro de controle, definido como a diferença de qualidade entre duas opções, é determinada visando atingir os resultados esperados. Esse método tem duas características importantes, que são a escolha do vizinho mais interessante e o controle no processo de transição. O algoritmo escolhe aleatoriamente uma solução vizinha de melhor qualidade. Caso contrário a escolha do vizinho de pior qualidade é controlada pela temperatura e pela função objetivo. Se a variação da função objetivo for pequena e/ou a temperatura está alta, a solução inicial pode ser substituída quase que randomicamente, por uma solução de menor qualidade. Durante o processo de otimização a temperatura é gradualmente reduzida fazendo com que, no final, sejam realizadas substituições para vizinhos de melhor qualidade (OLIVEIRA, 2011).

A metaheurística colônia de formigas baseia-se literalmente no comportamento de uma colônia de formigas para a solução de problemas complexos. O feromônio presente nas formigas permite que estes insetos sejam capazes de selecionar os melhores caminhos, de forma cooperativa, para uma determinada fonte de suprimentos. Quando caminham do formigueiro em busca do alimento, as formigas depositam feromônios no chão construindo trilhas. Quanto

mais feromônio uma trilha possui, mais formigas vão passar por ela, reforçando o caminho que novamente atrai ainda mais insetos. O algoritmo baseado no comportamento das formigas apresenta "formigas artificiais" que liberam feromônio durante o seu trajeto e seguem "trilhas de feromônio artificial" para encontrar o menor caminho (OLIVEIRA, 2011).

O algoritmo busca tabu tem fundamentos de inteligência artificial e de conjuntos de funções que possibilitam que problemas complexos sejam resolvidos. Este algoritmo não tem relação com processo de otimização biológico ou químico. Partindo de uma situação de solução inicial, o algoritmo avança em busca de outra solução (melhor que a anterior) associada a sua vizinhança até que se satisfaça um critério de parada. A solução final é chamada de ótimo local e corresponde a melhor de todas as soluções dentro da vizinhança. Dois aspectos caracterizam o algoritmo de tabu. O primeiro é o processo de movimento, que se caracteriza pela passagem de uma solução em busca de outra melhor. O segundo é que o conjunto de vizinhança que varia dinamicamente o que permite que o algoritmo, quando não encontrar uma solução satisfatória dentro da vizinhança realize uma busca eficiente no conjunto solução do problema. Neste método, há um artifício proibitivo que busca impedir que o algoritmo volte a uma configuração já visitada para evitar a ciclagem. Contudo, em casos em que haja uma solução de qualidade satisfatória, que possua atributos proibidos, o algoritmo não poderá apresentar essa solução. Para evitar que boas soluções sejam impedidas há uma função denominada critério de aspiração que elimina a proibição caso a solução atenda o critério de aspiração (OLIVEIRA, 2011).

A técnica de busca tabu é identificada como um dos métodos metaheurístico de melhor desempenho, tanto para sistemas pequenos como maiores. A conclusão é obtida no trabalho comparativo de referencia (TOUNE et al., 2002).

Neste trabalho é feito uma análise comparativa entre as técnicas: Algoritmo Genético, Parallel Simulated Annealing, Busca Tabú e busca tabu reativa. O ambiente de simulação era composto por circuitos de 18, 24,30, 36,48 e 60 seções.

O resultado obtido com relação ao tempo de processamento pode ser observado no Gráfico 1.

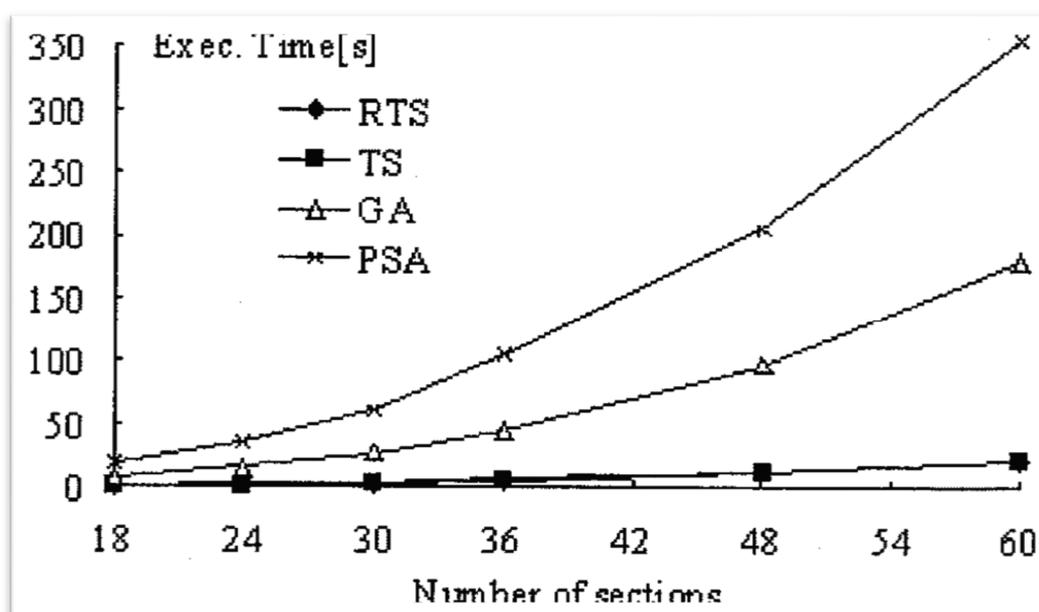


Gráfico 1 - Resultado obtido com relação ao tempo de processamento
 Fonte: Toune et al. (2002).

Os métodos metaheurísticos exigem ajustem de parâmetros iniciais que tornam a pesquisa muito mais eficiente quando bem determinados. Sendo que, estes parâmetros são específicos para cada problema abordado, sendo este a maior desvantagem com relação a utilização destas técnicas.

A diferença presente no sistema de busca tabu reativa (“reactive Tabu search”) é que esse sistema introduz uma técnica de retroalimentação no desenvolvimento do problema.

No trabalho de referencia (BERNARDON,2007) é desenvolvido um sistema de reconfiguração para utilização em situações de planejamento e contingência. No tratamento da reconfiguração é utilizado o método de Bellman-Zadeh, que usa algoritmo Fuzzy, que é eficiente em avaliações de multicritério. O objetivo desta abordagem é a necessidade de que no processo de tomada de decisão a solução encontrada pode ser customizada para cada concessionária, sendo que esta solução será a que melhor atender as funções objetivo respeitando as restrições, avaliando inclusive aspectos qualitativos.

Os métodos apresentados são utilizados em caráter concentrado, sendo que a inteligência do sistema está presente no concentrador de informações, o qual possui as variáveis analógicas, estados das chaves, sendo desta maneira classificado como um sistema centralizado.

Nesse sentido também surge a aplicação de inteligência distribuída no desenvolvimento de sistemas de reconfiguração.

4.4 INTELIGÊNCIA DISTRIBUÍDA

A operação da rede de distribuição de forma autônoma ainda tem um longo percurso, porém com a evolução da tecnologia e a inserção de inteligência nos equipamentos de manobra da rede de distribuição e os investimentos em automação estão contribuindo para a formação de uma rede inteligente (FALCÃO,2010).

Quando ocorre um distúrbio na rede de distribuição os equipamentos de proteção devem operar de maneira a suspender o fornecimento de energia até que o problema seja identificado e solucionado. Nos sistemas de distribuição o principal equipamento de proteção é o religador ou disjuntor instalado na subestação fonte do alimentador. Além disso, muitos alimentadores possuem religadores ou chaves automatizadas no tronco e até nas derivações deste alimentador.

Em um sistema de distribuição moderno e inteligente, a disposição e quantidade de equipamentos de monitoramento e controle é fundamental para as etapas de isolar e restabelecer a rede, aumentando o número de informações e chaveamentos, por outro lado a consequente explosão combinatória de possibilidades de manobra em sistemas reais é verificada.

Com a instalação e utilização de equipamentos IEDs dispersos pela rede surge a possibilidade de adotar um sistema de inteligência distribuída no tratamento de problemas da rede de distribuição, sendo a reconfiguração automática um dos problemas a ser resolvido.

