

# MÉTODO DE RECOMPOSIÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTES BASEADO EM SISTEMAS DE SUPERVISÃO

Dangelo Alex Basso; Fernando Kloos; Orientador: Sidnei Pereira;

FADEP – Faculdade de Pato Branco  
Rua Benjamin Borges dos Santos, 1100  
Pato Branco - PR

dangelo1980@gmail.com; fkloos@copel.com; sidnei@fadep.br;

**Resumo** - Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método de recomposição da rede de distribuição através de sistema especialista, que terá a capacidade de detectar, isolar e recompor o sistema de distribuição após a ocorrência de uma falta na rede, executando ações pré-programadas para reconfiguração da rede, de forma automática, a partir dos sistemas de supervisão e controle, sem a intervenção da figura do operador humano. Melhorar os indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica, aumentar a confiabilidade do sistema, a redução no tempo de interrupção no fornecimento de energia aos consumidores, localização do ponto exato do problema mais rápido e eficiente, além do próprio sistema efetuar o isolamento do defeito e reconfigurar o sistema, de forma a deixar o menor número possível de consumidores sem energia são alguns dos resultados esperados.

**Palavras-Chave** – Redes Inteligentes, Recomposição Automática, Sistemas Especialistas.

## METHOD OF RECOMPOSITION OF INTELLIGENT DISTRIBUTION NETWORK BASED ON SUPERVISION SYSTEMS

**Abstract** – This work aims to develop a method of recomposing the distribution network through a specialized system, which will have the ability to detect, isolate and recompose the distribution system after the occurrence of a fault in the network, performing pre-programmed key switches, automatically, from the supervisory and control systems, without the intervention of the figure of the human operator. And so, improve the quality indicators of the electric power supply, increase the reliability of the system, reduce the interruption time in the power supply to consumers, the location of the exact point of the problem will be faster and more efficient, in addition to the system itself isolate the defect and reconfigure the system in order to leave as few consumers as possible without power.

**Keywords** - Smart-grid, Self-healing, Expert Systems.

### I. INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica no Brasil é composto pela geração, transmissão e distribuição. Constitui-se de uma rede complexa de elementos que juntos tem como objetivo a

condução de energia a partir do local de sua produção até o local onde será consumida. Desta forma interliga o parque de geração, linhas de transmissão e de distribuição, culminando com os consumidores finais desta energia. Cabe salientar que esta rede de energia nem sempre foi integrada, pois antes da industrialização mais intensa do Brasil, as linhas de transmissão e de distribuição eram isoladas, que apresentavam como objetivo tão somente atender as necessidades locais de determinada região. Entretanto, com o passar do tempo, o que se verificou foi um substancial aumento na demanda por energia elétrica em certas regiões, como exemplos o Sul e Sudeste do Brasil, regiões mais industrializadas e assim necessitando a interligação de todos estes sistemas elétricos de potência [1].

O parque gerador brasileiro se caracteriza prioritariamente no aproveitamento hidrelétrico para geração de energia elétrica. Tal fato faz com que se verifique uma distância significativa do ponto de produção até o ponto de consumo [1].

Em se tratando do transporte de energia gerada, observa-se que os sistemas de transmissão e de distribuição são bastante semelhantes se forem considerados os equipamentos necessários, diferindo tão somente na complexidade, uma vez que os sistemas de distribuição apresentam um maior tamanho e um plano que apresenta ramificações [1].

Em se tratando de potência distribuída e fornecida pode-se dividir as redes de distribuição em redes elétricas primárias e secundárias, onde as primárias buscam atender grandes e médios consumidores e as secundárias as residências, pequenos comércios e iluminação pública [1].

O fato de o setor elétrico brasileiro encontrar-se em expansão, sinaliza a necessidade de um controle operacional cada vez mais seguro e economicamente viável, como forma de garantir o fornecimento de energia elétrica ao consumidor final com a qualidade desejada. Vindo de encontro a este desafio os estudos e os consequentes avanços tecnológicos, buscam atender as exigências impostas pelo órgão fiscalizador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Para melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, destaca-se a utilização de religadores automáticos, seccionadoras, cabos de rede protegidos ou redes subterrâneas são equipamentos que já se encontram presentes no cotidiano das cidades. E, cada vez mais, a energia elétrica vai sendo disponibilizada em lugares mais remotos, ocasionando uma condição mais susceptível a perturbações, onde podemos citar como agentes causadores a presença de árvores, vento, animais, acidentes, descargas atmosféricas, etc.

Nos últimos anos, os sistemas de distribuição de rede aérea convencional, estão sendo substituídos por sistemas de distribuição em rede compacta, como forma de reduzir tais fatores. O sistema convencional está exposto a todas as influências do meio (tempestade, raio, ventania, acúmulo de poeira, excesso de umidade, depósito de salitre em ambiente litorâneo, arborização, etc.), onde tais motivos propiciam elevadas taxas de falhas na distribuição, em função das perturbações geradas por estes fatores [2].

Quando ocorre uma perturbação o sistema de proteção é sensibilizado como forma de proteger o sistema como um todo, bem como os equipamentos a ela ligados, isolando o trecho defeituoso.

Entretanto, devido à complexidade das redes elétricas de distribuição, as mesmas não podem ser operadas de forma segura e eficiente sem a presença de uma supervisão e controle contínuos adequados, o que impõe a necessidade de integração destes equipamentos. O desenvolvimento da tecnologia da informação vem de encontro a atender esta demanda.

Em uma condição normal de operação percebe-se que as tomadas de decisão por parte dos Centros de Operação da Distribuição (COD's) são eficientes. Todavia, em condições adversas, fruto de alguma perturbação no sistema, a decisão do que fazer para recompor o sistema de forma rápida e segura irá depender da experiência do operador. Uma ação errada pode gerar perdas econômicas e consequências sociais gravíssimas.

A consolidação de grandes redes elétricas, mediante a interligação de alimentadores oriundos de uma mesma subestação, de forma radial seletiva, promove uma condição mais ampla de se alimentar um sistema, porém faz com que as condições de operação deste sistema se tornem críticas.

A tecnologia da informação trata de aperfeiçoar e gerenciar os processos, permitindo às concessionárias de distribuição a coleta, análise e armazenamento de dados de pontos de medição em redes regionais, simulando a operação do sistema, apontando falhas e, com isto, antecipando possíveis distúrbios futuros.