A reconfiguração automática de forma centralizada apresenta como principal dificuldade a resolução do problema de forma otimizada em sistemas maiores, além da dificuldade em contornar as mudanças topológicas da rede de distribuição, principalmente com a inserção de grande número de pequenas unidades de geração distribuída e o aumento do nível de incerteza devido aos recursos renováveis, gerando variações na demanda. As redes inteligentes, portanto, representam uma solução promissora para enfrentar estes desafios através do desenvolvimento e

reforço da automação de distribuição, a operação distribuída de funções, e a redução ou eliminação da intervenção humana. (ZIDAN, 2012).

O Sistema Multi-Agente (SMA) é um sistema composto por múltiplos agentes distribuídos em um ambiente, os quais são dotados de um comportamento autônomo, tanto na recepção de dados como na tomada de decisão. Os modelos multi-agentes são orientados para interações, exercendo o fenômeno da colaboração e autonomia. (NAGATA, 2003)

Sendo assim, pode-se destacar que os agentes do sistema devem possuir duas características básicas, sendo uma delas a capacidade de agir de forma autônoma, possuindo conhecimentos e métodos de busca da base do problema, provendo a tomada de decisão para atingir o seu objetivo. A outra característica é a capacidade de interação social, inspirado nos humanos. As principais são capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interação social inspirados nos humanos e incluindo pelo menos algumas das seguintes funcionalidades: coordenação, cooperação, competição e negociação (ZIDAN,2012).

O elemento agente é composto basicamente de duas partes que possibilitam a integração dele ao ambiente que está inserido. As ferramentas que o agente deve possuir são os sensores para obter as informações do ambiente e os atuadores, que são responsáveis em executar as ações que são tomadas de acordo com o resultado da análise implementada no agente. A ilustração do agente é apresentada na Figura 14. (SARAIVA,2012)

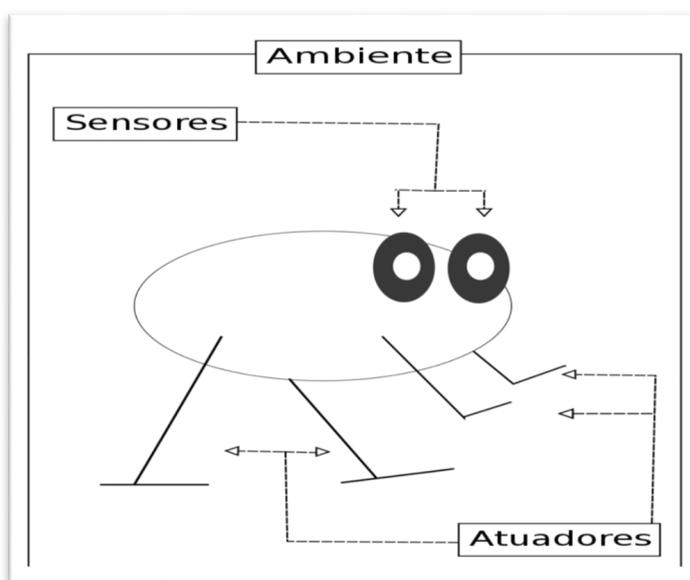


Figura 14 – Agente
Fonte: Saraiva (2012).

Na modelagem dos agentes para a utilização em problemas de distribuição de energia são identificados 4 tipos de agentes: os feederAgents, que são responsáveis pela supervisão dos alimentadores; os switcherAgents, que monitoram as chaves do sistema e seus estados; os loaderAgents, que verificam as demandas das cargas do sistema e podem executar rotinas de cálculos e também o demandChanged, que é responsável por enviar as leituras de demanda para o loaderAgent.

A modelagem desses agentes é baseada no elemento genérico electricalAgent que possui os parâmetros para as classes de agentes. Os campos classes do electricalAgent estão na Figura 15. (SARAIVA, 2012)

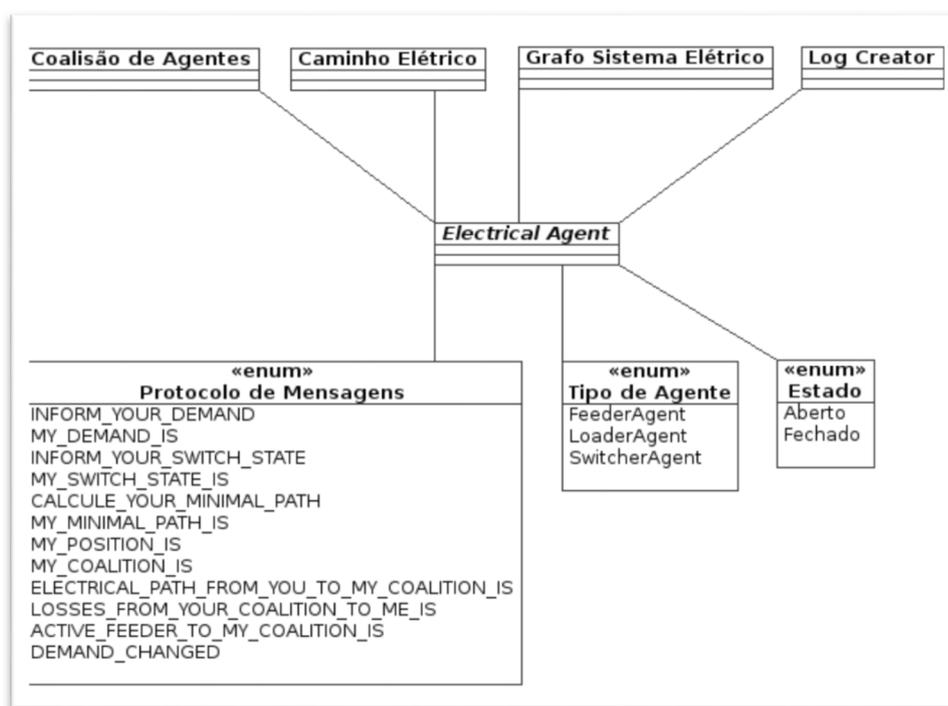


Figura 15 –Campos classes do electricalAgent
Fonte: Saraiva (2012).

No trabalho de referência (ZIDAN,2012) é desenvolvido um sistema de multi-agentes para restabelecer o sistema de distribuição e também realizar a detecção e isolamento da falha. Neste trabalho é destaca-se alguns pontos que não tinham representam na literatura como: desenvolvimento de um uma estrutura de controlo adequado e mecanismo de funcionamento a ser implementado em cada agente, a coordenação e comunicação adequada entre agentes em uma forma distribuída; um

processo geral para um algoritmo de restauração, que seja eficaz para qualquer rede de distribuição; a consideração de variação de carga, as prioridades de carga e operacional restrições; um modelo de simulação adequado para a verificação da eficácia da estrutura de controle proposto.

Na aplicação de um sistema multiagentes para a recomposição de uma rede de distribuição, a integração entre os equipamentos sensores e atuadores e o agente é primordial. Os equipamentos sensores e atuadores para o caso da rede de distribuição são as chaves de rede, religadores, reguladores e banco de capacitores.

Os agentes são responsáveis por receber os dados do equipamento que é de sua responsabilidade, enviar as informações e receber de outros agentes. As principais informações que os agentes recebem são as leituras de variáveis analógicas (corrente e tensão), variáveis binárias (estado da chave ou religador), indicação de sobrecorrente detectada. Os agentes, com as informações do seu ambiente, e também do ambiente de outros agentes pertencentes ao seu sistema, podem tomar suas decisões de forma inteligente e autônoma.

5 APLICAÇÕES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO BRASIL

O sistema de distribuição de energia brasileiro é formado basicamente por redes convencionas, sendo estas estruturas aéreas e sem qualquer proteção mecânica. Tendo em vista, que é impossível que o sistema seja imune ao surgimento de defeitos transitórios e permanentes, desde uma simples queda de árvore sobre a rede até defeito em equipamentos da rede, surge a necessidade de sistemas que minimizem os problemas decorridas das ocorrências.

O sistema de reconfiguração automática é uma alternativa para que as concessionárias possam manter índices de continuidade e qualidade de energia dentro das exigências das agências reguladoras.

No Brasil a aplicação de sistemas inteligentes que são capazes de operar de forma autônoma não é a regra para a rede de distribuição. Porém, já é possível encontrar algumas soluções de mercado e outras desenvolvidas através de parcerias entre as concessionárias e as universidades.

A seguir é apresentado um sistema de reconfiguração comercial, caracterizado por tratar-se de um sistema multi-agentes, porém que possui uma arquitetura de agentes “proprietária”.