Desta forma, a transformação destas redes em grandes e complexos sistemas de distribuição, com elevado nível de automação acabou por provocar a geração de grande número de combinações quanto ao número de configurações radiais factíveis, criando um quadro de dificuldades para os operadores desses sistemas e tornaram o estudo da reconfiguração de redes um problema desafiador, visto que o mesmo encontra métodos e técnicas que fazem uso das mais variadas ferramentas matemáticas, como forma de obter um resultado que se aproxime do ideal.

O processo de reenergização de uma rede de distribuição é complexo, visto que acaba por envolver equipamentos diversos, tais como chaves seccionadoras automatizadas e religadores automáticos.

Nesse contexto o presente trabalho se propõe a estudar um método de recomposição capaz de realizar a reconfiguração dinâmica das redes de distribuição, que poderá ser implementado através de sistemas de supervisão e controle.

O objetivo deste artigo é elaborar uma metodologia de recomposição automático que trabalhe na reconfiguração da rede de distribuição, a partir de um algoritmo que terá a

capacidade de detectar, isolar e se recompor automaticamente após a ocorrência de uma falta. Isto será possível devido aos agentes do sistema executarem ações pré-programadas de chaveamento como resposta imediata a falta ocorrida, atuando de forma que a falha seja isolada e o fluxo de potência seja mantido através de caminhos alternativos.

## II. REDES INTELIGENTES

Redes de Distribuição (RD) inteligentes ou *smart-grids*, consistem basicamente na otimização e gerenciamento do sistema elétrico, desde a geração até o consumo, utilizando para isso sensores de monitoramento, sistemas de automação, telecomando, acesso remoto e sistemas integrados visando melhorias dos sistemas elétricos, tanto em nível de eficiência bem como da segurança do sistema [3].

Como uma das funcionalidades das redes inteligentes, a recomposição automática ou *self-healing*, vem com o objetivo de melhorar a confiabilidade da rede e ter uma resposta rápida quando ocorre uma falha na RD, isolando a falta e reduzindo o período de falta na rede [4].

A *self-healing* do sistema de distribuição de energia é conduzida via Sistema Supervisório (SS), especificamente através da proteção inteligente e de dispositivos de chaveamento que minimizam o número de interrupções do consumidor durante uma condição de contingência pela ação da isolação automática do componente defeituoso (falha) e transferindo o consumidor (sua carga) para uma fonte alternativa quando seu fornecimento normal é perdido.

A fonte alternativa pode incluir alimentadores vizinhos de uma mesma subestação de energia, de uma subestação próxima e até mesmos de uma geração distribuída. Isto equivale a observar que a implementação da recomposição automática no sistema de distribuição necessita de projetos (lógicas) que sejam flexíveis o suficiente para ajustar mudanças no carregamento do sistema e condições de configuração (incluindo modificação automática no cenário de proteção) e operar os componentes do sistema de distribuição dentro de suas categorias (dentro dos limites de potência nominal, tensão nominal, etc.)

Buscando aprimorar tais conceitos, no sentido de diminuir a necessidade de intervenção de equipes de manutenção de campo quando da ocorrência de perturbações no sistema, a ideia da autocorreção dinâmica e segura tem encontrado aplicação como forma de reduzir ainda mais o tempo de interrupção, delimitando e isolando tão somente a área atingida, garantindo o fornecimento normal aos demais consumidores.

Os benefícios da aplicação do conceito de *self-healing* em sistemas elétricos incluem [5]:

- Rápida restauração do sistema ao modo operativo;
- Restauração de maior quantidade de cargas e;
- Menor necessidade de enviar equipes de campo para reconfigurar a rede.

Há vasta literatura relativa ao restabelecimento de redes de distribuição quando da existência de faltas. Alguns dos métodos utilizados na aplicação do *self-healing*:

- Método de enxame de partículas para a otimização, a fim de resolver o problema de reconfiguração do

sistema em conjunto com regras de busca heurística para aumentar a eficiência da metodologia [6];

- Método da heurística *fuzzy* para um processo de busca para o restabelecimento de energia em sistemas radiais de distribuição [7];
- Métodos da busca exaustiva, lógicas de automação, sistemas inteligentes (tais como lógica *fuzzy*, algoritmo genético, redes neurais artificiais), métodos matemáticos, etc. [8].

### III DISPOSITIVOS DE RECONFIGURAÇÃO

Dispositivo de chaveamento/seccionamento é um termo genérico que engloba dispositivos e acessórios associados com a conexão e desconexão de circuitos em sistemas de energia. De uma maneira geral, nas atividades de operação de uma rede de distribuição, estes dispositivos são utilizados para reconfigurações da topologia da rede. Estas reconfigurações da rede são necessárias em situações de falta, para a execução de manutenções preventivas e para execução de manutenções corretivas.

Os disjuntores são um dos componentes do sistema de proteção de uma rede. São instalados acompanhados dos relés respectivos, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes e tensões elétricas do circuito que, após analisadas de acordo com ajustes prévios, podem enviar ou não uma sinalização de comando para o disjuntor [9].

Um disjuntor instalado sem relés transforma-se apenas em uma chave seccionadora, contudo, os disjuntores possuem a capacidade de interromper valores de corrente de defeito elevados.

O religador é um disjuntor equipado com relés que permitem a configuração de um padrão de aberturas e fechamentos levando em consideração correntes de curto-circuito em um alimentador de uma rede de distribuição. Normalmente, a capacidade de interrupção de corrente do religador é inferior a do disjuntor [9].

Os religadores automáticos disponíveis comercialmente, conforme a Fig. 1, permitem a configuração de até quatro operações em um ciclo de religamento, possibilitando a definição da duração das operações como, por exemplo, uma operação rápida e três retardadas, ou, duas operações rápidas e duas retardadas, etc. Os religadores podem ser utilizados tanto na subestação quanto em diferentes pontos do alimentador, ao longo da extensão da rede de distribuição [10].

No início de todo alimentador, após a derivação do barramento da subestação, é necessária a utilização de uma solução de proteção, como um disjuntor comandado por relés de sobrecorrente. O religador substitui esta solução de proteção. Este, nada mais é do que um dispositivo onde as funções de disjuntor, relés de sobrecorrente e relé com a função de religação estão embutidas em uma única solução [9].