5.1 SISTEMA DE RECOMPOSIÇÃO AUTOMÁTICA INTELLITEAM

Segundo Ohara (2009), no sistema de recomposição automática Intelliteam, a recomposição automática é executada por meio de dispositivos de manobras conectados entre si. Tais dispositivos podem ser chaves tripolares sob carga ou religadores. Na ocorrência de um defeito, o sistema identifica o trecho, isola-o e recompõe o maior número de clientes possíveis utilizando fontes alternativas de subestações interconectadas.

5.1.1 Princípio de Funcionamento do Sistema

O funcionamento do sistema de recomposição automática ocorre em duas etapas: inicialmente o trecho no qual ocorre a falta é isolado e, em seguida, recompõe-se o sistema.

Conforme Ohara (2009).

a) Isolamento da falta:

Para isolar a falta o sistema terá um comportamento diferente quando o equipamento presente na rede é um religador ou uma chave.

Quando o trecho com defeito estiver localizado após um religador, este equipamento irá efetuar a abertura e isolar o trecho. Se a falta ocorre após uma chave, o agente irá detectar a sobrecorrente e repassar a informação para o agente acoplado a chave. Após o disjuntor do alimentador efetuar as operações e permanecer desligado, o agente da chave irá comandar a abertura dessa chave e repassar a informação para os outros agentes. A chave não deve operar sob condições de abertura de curto circuito.

b) Recomposição Automática do Sistema:

Após o isolamento da falta, cada agente envia aos demais as informações sobre a ocorrência. Considerando as informações dos agentes adjacentes, cada um tomará a decisão de fechar o religador ou chave sob carga, restabelecendo a tensão no trecho. A decisão de fechar a chave ou religador segue as seguintes regras:

- a falta não pode estar no trecho recomposto;
- o trecho a ser recomposto é transferido para outro alimentador, porém este não pode ficar sobrecarregado. Antes da transferência é imprescindível a verificação da carga. Caso a recomposição sobrecarregue o alimentador, e considerando que exista uma outra alternativa para execução da recomposição, o sistema irá fechar a chave conectada ao alimentador alternativo.

A Figura 16 ilustra um sistema exemplo, constituído de 12 chaves sob carga (chaves nomeadas de A a M). Quatro alimentadores que indicam quatro fontes provenientes de quatro subestações (SUB1, SUB2, SUB3 e SUB4), dotados de disjuntores na subestação com lógica de religamento, sendo que em condição normal SUB2 atende ao trecho em verde, SUB3 ao trecho em laranja, SUB4 ao trecho em azul e SUB1 serve como fonte alternativa de interconexão.

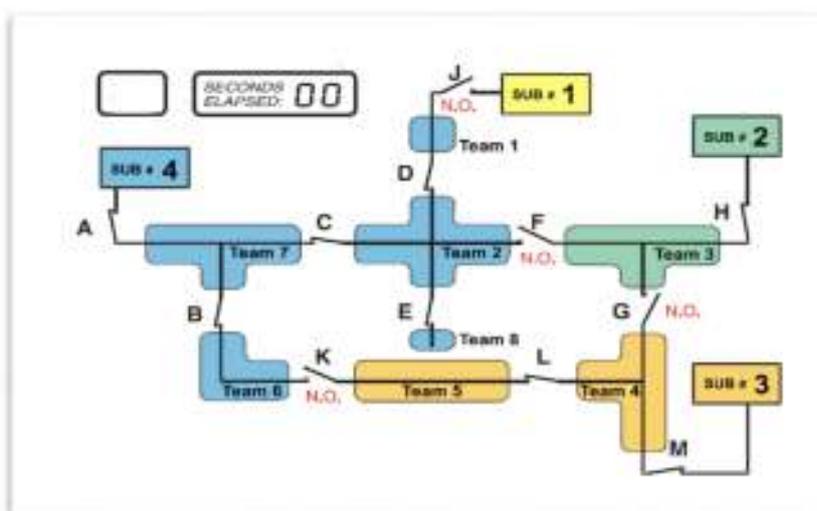


Figura 16 - Sistema exemplo em sua configuração normal
Fonte: Ohara, 2009.

Se ocorre uma falta entre as chaves A,B,C, como ilustrado na Figura 17, considerando que são chaves sob carga, sem capacidade de interrupção de falta, o disjuntor da subestação 4 irá interromper a falta, deixando todo o trecho em azul desligado.

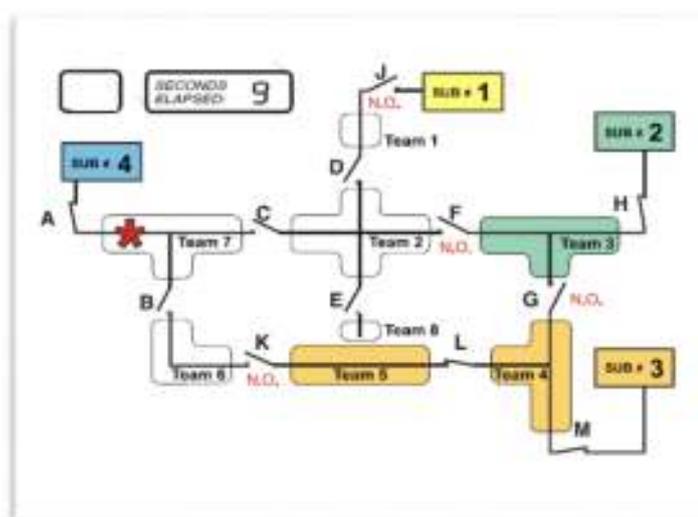


Figura 17 - Falta entre as chaves A,B e C
Fonte: Ohara, 2009.

Após detectar a falta de tensão, as chaves A, B, C, D e E (normalmente fechadas) receberam comandos para abrir, seguindo a premissa de isolar a falta. Em seguida, os agentes instalados nas chaves trocam as informações entre eles e com os agentes dos alimentadores. As principais informações são a ausência de tensão, detecção de sobrecorrente, posição da chave, nível de corrente pré-falta). Em seguida, é dado início ao processo de recomposição automática do sistema.

O agente da chave J (normalmente aberta), com as informações do agente da chave D, saberá que o trecho entre eles está desligado, e que D não detectou falta de sobrecorrente, logo a falta não está neste trecho. A conclusão é que poderá restabelecê-lo através do alimentador SUB1, e então, fechará a chave J. A chave F receberá informações das chaves D, E e C, e tomará a mesma decisão (fechar a chave F), restabelecendo pelo alimentador SUB2 este trecho. Situação ilustrada pela Figura 18.

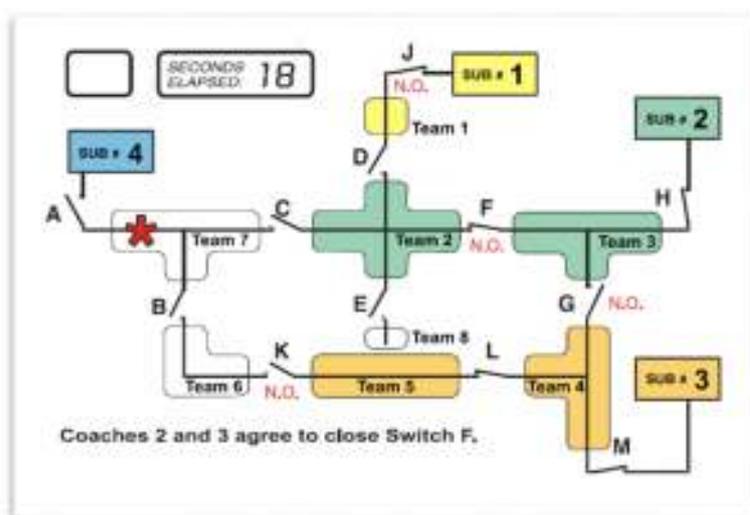


Figura 18 - Chaves J e F fecham
Fonte: Ohara, 2009.

Após estas recomposições, as chaves K e E (no caso da chave K não houve perda de tensão). A chave K recebe a informação de B, de que não ocorreu falta no seu trecho, e decide por reestabelecer este trecho através dar SUB3. A chave E receberá também informações de C, D e F, e também decidirá por fechar. As chaves B e C receberão a informação de que a chave A detectou sobrecorrente, logo, a falta encontra-se neste trecho e nenhuma delas decidirá por fechar, o sistema é mantido conforme Figura 19.

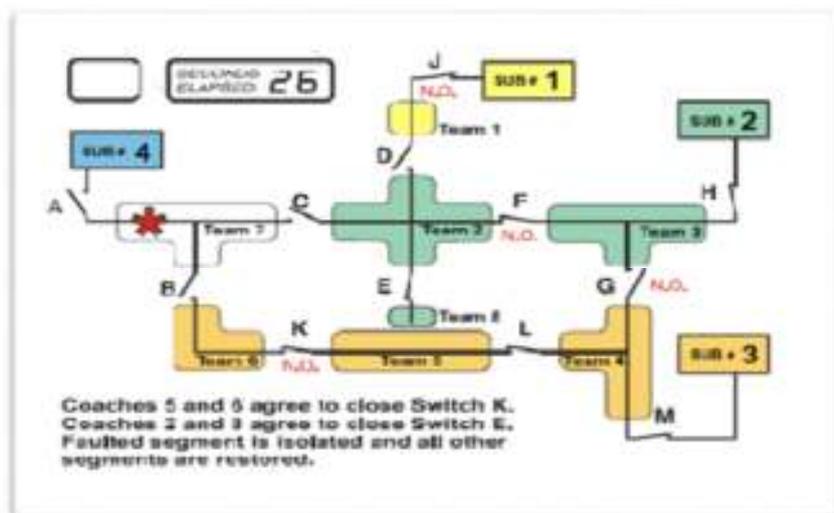


Figura 19 - Sistema após a reconfiguração automática

Fonte: Ohara, 2009.

Este processo caracteriza o conceito de *Self-healing*, pois conduz, de forma automática, a recomposição do maior número possível de cargas do sistema.

Segundo o fornecedor do sistema, o tempo estimado de recomposição, conforme demonstrado entre as figuras 16 a 19, é de 26 segundos. Inferior, portanto, ao tempo mínimo para que a Aneel contabilize o tempo de interrupção para cálculos dos indicadores DEC e FEC. A recomposição manual, feita por um despachante no Centro de Operações, levaria em torno de 30 minutos para isolar e recompor a falta. Com o Sistema de Recomposição Automática haveria redução de registro dos indicadores DEC e FEC. Somente os consumidores do trecho entre A,B e C, contariam na apuração dos indicadores, enquanto que a atuação manual, mesmo que remota, ocasionaria registros em todo o trecho alimentado por SUB4.

5.2 SISTEMA DE INTELIGÊNCIA CENTRALIZADA

5.2.1 Plataforma de simulação de Sistema de recomposição automática -Coelce

Recentemente, um artigo de autoria de Oliveira et al, apresentado no XXI SENDI, apresenta um Piloto de integração de um SRA ao sistema SCADA no Centro de Controle do Sistema (COS) da Companhia Energética do Ceara - Coelce para operação online. Trata-se da Automação do Sistema Elétrico de Distribuição implementado na cidade Aquiraz, onde situa-se a Cidade Inteligente da Coelce. Segundo os autores, o Sistema de Recomposição Automática (SRA) implantado

baseia-se no modelo de Redes de Petri Coloridas (RPC) e foi desenvolvido em linguagem C# utilizando o programa Microsoft Visual Studio 2010. O teste foi feito em modo *off-line* através de um sistema simulador desenvolvido para este fim. As simulações demonstraram um desempenho satisfatório capaz de recompor a rede elétrica com rapidez e confiabilidade.

A rede de distribuição da cidade de Aquiraz está representada na Figura 20.

Três subestações a suprem diretamente, a SE AQZ (Aquiraz), SE ESB (Eusébio) e SE AGF (Água Fria) todas em 69 kV/13,8 kV. A SE AQZ supre a maior parte da carga da rede.

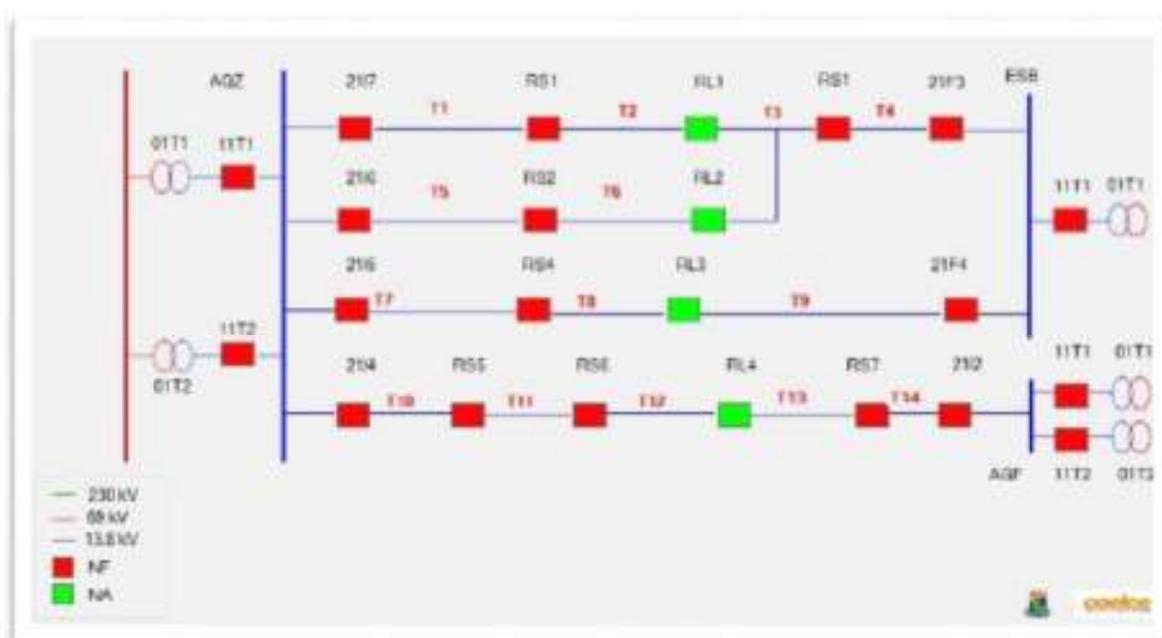


Figura 20 - Rede de distribuição de Aquiraz
Fonte: Oliveira et al. (2014).

A SE Aquiraz (AQZ) possui:

- Quatro alimentadores de distribuição em 13,8 kV;
- Quatro religadores (2114, 2115, 2116 e 2117) com a função de proteger cada alimentador sob sua responsabilidade;
- Ao longo do alimentador existem um ou mais religadores (cor vermelha) e chaves de encontro de alimentadores normalmente abertas (cor verde), com a função de transferência de carga para outra subestação.

A rede Aquiraz é dividida em 14 trechos (T1 – T14). Os religadores foram alocados ao longo dos troncos de alimentadores e as chaves seccionadoras foram alocadas nos encontros de alimentadores. Normalmente a SE ESB supri os trechos (T3, T4 e T9) e SE AGF os trechos (T13 e T14). Em situações de contingência essas três subestações podem suprir todo ou parcialmente o sistema de Aquiraz.

Ao simular uma falta no trecho T12, as funções de proteção dos relés associados aos religadores RS6, RS5 e 2117 são ativadas iniciando as funções de proteção simuladas. Normalmente, o religador RS6 deve abrir retirando a parte afetada pela falta. Considerando na simulação uma falha de abertura do religador RS4 e a descoordenação entre os relés associados aos religadores 2114 e RS5, o relé associado ao religador 2114 atua abrindo este religador desativando todo o alimentador. O SRA identifica uma falta no trecho T12 e isola-o abrindo o religador RS5, dado que o religador RS6 apresentou defeito e, em seguida fecha o religador 2115 para recompor o trecho T10 que foi afetado.