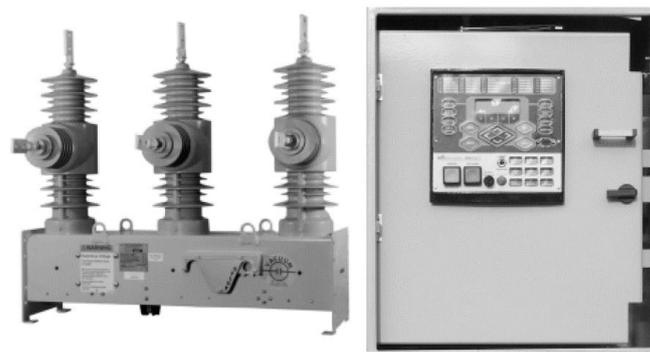


Fig. 1. Religador automático [10].

Existem situações nas quais podem ser adotados religadores instalados em postes ao longo da rede de distribuição. A principal situação é quando o alimentador é muito extenso e a corrente de curto-circuito, a partir de uma determinada distância, não têm valor expressivo para sensibilizar a proteção no início do alimentador. Também é utilizado religador ao longo da rede em situações de ramais do alimentador que atendem cargas relevantes.

Uma chave seccionadora é um dispositivo de seccionamento capaz de estabelecer conexão, desconectar, conduzir corrente, interromper corrente em situações normais assim como em situações especificadas de sobrecarga. Uma chave tem a finalidade de seccionar definitivamente um trecho do alimentador, quando ocorre um defeito a jusante de seu local de instalação e cuja interrupção é feita por equipamento de retaguarda. A chave não precisa ter uma capacidade de interrupção compatível com o nível de curto-circuito trifásico do ponto de sua instalação [9].

Existem também as chaves seccionadoras motorizadas, com recursos para operação remota ou via procedimentos de automatização pré-configurados, montadas em postes, desenvolvidas para melhorar o desempenho do chaveamento requerido por procedimentos de controle e automação em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. As infraestruturas de distribuição aéreas são as que apresentam maiores índices de eventos de falha [11].

Duas características funcionais encontradas nas chaves de manobra as tornam o equipamento fundamental em um processo de reconfiguração automatizado de redes de distribuição:

- Capacidade de manobra com carga;
- Capacidade de operação telecomandada.

Para operação com carga, de uma maneira geral, os dispositivos de chaveamento/seccionamento dependem de um método de interrupção de corrente. Quanto mais alta a corrente, maior a dependência de um método eficiente de extinção de arco elétrico. Métodos mais antigos que dependem de óleo ou ar para extinção de arco são usados em tensões baixas com câmaras especiais para estender o arco além da distância de condução. Isto necessita de um maior espaço e, com o espaço se tornando um recurso crítico, novos métodos de interrupção passaram a ser empregados, que é o caso da utilização do gás Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) para isolamento.

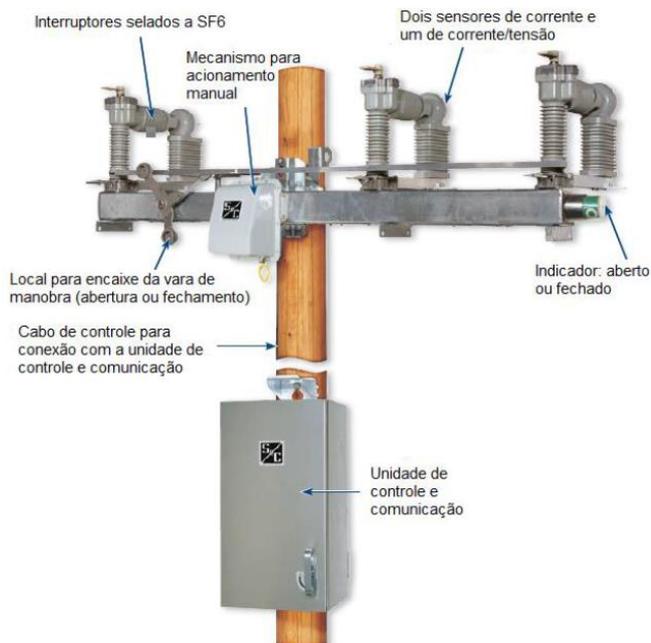


Fig. 2. Chave seccionadora Scada-Mate [12].

#### IV. SISTEMAS DE SUPERVISÃO E CONTROLE

A automação do sistema elétrico é formada pela integração entre os dispositivos de controle, medição e 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. A aplicação destes 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 a redução de custos operativos [13].

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).

As UTR's 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 [13]:

- Estação mestre – Refere aos equipamentos responsáveis pela aquisição e formação de um banco de dados com as informações coletadas pelos equipamentos de campo, como as UTR's;
- 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, distribui 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.

Para o desenvolvimento da automação do sistema de distribuição, a capacidade de comunicação entre as subestações, os equipamentos de proteção e controle instalados são fundamentais, visto que, a disponibilidade de transferência dos dados e a operação dos equipamentos em tempo real é fator determinante no nível de automação desejado [11].

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 e a tomada de decisão, pode-se criar ferramentas de operação automática do sistema de distribuição [11].

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 a 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, conforme mostra a Fig. 3 [14].

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 [11].

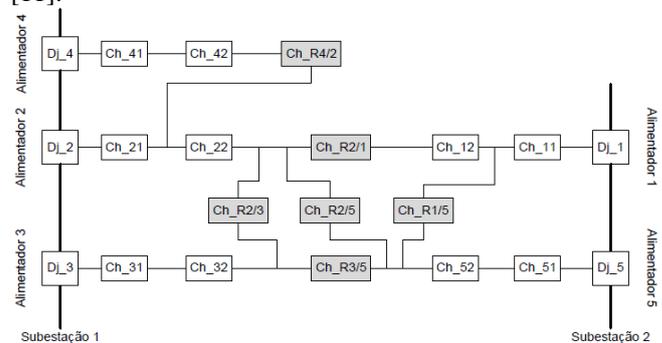


Fig. 3. Diagrama de uma rede de distribuição com interligação entre alimentadores.

## V. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

A falta no fornecimento de energia elétrica quando da ocorrência de perturbações na rede de distribuição tem sido cada vez mais frequente em todo o país. E considerando que a ANEEL tem definido os indicadores de qualidade quanto ao fornecimento e qualidade do produto entregue ao consumidor. Tais indicadores têm seus números limítrofes diminuídos anualmente, como forma de impor às concessionárias a busca contínua de qualidade no fornecimento desta energia entregue ao consumidor, razão única para assegurar o direito legal de concessão, bem como o não pagamento de pesadas multas [15].

Assim, cada vez mais, justifica-se o estudo e implantação de redes inteligentes de distribuição de energia elétrica que garantam por si só o reconhecimento automático do ponto da rede que apresenta falha, isolando o trecho defeituoso, assegurando o restabelecimento do fornecimento de energia no mais curto intervalo de tempo, garantindo desta forma a melhor qualidade do serviço prestado para o resto do sistema abrangido. A pesquisa e implantação de novas tecnologias de recomposição têm sido constantes como forma de atender tais indicadores frente a crescente complexidade das redes, como resultado de suas ampliações [3] [4].

### A. Metodologia

Devido à complexidade das diversas redes de distribuição de energia elétrica, a utilização de métodos matemáticos analíticos que contemplem de forma eficaz as inúmeras configurações possíveis para o restabelecimento do sistema a partir da ocorrência de uma falha na rede de distribuição não se apresenta como uma opção viável.

Quando se considera a análise de faltas, tais características sugerem que a solução passa por uma abordagem lógica que contemple as técnicas de inteligência artificial. Assim, a aplicação de Sistemas Especialistas (SE), na solução de problemas tem como princípio básico a utilização do conhecimento do especialista humano adquirido durante anos de experiência em dada área do conhecimento.

Por estarem apoiados em processos heurísticos, tais sistemas otimizam em muito o tempo de resposta aos problemas surgidos. Além disso, permitem que sejam alimentados com novos conhecimentos, garantindo uma melhor performance do sistema como um todo.

### B. Sistemas Especialistas

Tal qual o especialista humano, o SE é um método de inteligência artificial que emula o comportamento do raciocínio humano, apresentando uma resposta similar a este, porém com tempo de resposta menor e com alta capacidade de repetibilidade.

O especialista humano tem sua linha de raciocínio baseada em conhecimento adquirido durante os anos de experiência. Frente a um problema, formula hipóteses comparando informações e avalia o grau de importância dos fatos envolvidos que o sistema disponibiliza.

Entretanto, se tais fatos não forem suficientes, de nada adianta o seu conhecimento, pois uma conclusão errônea poderá ser mal formulada e aplicada. Desta forma se elimina a possibilidade de erro humano na avaliação da

reconfiguração mais adequada ao problema e ainda se reduz o tempo da análise. O especialista humano pode levar dezenas de minutos na análise de uma ocorrência em busca de uma reconfiguração possível, além de estar sobrecarregado com outras ocorrências simultâneas. Esta demora na tomada de decisão tem por consequência inviabilizar os testes de reenergização com a rede reconfigurada devido a ultrapassar o tempo seguro para religamento sem inspeção visual na rede.

Assim, a utilização de um SE tem, além de uma capacidade de apresentar uma resposta rápida e confiável, a capacidade de permitir a inclusão de novas regras, ampliando os conhecimentos e garantindo um ganho constante quanto a qualidade do processo de tomada de decisão perante aos problemas do sistema.

#### 1) Processo de análise e tomada de decisão do SE:

O objetivo da recomposição é a maximização do número de trechos energizados após alguma falha específica. Esta maximização tem por objetivo atender o maior número de consumidores possíveis, no menor tempo estimado.

A maximização dos trechos deve ser executada através de manobras automatizadas dos elementos da linha (chaves seccionadoras e religadores), para isto, o SE usará dados das remotas e dos RA's para determinar e identificar a ocorrência de falhas nos trechos. Após a identificação, manobrará as chaves seccionadoras e/ou religadores, para isolar a falha, reconfigurando a rede de forma automática, sem a intervenção de um operador humano e informando ao COD o trecho que está isolado para ações de manutenção e restabelecimento do trecho defeituoso.

A arquitetura proposta para o sistema de recomposição é apresentada através da rede protótipo da Fig. 4, onde em condições normais apresenta as seguintes condições iniciais:

- Barras A e B de 13,8 kV estão energizadas;
- Os religadores RA1, RA2, RA3, RA4 e RA5 estão fechados e alimentando todos os trechos envolvidos na malha (T1 a T19);
- As chaves seccionadoras 1/4, 2/1, 2/4, 2/5, 3/2, 3/5 e 5/4 estão abertas e as demais estão fechadas.

O método atual de reconfiguração da rede é manual e executado por um operador no Centro de Operação da Distribuição (COD). Para exemplificar segue a análise para um curto-circuito no trecho T3 no modelo de reconfiguração atual:

- A proteção do RA1 é sensibilizada e o religador executa o ciclo de religamento indo a bloqueio pela permanência do curto-circuito no trecho T3;
- Verifica-se a falta de energia nos trechos T1, T2, T3, T4 e T5;
- Operador do COD aciona o plantão para percorrer a rede que está sem energia;
- Plantão observa visualmente que a falta se encontra no trecho T3 e dá ciência para o operador;
- Operador abre a chave 12 e fecha o religador RA1; realimentação dos trechos T1 e T2;
- Operador abre a chave 13 e fecha a chave 1/4, realimentando os trechos T4 e T5, via RA4;
- Operador libera para o plantão o trecho T3 para executar a manutenção.

Neste cenário, dependendo do horário e local onde o plantão se encontra, o tempo necessário para percorrer a rede que está sem energia, encontrar e isolar o trecho com defeito e restabelecer a energia para os outros trechos, pode levar de 15 a 45 minutos em média, prejudicando os índices de qualidade da distribuidora de energia.

Exemplificando o mesmo curto-circuito no trecho T3 no modelo de reconfiguração proposto, através do SE:

- A proteção do RA1 é sensibilizada e o religador executa o ciclo de religamento indo a bloqueio pela permanência do curto-circuito no trecho T3;
- SE é ativado pelo bloqueio do RA1;
- SE se comunica com as chaves da rede deste RA e verificará quais chaves sensibilizaram pela passagem de corrente de curto-circuito;
- SE determina e identifica qual trecho que apresentou o curto-circuito (T3);
- SE comanda a abertura da chave 12 e 13;
- Após confirmação da abertura das mesmas, o SE comanda o fechamento do RA1 e da chave 1/4;
- SE alarma no SS que o trecho T3 está em curto;
- SE bloqueia a função recomposição no SS.

Com a utilização deste SE, estima-se que a o tempo da reconfiguração automática seja reduzido para menos de um minuto, melhorando os índices de qualidade e visando a segurança da rede e da população. Ainda, caso a recomposição através do SE falhe o método tradicional e manual será executado pelo operador do COD, sem prejuízo para os consumidores.