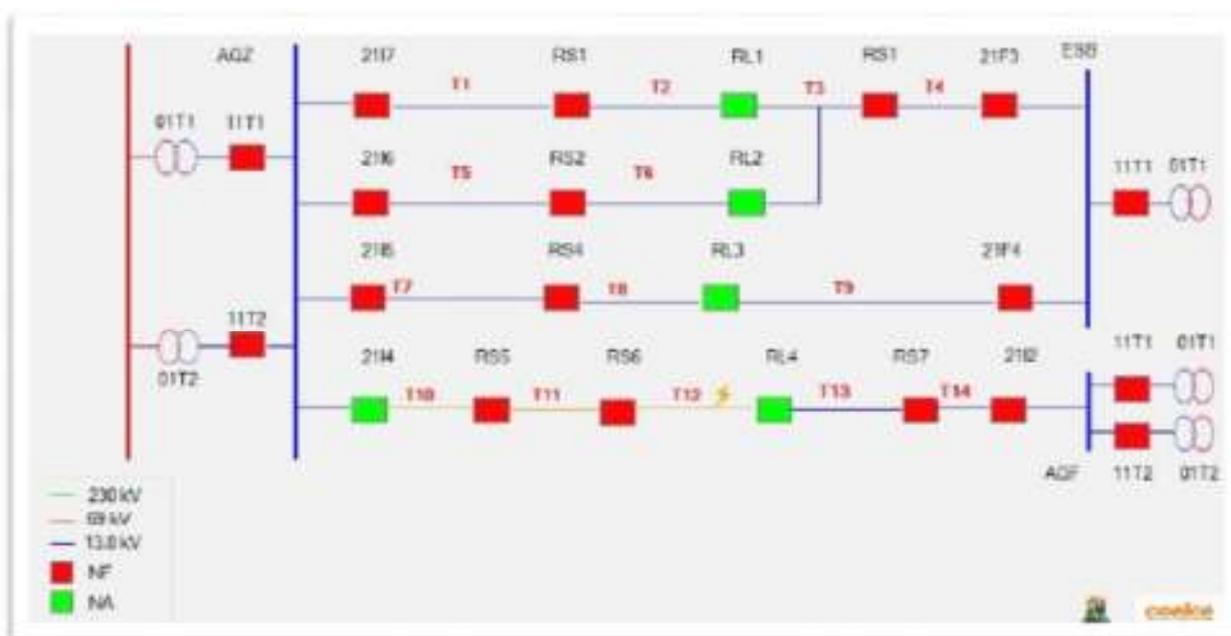


Figura 21 - Resultado da recomposição - falta em T7 e T12
Fonte: Oliveira et al (2014)

O SRA foi capaz de analisar a falha do equipamento e descoordenação da proteção e reestabelecer o trecho T10. O trecho T11 não foi recomposto em razão da falha do religador RS6. Cabe destacar que o tempo de recomposição é determinado pelo tempo de comunicação entre os equipamentos em campo.



Figura 22 - Resultado obtido pelo SRA após a recomposição
Fonte: Oliveira et al. (2014).

O programa disponibiliza a informação da quantidade de clientes desenergizados, nesta simulação, dos 5388 clientes desenergizados inicialmente, houve recomposição para aproximadamente 69% destes (3735 clientes).

5.2.2 Aplicação não comercial aplicada na concessionária AES SUL

O artigo “Uso dos conceitos de smart grid no processo de restabelecimento automático de energia”, fundamentado no conceito de redes inteligentes, apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para reestabelecimento da energia elétrica de forma automática, por meio de equipamentos telecomandados. A ferramenta foi aplicada em uma região piloto pertencente à área de concessão da AES Sul Distribuidora Gaúcho de Energia S.A.

Basicamente a ferramenta consiste em analisar a viabilidade de transferência de carga, por meio de simulações computacionais, que mostram as chaves a serem manobradas, proporcionando o reestabelecimento da energia de forma segura, ágil e confiável.

Para o desenvolvimento desta ferramenta foi utilizado o método de Bellmann-Zadeh que, por sua vez, utiliza o algoritmo *fuzzy*, o que permite encontrar soluções multicritérios e pertencentes à área de comprometimento de Pareto.

5.2.2.1 Metodologia para cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição

O método do fluxo de potência foi implementado na metodologia da recomposição automática da rede, com a finalidade de analisar a viabilidade técnica das transferências de carga. Consideram-se as cargas pré-falta e uma previsão para as próximas três horas subsequentes nas quais ficam asseguradas as condições de transferência para este período.

Com a consideração de que a rede opera de forma radial, o cálculo do fluxo de potência é feito utilizando-se o algoritmo de somatório de correntes.

5.2.2.2 Metodologia proposta para operação automática de equipamentos telecomandados para reestabelecimento de energia elétrica

A Figura 23 tem a finalidade de apresentar a lógica de funcionamento dos equipamentos telecomandados para reestabelecimento automático da energia elétrica.

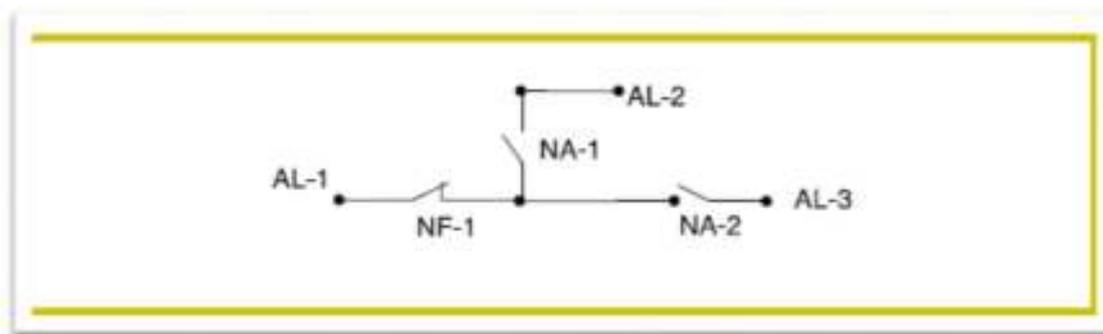


Figura 23 - Rede de distribuição
Fonte: Bernardon et al (2012).

Em situação normal, a chave NF-1 está fechada e as chaves NA estão abertas. Estes equipamentos são telecomandados, caso seja necessário reestabelecer a energia elétrica.

Segundo os autores, considerando o desarme do alimentador AL-1, o processo de reestabelecimento da energia se dá da seguinte forma:

Defeito à jusante da chave NF-1: Ocorre sinalização, em tempo real no sistema SCADA, dos valores do curto-circuito medidos na chave NF-1. O sistema

assume que a falha ocorreu após a chave e, automaticamente, comanda a abertura da chave NF1 e religamento do alimentador AL-1.

Defeito à montante da chave NF-1: Não são sinalizados no sistema SCADA os valores de curto-circuito na chave NF-1. Assume-se, então, que o defeito ocorreu antes da chave NF-1. O sistema, automaticamente, comanda a abertura da chave NF-1 e fechamento das chaves NA-1 ou NA-2, transferindo os consumidores à jusante da chave NF-1 para outro alimentador. A decisão das transferências de carga para um ou outro alimentador é feita por meio de simulações computacionais realizadas em tempo real.

5.2.2.3 Metodologia proposta para escolha das chaves telecomandadas a serem manobradas a partir de análise multicritério

A definição sobre a melhor opção para as transferências de cargas, após a ocorrência de contingência, usando os equipamentos telecomandados, se dá em função das funções-objetivo e restrições definidas.

As seguintes funções-objetivo e restrições foram definidas para as análises de transferência de carga:

Funções-objetivo:

- Reestabelecer a energia para o maior número de consumidores;
- Realizar o número mínimo necessário de operações de comutação para as transferências de carga.
- Minimizar o número de consumidores interrompidos por ano.

Restrições:

- Manter a operação radial dos sistemas;
- Não permitir sobrecarga, superior ao percentual permitido, nos elementos pertencentes às redes de distribuição;
- Não permitir violação dos ajustes de proteção;
- Não permitir violação de faixa de tensão admissível nas redes primárias.

O atendimento as funções-objetivo e restrições são analisados durante o cálculo do fluxo de potência para as alternativas consideradas. O número de

consumidores interrompidos ano é dado a partir das equações clássicas de confiabilidade, também durante o cálculo do fluxo de potência.

Considerando que há três funções-objetivo, a identificação da melhor opção para as transferências de carga torna-se um processo complexo. Uma determinada opção pode atender reestabelecer o maior número de consumidores, enquanto outra opção atende o menor número de chaves a ser manobradas e, ainda uma outra opção, atende o menor número de consumidores interrompidos ano. O método que se mostrou eficiente para solucionar este problema foi o algoritmo de Bellman-Zadeh, que permite, além da análise dos critérios quantitativos, a análise de critérios qualitativos.