A base de conhecimento do SE terá um conjunto de regras pré-estabelecidas para a reconfiguração da rede. A inferência destas regras com as informações da falta da primeira etapa permite ao SE a reenergização da rede de distribuição a partir da chave que não teve a passagem da corrente de curto-circuito.

O SE verificará qual é o melhor caminho para energizar o trecho que ficou sem energia, mandando um comando de abertura para a chave que não passou a corrente de curto circuito. Após a confirmação da abertura o SE mandará um comando de fechamento para a chave Normalmente Aberta (NA) de outro circuito, que pode ser de uma mesma subestação, ou até mesmo de outra subestação. E assim energizando maior parte de consumidores sem energia.

Neste tempo, o operador do COD poderá acionar o eletricitista plantão a percorrer o trecho da possível ocorrência do curto-circuito, identificando-o, sinalizando e eliminando a causa da perturbação e liberando o operador do COD para atender outras ocorrências simultâneas em outras redes ou mesmo outras subestações.

### C. Base de Conhecimento

A base de conhecimento do SE consiste nas regras de reenergização da rede de distribuição formada por procedimentos executadas pelos operadores dos COD's quando da recomposição da rede.

Estas regras são modeladas a partir das experiências dos operadores e também estão definidas em sequências de manobras e das redes de distribuição.

1) *Definição das premissas da rede para a reconfiguração automática:*

Para que o SE seja implementado no SS, algumas condições são necessárias, como:

- As chaves seccionadoras instaladas na rede de distribuição, onde pretende-se implementar a reconfiguração automática, devem ter a capacidade de monitoramento de tensão e corrente de cada fase da rede;
- As chaves seccionadoras possuem canal de comunicação com o SS;
- As chaves seccionadoras podem operar com carga;
- A chave seccionadora sinalize a passagem de sobrecorrente;
- As chaves seccionadoras devem ter comando de fechamento e abertura automatizado;

A arquitetura proposta para o sistema de reconfiguração é apresentada na Fig. 4.

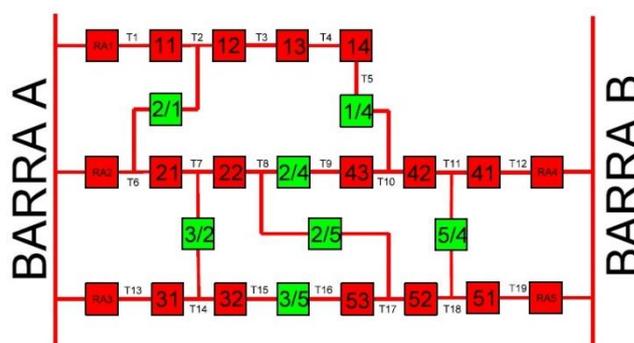


Fig. 4. Rede Protótipo.

O SE é disparado por 2 cenários distintos:

- Curtos-circuitos nos trechos de T1 a T19;
- Falta de tensão nos RA1, RA2 e RA3 da barra A, ou nos RA4 e RA5 da barra B.

A atuação de proteções em nível de sistema, como subfrequência ou subtensão sustentada bloqueiam a execução do SE. O operador do COD pode bloquear a recomposição a qualquer momento. Quando um circuito opera na condição de Linha Viva o SE também é bloqueado para este circuito.

Após ocorrer a condição para o disparo da recomposição, esta deve manter-se ativa por um tempo mínimo de 3 segundos para que o SE atualize e confirme esta condição de disparo, até que a recomposição comece as manobras de reconfiguração da rede.

Depois do início das manobras, caso o operador efetue o bloqueio do sistema, as manobras que já tiverem sido executadas não serão alteradas. O sistema então irá a bloqueio, e nenhuma manobra posterior irá ser realizada no sistema.

2) *Definição pré-condições para reconfiguração automática:*

Para o SE ser disparado por curto-circuito nos trechos T1 a T19, as seguintes pré-condições devem ser atendidas:

- As chaves seccionadoras têm que estar habilitada a função seccionadora;
- Nenhum dos equipamentos que participam da reconfiguração automática estarem em falha de comunicação com o SS;

- Nenhuma condição de bloqueio de recomposição estar ativa para o trecho que se pretende fazer a recomposição;
- Existir tensão nas entradas dos RA's;
- O RA deve ter executado o ciclo de religamento e estar na condição de bloqueio;
- A rede deve estar na configuração normal, ou seja, as chaves seccionadoras NA encontram-se inicialmente abertas e as demais chaves seccionadoras devem estar fechadas.

Para o SE ser disparado por falta de tensão em algum dos RA1, RA2 e RA3 na barra A, ou nos RA4 e RA5 na barra B, as seguintes pré-condições devem ser atendidas:

- O religador deve estar fechado, sem sinal de ciclo de religamento e sem sinal de curto-circuito em qualquer fase;
- Nenhum dos equipamentos que participam da reconfiguração automática estejam em falha de comunicação com o SS;
- A tensão medida no religador deve ser menor que um valor pré-determinado, por no mínimo, um tempo configurável;
- Nenhuma condição de bloqueio de recomposição estar ativa para o trecho que se pretende fazer a reconfiguração;
- Existir tensão na barra oposta;
- A rede deve estar na configuração normal, ou seja, as chaves seccionadoras NA encontram-se inicialmente abertas e as demais chaves seccionadoras fechadas devem estar.

### 3) Exemplos de atuação do SE na reconfiguração automática a partir de um curto-circuito nos trechos da rede:

Regra 1: Curto-circuito no trecho T1, Fig. 5:

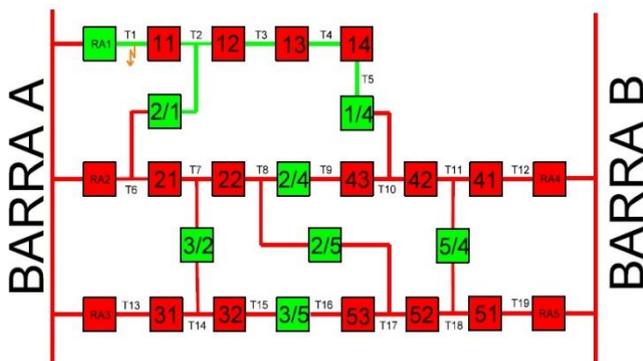


Fig. 5. RA1 aberto devido a curto em T1.

“SE” RA1 == bloqueio “E” chave 11 == normal “ENTÃO” ABRE chave 11 e BLOQUEIA fechamento RA1; isola o trecho defeituoso.

FECHA chave 2/1; realimentação dos trechos T2, T3, T4 e T5, via RA2.

SINALIZA para o operador o trecho afetado; plantão será acionado, Fig. 6.

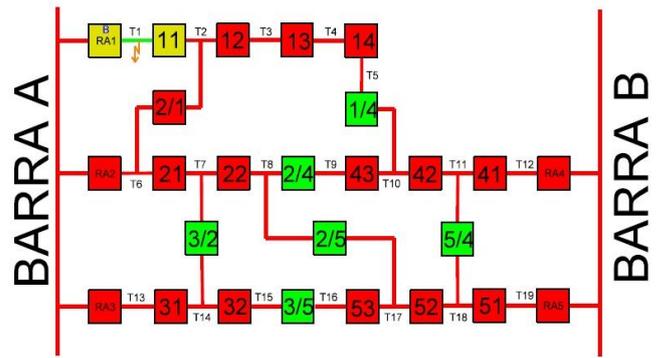


Fig. 6. Rede reconfigurada pelo SE após isolar curto em T1.

Regra 2: Curto-circuito no trecho T3, Fig. 7:

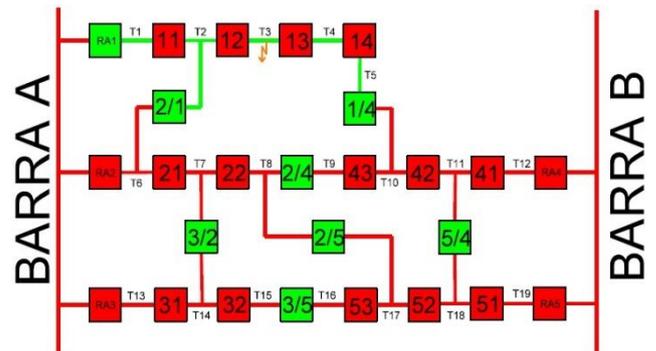


Fig. 7. RA1 aberto devido a curto em T3.

“SE” RA1 == bloqueio “E” chave 11 == sobrecorrente “E” chave 12 == sobrecorrente “E” chave 13 == normal “ENTÃO” ABRE chaves 12 e 13; isola o trecho defeituoso. FECHA RA1; realimentação dos trechos T1 e T2, via RA1.

SINALIZA para o operador o trecho afetado; plantão será acionado, Figura 8.

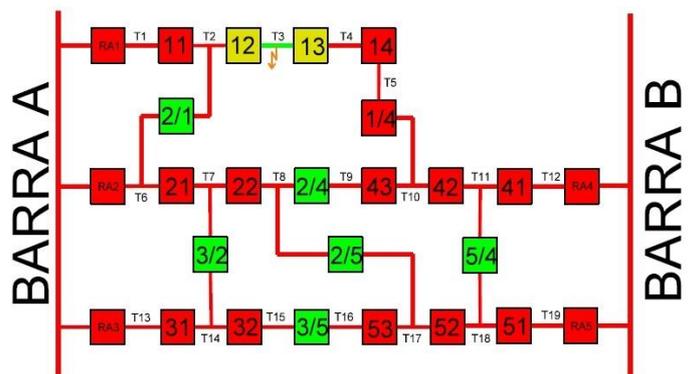


Fig. 8. Rede reconfigurada pelo SE após isolar curto em T3.

Regra 3: Curtos-circuitos simultâneos nos trechos T3 e T11  
Fig. 9:

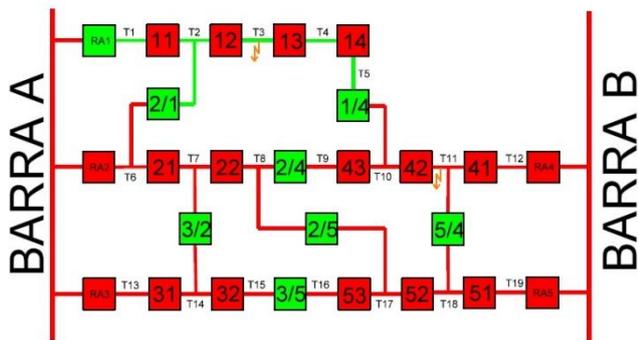


Fig. 9. RA1 e RA4 abertos devido a curto em T3 e T11 respectivamente.

“SE” RA1 == bloqueio “E” chave 11 == sobrecorrente “E” chave 12 == sobrecorrente “E” chave 13 == normal “E” “SE” RA4 == bloqueio “E” chave 41 == sobrecorrente “E” chave 42 == normal “ENTÃO” ABRE chaves 12,13, 41 e 42; isola os trechos defeituosos.

FECHA RA1; realimentação dos trechos T1 e T2, via RA1.

FECHA RA4; realimentação do trecho T12, via RA4.

FECHA as chaves na 1/4 e 2/4; realimentação dos trechos T4, T5, T9 e T10, via RA2.

SINALIZA para o operador os trechos afetados; plantão será acionado, Fig. 10.

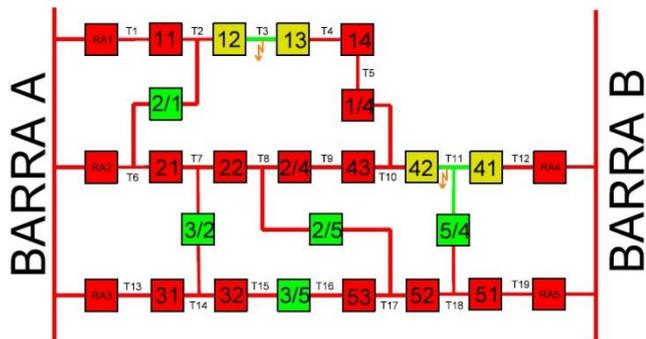


Fig. 10. Rede reconfigurada pelo SE após isolar curto em T3 e T11.