Todas as funções-objetivo são convertidas em funções-objetivo *fuzzy* e apresentadas na forma de conjuntos *fuzzy*. Conforme o método Bellman-Zadeh a solução considerada ótima apresenta o valor máximo da intersecção das funções de pertinência, conforme apresentado no Gráfico 2:

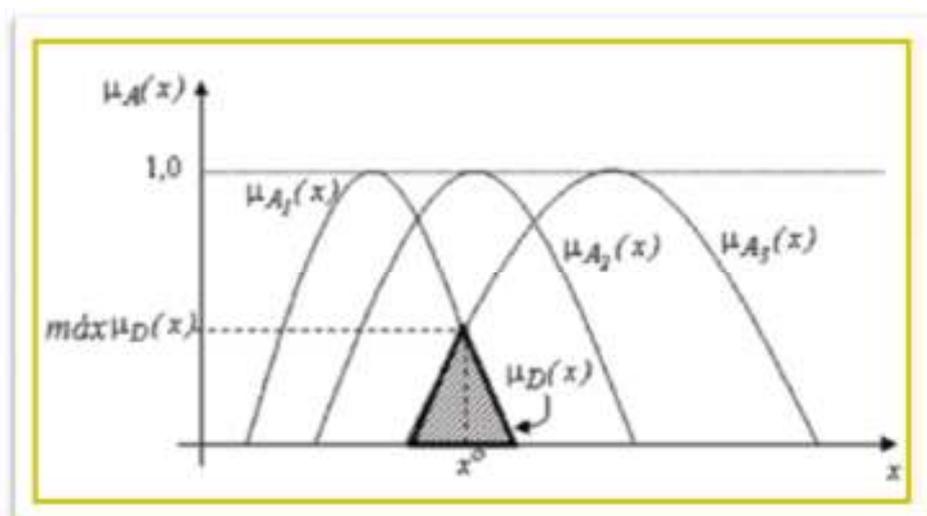


Gráfico 2- Intersecção das funções de pertinência e definição da área de soluções.
Fonte: Bernardon et al (2012)

A aplicação do algoritmo de Bellman-Zadeh para seleção da melhor opção de transferência de cargas está ilustrada na Figura 24:

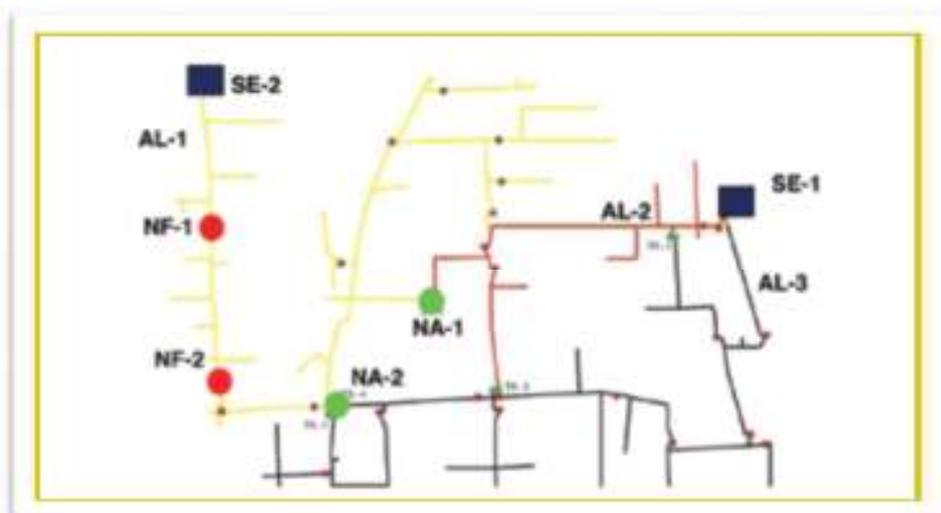


Figura 24 - Rede de distribuição do teste
Fonte: Bernardon et al (2012).

Neste sistema há duas subestações SE1 e SE2, em que o alimentador da SE 2, que possui as chaves telecomandadas NF-1 e NF-2, interliga-se com dois alimentadores da SE1 por meio das chaves telecomandadas NA-1 e NA-2. No caso de falhas à montante da chave NF-1, analisa-se a possibilidade de transferência de carga para o alimentador AL-2 ou AL-3, sem violar as restrições.

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de Bellman-Zadeh indicam que a manobra a ser executada é abrir a chave NF-1 e fechar a NA-1.

De acordo com o método proposto, a melhor opção, que atende as funções-objetivo e respeita as restrições estabelecidas, é aquela que resulta no valor máximo da intersecção das funções de pertinência.

5.2.2.4 Aplicação

Esta ferramenta foi aplicada em uma região piloto sob concessão da AES Sul, em uma rede composta por 20 subestações de distribuição, 125 alimentadores, 62 equipamentos telecomandados e que atende 563.619 consumidores. A redução esperada nos indicadores é de 18,25% no DEC anual e 21,31% no FEC anual. Segundo os autores, os testes realizados apresentaram resultados satisfatórios.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de distribuição de energia é de suma importância para a sociedade como um todo, atendendo a objetivos comerciais e sociais. As exigências com relação ao fornecimento de energia elétrica tornam o mercado competitivo e regulado, pressionando as concessionárias na busca de soluções para evitar a descontinuidade no fornecimento de energia. Tendo em vista a característica do sistema de distribuição do Brasil, que na maior parte é composto de um sistema aéreo convencional (cabo desprotegido), evitar que ocorram falhas no sistema de distribuição é impossível, sendo assim são necessários investimentos em tecnologias para minimizar os efeitos decorrentes de um problema na rede de distribuição.

A abertura do mercado de energia elétrica e a regulamentação da ANEEL são fatores determinantes para as melhorias dos serviços prestados pelas concessionárias de energia. Os índices relativos a continuidade do fornecimento de energia elétrica são diretamente afetados pelo tempo e quantidade de consumidores atingidos em caso de defeito no sistema elétrico. O tempo que a concessionária possui para o restabelecimento de energia é relativamente curto comparando-se com a extensão do sistema de distribuição, sendo assim a automação da rede torna-se fator determinante para que a concessionária possa eliminar e restabelecer os defeitos que ocorrem na rede de distribuição. Com a evolução da tecnologia digital e eletrônica a possibilidade de instalação de equipamentos inteligentes tanto na subestação como na rede representa uma evolução. Tais equipamentos como religadores, seccionadoras, identificadores de falta facilitam a operação do sistema de distribuição, porém acrescentam um número grande de informações que devem ser tratadas tradicionalmente pelos operadores.

A reconfiguração do sistema de distribuição é objeto de estudos há mais de trinta anos, sendo os primeiros estudos tiveram como foco principal a redução de perdas por efeito Joule e o balanceamento da rede. A recomposição da rede é um tipo de reconfiguração específica que ocorre após um distúrbio, normalmente curto circuito. Sendo assim, a localização do evento é parte inicial do problema de recomposição, porém essa situação é tratada distintamente na literatura técnica.

O sistema de diagnóstico de faltas é utilizado para classificar, localizar, detectar os distúrbios que ocorrem na rede. Dependendo do nível de automação da rede, com equipamentos de proteção distribuídos é possível que o sistema de proteção já isole a falta automaticamente no menor trecho possível, restando identificar os equipamentos que não podem ser manobrados e restabelecer o restante do alimentador. Já em situações onde não há quantidade considerável de equipamentos inteligentes distribuídos é necessário o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico que utiliza as informações de corrente e tensão diretamente do equipamento instalado na subestação. Nestes casos destacam-se os desenvolvimentos que utilizam das técnicas de redes neurais artificiais e lógicas Fuzzy, devido a seu alto desempenho computacional e capacidade de tratar as incertezas do problema. Com a informação do trecho em que está localizada a falta, a operação seguinte é a recomposição do sistema.

Os métodos clássicos aplicados a reconfiguração têm o inconveniente de que o espaço amostral não é limitado, podendo ocorrer chaveamentos em alimentadores que não estão envolvidos com o defeito, ocasionando operações rápidas mas que trazem prejuízos a imagem da concessionária.

Na evolução do tratamento do problema da reconfiguração são utilizados métodos de programação matemática, sendo que este problema é tratado como um problema de otimização combinatória. Destaca-se que as funções objetivo estão relacionados normalmente a redução da perda de energia transmitida e minimizar a quantidade de consumidores atingidos. Sendo que, as restrições estão voltadas para manter o sistema operando de forma radial e respeitando os limites de carregamento dos circuitos alimentadores e limites operacionais dos equipamentos da rede. Para atingir estes objetivos são utilizados métodos como o branch-and-bound, porém em alguns casos pode não ser atingida a solução ótima ou o tempo para isso torna inviável a aplicação em tempo real, sendo assim devem ser utilizadas técnicas para evitar a explosão combinatória na solução do problema. Também há estudos que utilizam de métodos de busca não convencionais, conhecidas como heurísticas, sendo que a busca tabu é a técnica que apresentou os melhores resultados, essa afirmação é obtida de um artigo comparativo com outras técnicas de busca não convencionais.

Outra opção para executar a reconfiguração do sistema é a possibilidade de utilizar sistemas de inteligência distribuída, como o multi agentes, que monitora e

controla um equipamento e toma as decisões conforme o seu programa de forma autônoma. Logicamente as ações são feitas após uma interação entre os equipamentos participantes da rede.

No contexto nacional, a utilização de sistemas de reconfiguração encontrados na literatura técnica é apresentada no capítulo final, através de duas concessionárias que aplicam sistemas distintos, um de inteligência centralizada e outro de inteligência distribuída. Os resultados atingidos, sob o aspecto operacional, são completamente perceptíveis, pois na ocorrência de uma situação de contingência em um sistema que não é dotado de um sistema automático de reconfiguração, seria necessários deslocamentos de equipes de manutenção para operar as chaves, além da intervenção humana na análise da ocorrência do defeito e determinação da sequência de manobras.

Sendo assim, com um sistema de reconfiguração robusto e eficiente os ganhos operativos certamente produzirão ganhos econômicos, compensando o investimento inicial.

REFERÊNCIAS

ABREU, Yolanda V. de. **A Reestruturação do setor elétrico brasileiro: Questões e perspectivas**. São Paulo: USP, 1999. 184 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível: < <http://www.aneel.gov.br> >. Acesso em 05 de fevereiro 2014.

_____. **Atlas de Energia elétrica no Brasil**, 2. ed. Capítulo 1: Características Gerais. Brasília-DF. 2002. Disponível em: < www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf >. Acesso em: 01 de Outubro de 2014.

_____. **Atlas de Energia elétrica no Brasil**. 3. ed. Capítulo 10: Aspectos Institucionais. Brasília-DF. 2008. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf> >. Acesso em: 01 de Outubro de 2014.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica**. Brasília, 2012. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82> >. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2014.

ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. 1.ed. São Paulo: Ed. Art-Liber, 2001

ALMEIDA, Marcos Antônio D. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

ALVES, Helton do N.; MACHADO, Raphaela C. **Um algoritmo genético para localização de faltas em redes aéreas radiais de distribuição de energia elétrica**. In: V CONNEPI. 2010, Alagoas. Disponível em: < <http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1924/564> >. Acesso em: 26 set. 2014.

ALVES, Helton N.; FERNANDES, Thiago R. **Aplicação da Heurística Fuzzy na Alocação de Chaves no Sistema de Distribuição**. 2011. Anais do X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 18 a 21 de setembro de 2011, São João Del Rei-Mg-Brasil.

AOKI, Kenish; et al. **A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.4, n.3, p.1832 - 1839, 1989. Disponível em: > <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=32679>. Acesso em: 15 out. 2014.

ARROYO, José Elias Cláudio. **Heurísticas e Metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. 2002. 256p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: < www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000256530 >. Acesso em 12 out. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Setor de Distribuição: A Distribuição da energia**. Disponível em: < <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia> >: Acesso em: 12 mar. 2014.

AZEVEDO, Fernando A. **Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica Subterrânea Reticulada através de Algoritmos Genéticos**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

BANCO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL (BRDE). **Novo Marco regulatório do Setor Elétrico**, 2004. Disponível em: < www.brde.com.br/.../IS%202004-01%20MARCO%20REG%20SETOR%... >. Acesso em 10 jun. 2014.

BAER, B. **Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems**, IEEE-PES Winter Meeting, Singapore, 23-27 January.

BARAN, Mesut E.; WU, Felix F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989. Disponível em : < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=25627> > Acesso em 16 out. 2014.

BARROS, João Victor C. **Sistema Multiagente para recomposição automática de subestação e redes de distribuição de energia elétrica**. 2013. 108f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará, 2013. Disponível em: < http://www.repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/7877/1/2013_dis_jvcbarrros.pdf > Acesso em 10 out. 2014

BATISTA, Oureste E. et al. **Abordagem possibilística Fuzzy para localização de faltas em alimentadores com geração distribuída.** 2013. XII SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 13 a 17 de outubro de 2013, Fortaleza - CE – Brasil.

BERNARDON, Daniel Pinheiro. **Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais.** 2007. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: < <http://www.cpdee.ufmg.br/~joao/CE/Trabalho/Trabalho2012/2007BernardonTese.pdf> >. Acesso em: 10 out. 2014.

_____. et al. Uso dos conceitos de smart grid no processo de restabelecimento automático de energia. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 77, jun. 2012. Disponível em: < <http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-revista/edicoes/874-capitulo-xiii-uso-dos-conceitos-de-smart-grid-no-processo-de-restabelecimento-automatico-de-energia.html> >. Acesso em: 10 out. 2014

CYRILLO, Ivo O. **Estabelecimento de Metas de Qualidade na Distribuição de Energia Elétrica por Otimização da Rede e do Nível Tarifário.** 2011. 124f. Dissertação (Mestrado em sistemas de potência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/.../Dissertacao_Ivo_Cyrillo.pdf >. Acesso em 10 jun. 2014.

CIVANLAR, Seyhan et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217-1223, 1988. Disponível em : > <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=193906> . Acesso em 22 out. 2014.

Coletânea eletrotécnica. **Configuração Atual do Sistema Elétrico Brasileiro.** Disponível em: < <http://eletricaemsuavida.blogspot.com.br/2014/08/configuracao-atual-do-sistema-eletrico.html> > Acesso em: 21 fev. 2014.

COOPER POWER SYSTEM - **Manuais do Religador Form 6 S280 - 41 - 1P e S280- 70 - 3P.** São Paulo Cooper, 2002.

DECANINI, José Guilherme M. S. **Detecção, classificação e localização de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando sistemas inteligentes.** 2012. 124-f. Disponível em: < www.feis.unesp.br/.../engenhariaeletrica/pos.../089-tese_joseguilherme.p... > Acesso em: 20 out. 2014, 23:00

DUARTE, Daniel P. **Automação como recurso de planejamento de redes de distribuição de energia elétrica**. 2008. 127 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/.../3/.../tde.../Dissertacao_Rev_Daniel_Duarte.pdf >. Acesso em: 20 out. 2014.

FALCÃO, D. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Belém-PA, 18-21 de maio, 2010, p. 27. Disponível em: < www.ufsm.br/rei/files/rei2014-plenaria-djalma_falcao.pdf >. Acesso em: 10 jun. 2014.

_____. **Redes Elétricas Inteligentes**. In: Seminário Inserção de novas fontes renováveis e redes inteligentes no planejamento energético nacional. 2012, Rio de Janeiro. Disponível em: < www.ppe.ufjr.br/ppe/seminario_renovaveis/apresentacao/06.../djalma_pd... > Acesso em 10 jun. 2014.

_____. **Por que precisamos de Redes Elétricas Inteligentes?**. Seminário de Energia e Sistemas de potência. 2014, Santa Maria – Rio Grande do Sul. Disponível em: < http://w3.ufsm.br/rei/files/rei2014-plenaria-djalma_falcao.pdf > Acesso em 20 de nov. 2014.

FANUCCHI, Rodrigo Z.; OLESKOVICZ, Mario; BARBOSA, Daniel. **Análise da Detecção de Falhas de Alta Impedância Utilizando Redes Neurais Artificiais com Topologias Baseadas em Perceptron Multicamadas e Redes RBF**. 2013. XII SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 13 a 17 de outubro de 2013, Fortaleza - CE – Brasil.

FERREIRA, Flávio Arthur L. F. **Metodologia para reconfiguração de redes de distribuição trifásicas assimétricas e não balanceadas com geração distribuída**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: < <http://meriva.pucrs.br/dspace/handle/10923/3176> >. Acesso em: 20 out. 2014

GAUSHELL, Dennis J.; BLOCK, Wayne R. **SCADA Communication Techniques and Standards**. In: IEEE Computer Applications in Power. V. 6, Issue 3, p. 45-50, July, 1993. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=22274> > Acesso em: 15 jul 2014.