Regra 4: Curtos-circuitos simultâneos nos trechos T4, T7 e T11, Fig. 11:

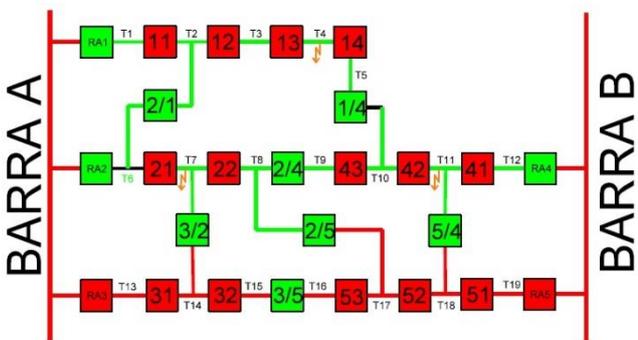


Fig. 11. RA1, RA2 e RA4 abertos devido a um curto em T4, T7 e T11 respectivamente.

“SE” RA1 == bloqueio “E” chave 11 == sobrecorrente “E” chave 12 == sobrecorrente “E” chave 13 == sobrecorrente “E” chave 14 == normal “E” “SE” RA2 == bloqueio “E” chave 21 == sobrecorrente “E” chave 22 == normal “E” “SE” RA4 == bloqueio “E” chave 41 == sobrecorrente “E” chave 42 == normal “ENTÃO” ABRE chaves 13, 14, 21, 22, 41 e 42; isola os trechos defeituosos.

FECHA RA1; realimentação dos trechos T1, T2 e T3.

FECHA RA2; realimentação do trecho T6.

FECHA RA4; realimentação do trecho T12.

FECHA as chaves NA 1/4, 2/4 e 2/5; realimentação dos trechos T5, T8, T9 e T10, via RA5.

SINALIZA para o operador os trechos afetados; plantão será acionado, Fig. 12.

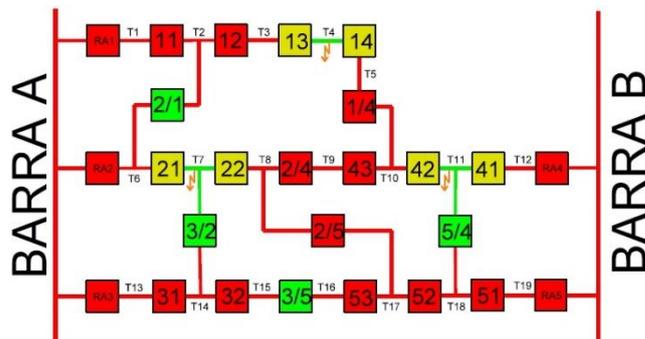


Fig. 12. Rede reconfigurada pelo SE após isolar curto em T4, T7 e T11.

Regra 5: Falta de tensão CA na Barra A 13,8 kV, devido a abertura do geral 13,8 kV por atuação de proteção de retaguarda 138 kV (RA1, RA2 e RA3 fechados), Fig. 13:

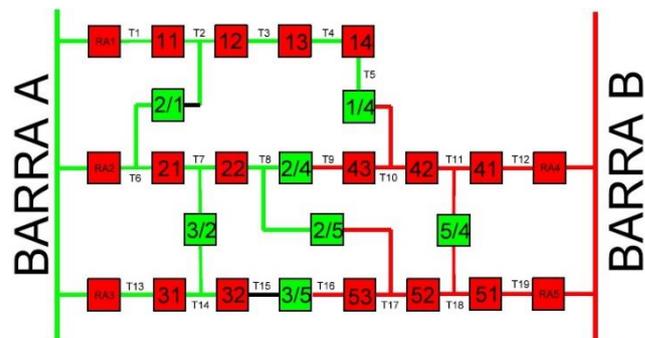


Fig. 13. Disjuntor da BARRA A aberto devido atuação proteção de retaguarda 138 kV.

“SE” VA barra A == 0 “E” VB barra A == 0 “E” VV barra A == 0 “E” RA1 == fechado “E” RA2 == fechado “E” RA3 == fechado “ENTÃO” ABRE e BLOQUEIA fechamento RA1; ABRE e BLOQUEIA fechamento RA2; ABRE e BLOQUEIA fechamento RA3; isola barra a 13,8 kV da malha.

FECHA chave na 1/4; realimentação dos trechos T1, T2, T3, T4 e T5, via RA4.

FECHA chaves NA 2/5 e 3/5; realimentação dos trechos T6, T7, T8, T13, T14 e T15, via RA5.

SINALIZA para o operador a falta de tensão na barra A 13,8 kV; plantão será acionado, Fig. 14.

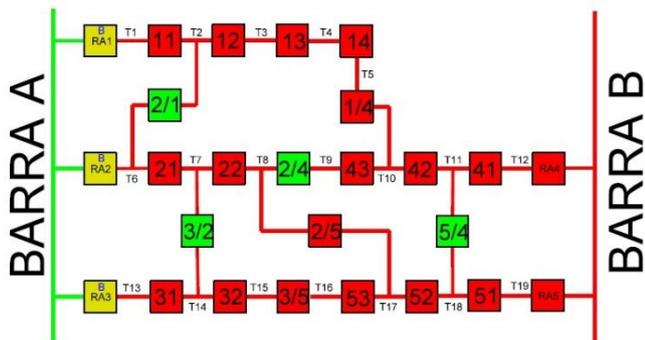


Fig. 14. Rede reconfigurada pelo SE após isolar BARRA A.

Regra 6: Curto-circuito no trecho T19 com a não abertura do RA5 e consequente atuação de retaguarda (abertura do geral 13,8 kV da Barra B), Fig. 15:

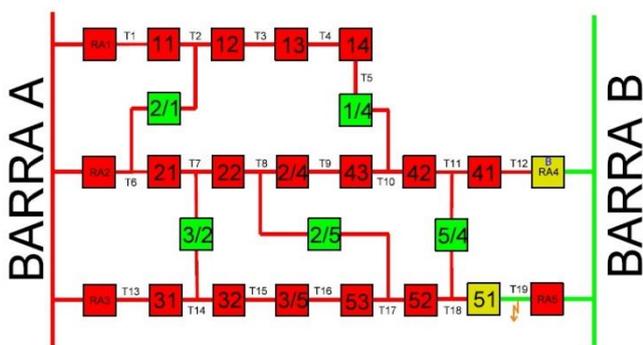


Fig. 15. Disjuntor da BARRA B aberto devido atuação proteção de retaguarda 138 kV.

“SE” VA barra B == 0 “E” VB barra B == 0 “E” VV barra B == 0 “E” RA5 == sobrecorrente “E” RA5 == fechado “E” chave 51 == normal “E” “SE” VA barra A == 0 “E” VB barra B == 0 “E” VV barra B == 0 “E” RA4 == normal “E” RA4 == fechado “ENTÃO” ABRE chave 51; ABRE e BLOQUEIA fechamento RA4; isola barra B 13,8 kV da malha.