GANIM, Antônio. **Setor Elétrico Brasileiro: Aspectos regulamentares e tributários**. Rio de Janeiro: Canal Energia, 2009.

GELLINGS, Clark W. **The Smart Grid: enabling energy efficiency and demand response**. The Fairmont Press, Inc.2009

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas,2010.

GOES, Edson Aparecido et al. **Aplicação de redes neurais na identificação de setores em curto circuito nos sistemas de distribuição de energia elétrica**. In: Brazilian Conference on Dynamics. 9., 2010. São Paulo. Disponível em: < www.sbmac.org.br/dincon/trabalhos/PDF/energy/68004.pdf >. Acesso em 10 jun. 2014.

GOMIDE, Fernando; GUDWIN, Ricardo; TANSCHKEIT, Ricardo. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. In:Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials. 1995. p. 1-38.

GOSWAMI, Swapan K.; BASU, Sujay K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss mimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 3, p.1484-1490, 1992. Disponível em: > <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=141868> Acesso em 12 de novembro de 2014.

HASHIMOTO, Kleber. **Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição**. 2004. 114f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

HECK, Giancarlo et al. Integração da rede de automação da distribuição com a rede corporativa. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 81, out. 2012. Disponível em: < <http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-revista/961-integracao-da-rede-de-automacao-da-distribuicao-com-a-rede-corporativa.html> >. Acesso em: 10 out. 2014.

JARDINI, José Antônio. **Sistemas digitais para automação da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. São Paulo: FCA, 1996.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César B.. **Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Ferramenta para Solução de**

Problemas de Decisão com Múltiplos Objetivos e Incertezas. SBA Controle & Automação, Vol. 9 no. 1, 1998.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos Cesar de B.; ROBBA, Ernesto. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** São Paulo: Blucher, 2005, p. 5 – 27.

LIMA, Wagner Ubiratan L. de A.- **Sistema integrado de operação e diagnóstico de falhas para sistemasde energia elétrica.** Florianópolis, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia deProdução) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

MAMEDE Filho, João. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 2011. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MANTOVANI, José R S; CASARI, Fernando; ROMERO, Rubén A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Revista Controle e Automação, Sociedade Brasileira de Automática, SBA**, v. 11, n. 03, p. 150-159, 2000.

MCDERMOTT, Thomaz. E.; DREZGA, Irislav; BROADWATER, R. P. A Heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 14, n. 2, p. 478-483, May 1999. Disponível em : > <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=761869> . Acesso em 15 de nov. 2014.

MERLIN, A.; BACK, H. **Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system.** In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5. 1975, Cambridge. **Proceedings...** Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18. Disponível em http://www.researchgate.net/publication/259744286_Search_for_a_Minimal-Loss_Operating_Spanning_Tree_Configuration_in_an_Urban_Power_Distribution_System Acesso em 10 de out. 2014.

MIRZAEI, M. et al. Review of fault location methods for distribution power system. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 2670-2676, 2009. Disponível em: < <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2009/2670-2676.pdf> >. Acesso em 03 jul. 2014.

MOURA, Carlos Jeferson da S.; **Estudo para implantação de um sistema de recomposição automática para a rede de distribuição do campus PICI.** 2011. 77

f.Trabalho de Conclusão de curso (graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MOKHTAR, Ahmad Safawi; **Distribution Network Fault Section Estimation Using Analytical Database Approach**, 2004. 141p. Tese (Doutorado em Engenharia) School of Electrical & Electronic Engineering, The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Science.

NAGATA, Takeshi et al. A multiagent approach to distribution system restoration. In: Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE. IEEE, 2003. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1270384&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1270384> Acesso em 15 de nov. 2014.

NORTHCOTE-GREEN, James; WILSON, Robert, **Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems**, Boca Raton, FL (EUA): *CRC Taylor & Francis*, 2007. 464 p.

OHARA, Alexandre T. **Sistema de Reconposição Automática de Redes de Distribuição – A aplicação do conceito de Self-Healing**. IN: Anais do VI CIERTEC 2009 - Seminário Internacional sobre *Smart Grid* em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2009.

OLIVEIRA, Marlon Borges C. de. **Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em automação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista, 2011. Disponível em: <www.feis.unesp.br/Home/departamentos/.../2011_diss_marlon_borges.p...>. Acesso em: 06 out. 2014.

OLIVEIRA, Francisco F. V. de et all. **Sistema de Reconposição Automática Aplicado a Redes de Distribuição de Energia**. In: XXI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11, 2014, Brasil, S.P. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/236285910/Artigo-Sra-Xxi-Sendi>>. Acesso em: 01 nov. 2014.

PARIKH, Palak. **Distribution System Automation**. 2008. Disponível em <http://www.eng.uwo.ca/people/tsidhu/Documents/Distribution%20System%20Automation_Palak%20Parikh.pdf>. Acesso em: 16/08/2014.

PINTO, Raphael L. **Aplicação de um sistema especialista fuzzy para redução de manobras de dispositivos shunts chaveados automaticamente por um**

compensador estático. 2010. 116f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.2010. Disponível em: < http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/RaphaelLemosPinto.pdf > Acesso em: 02 out. 2014.

PONCE, Alexandre T. et al. Operação em Tempo Integral de Alimentadores de Distribuição em Anel Fechado. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUCION ELECTRICA CLADE, 2008, Mar Del Plata. **Anais...** Mar Del Plata: ADEERA, 2008, p. 1-10.

RUPOLO, Diogo. **Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca dispersa.** 2013. 108 f. Dissertação (mestrado) . Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013. Disponível em: < <http://base.repositorio.unesp.br/handle/11449/87161> > Acesso: 10 out. 2014.

SCHMIDT, Hernán P. **Reconfiguração de redes de distribuição através de programação não-linear inteira mista.** 2005. 120 f. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../TeseLD_HernanPrietoSchmidt.pdf >. Acesso em: 19 out. 2014.

SILVEIRA, Francisco T, et al. Coordenação entre religador e seccionalizador em redes de distribuição. **E-xacta**, Belo Horizonte, v. 4, n. 3, dex. 2011. Disponível em: < <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/viewFile/707/410> >. Acesso em: 15/09/2014.

SILVA JUNIOR, José Luiz da. **Determinação de Chaveamento para Recomposição do Serviço em Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão Através de Métodos Baseado em Parâmetros de Sensibilidade.** 2012. 111f. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Disponível em: < http://bdt.d.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/19/TDE-2013-04-05T092840Z-4980/Publico/JoseLSJ_TESE_inicio_cap3.pdf >. Acesso em 10 out. 2014.

SPATTI, Danilo H. **Automatização de Processos de Detecção de Falhas em Linhas de Distribuição Utilizando Sistemas Especialistas Híbridos.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde...101205/.../Danilo.pdf > Acesso em: 02 out. 2014.

TONELLI NETO, Mauro de S. *et al.* **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando uma rede**

neural ARTMAP fuzzy. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 10, 2011, São João Del Rei. **Anais...**São João Del Rei: [s.n.], 2011b. p. 1-6.

TONELLI NETO, Mauro de S. **Formulação do controle preventivo em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada na lógica fuzzy e redes neurais.** 2012. 137 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2012. Disponível em: < <http://base.repositorio.unesp.br/handle/11449/87143> > Acesso em: 10 out. 2014.

TOUNE, Sakae et al. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 1, p. 173-181, 2002. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=974205> >. Acesso em: 20 nov. 2014.

SARAIVA, Filipe de O. **Aplicação de sistemas multiagentes para gerenciamento de sistemas de distribuição tipo Smart Grids.** 2012. 113f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-25042012-155841/ > Acesso em 05 out. 2014.

SHIRMOHAMMADI, Dariush; HONG, H. Wayne Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1492-1498, 1989. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=25637> >. Acesso em 20 out. 2014.

STASZESKY, Douglas M.; CRAIG, Dean.; BEFUS, Craig. Advanced feeder automation is here. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 56- 63, Sept.-Oct. 2005. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1507027&isnumber=32291>> Acesso em: 21 fev. 2014.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Maryland Heights, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZIDAN, Aboelsood; EL-SAADANY, Ehab F. A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 3, p. 1525-1539, 2012. Disponível em : < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6205352> > Acesso em 15 nov. 2014.