FECHA chave NA 3/5; realimentação dos trechos T16, T17 e T18, via RA3.

FECHA chave NA 2/4; realimentação dos trechos T9, T10, T11 e T12, via RA2.

SINALIZA para o operador a falta de tensão na barra B 13,8 kV, falha abertura do RA5 e trecho T19 afetado; plantão será acionado, Fig. 16.

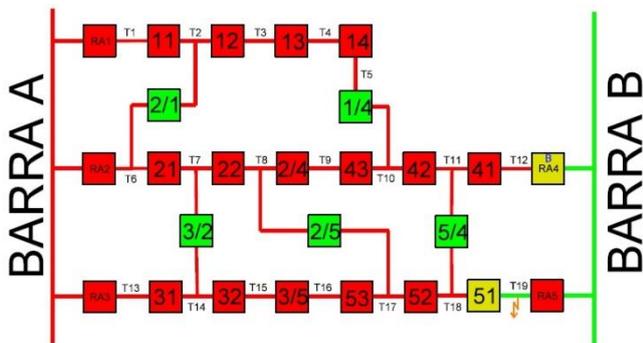


Fig. 16. Rede reconfigurada pelo SE após isolar BARRA B.

#### 4) Fluxograma de execução do SE:

A partir da definição das seqüências de manobras, das premissas e regras para reconfiguração automática da rede de distribuição, desenvolveu-se um fluxograma, Fig. 17, que resume a execução deste SE. Sendo que este método pode ser implementado em qualquer ambiente/linguagem de programação.

Os blocos do fluxograma mostrado na Fig. 17 mostram um resumo de cada etapa ou ação do SE. Em uma implementação prática cada um destes blocos serão compostas por várias verificações e tomadas de decisões necessárias para execução das ações.

Este SE visa auxiliar os operadores e equipes de campo na localização e isolamento dos trechos da rede de distribuição onde ocorreram as faltas, além de reconfigurar a rede para deixar o maior número possível de consumidores com energia elétrica.

Sendo que, se em até 60 segundos, o processo de reconfiguração automática não for concluído, o SE aborta o processo, e as manobras já executadas não são alteradas, fazendo necessária a intervenção do operador no SS para concluir as manobras de reconfiguração.



Fig. 17. Fluxograma de execução do SE.

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema especialista torna-se uma importante ferramenta para o auxílio aos operadores dos centros de operação da distribuição na localização, isolamento e recomposição do sistema elétrico de distribuição após a ocorrência de faltas de energia. Executa ações pré-definidas de comandos de chaves seccionadoras e religadores de forma automática e assim diminuindo a quantidade de consumidores sem energia elétrica e consequentemente melhorando os índices de qualidade da energia distribuída pelas concessionárias.

A vantagem em usar um sistema especialista no processo de tomada de decisão é a facilidade de implantação e atualização, uma vez que o objetivo é reduzir o tempo e aumentar os acertos nas manobras para recomposição do sistema de distribuição. O sistema especialista utiliza como ferramenta de decisão o processamento computacional que possui alto grau de repetibilidade, frente ao baixo grau do método convencional que se baseia no processamento humano do operador.

No desenvolvimento deste sistema especialista, foram consideradas chaves seccionadoras e religadores instalados na rede. Para estudos futuros, propõem-se considerar também outros equipamentos instalados, como banco de capacitores, reguladores de tensão, além de prever equipamentos que operam com restrição de carga.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] CREDER, H. Instalações Elétricas., Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [2] SEGATTO, A. G. Estudo e Projeto de Rede Elétrica Compacta Protegida., Monografia de Final de Curso. Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- [3] GELLINGS, C. W. The Smart Grid: enabling energy efficiency and demand response, The Fairmont Press, 2009.
- [4] IEA. Technology Roadmap - Smart Grid, International Energy Agency - Disponível em: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf); Acesso em: 10/05/2017, 2011.
- [5] OUALMAKRAN, Y.; MELENDEZ J. e HERRAIZ, S. "Self-healing for smart grids: Problem formulation," *3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1,6,14-17, 2012.
- [6] KENNEDY, J. e EBERHART, R. C. "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.
- [7] DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G. e CARVALHO, A. Algoritmo de Busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de energia em Sistemas Radiais de Distribuição, *Revista Controle e Automação SBA*: Disponível em: <http://www.sba.org.br/revista/vol11/v11a249.pdf>. Acesso em: 30/05/2017, 2000.

- [8] BORGES, T. T. Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- [9] MAMEDE, J. Manual de Equipamentos Elétricos, Rio de Janeiro: Érica, 2011.
- [10] COOPER POWER SYSTEM, Manuais do Religador Form 6 S280 - 41 - 1P e S280 - 70 - 3P, São Paulo: Cooper, 2002.
- [11] NORTHCOTE-GREEN, J. e WILSON, R. Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems, Boca Raton, Flórida(EUA): CRC Taylor & Francis, 2007.
- [12] S&C, [Online]. Available:<http://www.sandc.com/pt/produtos-e-servicos/produtos/sistema-de-seccionamento-scada-mate/>. [Acesso em 20 05 2017].
- [13] MORAES, C. C. e CASTRUCCI, P. L. Engenharia de Automação Industrial, Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [14] ROSÁRIO, J. M. Princípios da Mecatrônica, São Paulo: Prentice-Hall, 2005.
- [15] PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8: Qualidade da energia elétrica, ANEEL, 2009.

## DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Dangelo Alex Basso, nascido em 19/04/1980, em Francisco Beltrão PR, possui graduação em Tecnologia em Eletrônica – Automação Industrial pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR), Pato Branco, Paraná, Brasil, em 2002. Curso Técnico em Eletrônica, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR), Pato Branco, Paraná, Brasil, em 2000. Atua como Técnico da Companhia Paranaense de Energia (Copel) na qual atua como Técnico de Manutenção de Subestações da Distribuição.

Fernando Kloos, nascido em 07/09/1962 em Porto Alegre RS. Possui curso Técnico em Eletrotécnica pela Escola Técnica Federal de Pelotas (ETFPEL), Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil, em 1980. Curso Técnico em Eletrônica pela Escola Técnica Federal de Pelotas (ETFPEL), Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil, em 1992. Atua como Técnico da Companhia Paranaense de Energia (Copel) na qual atua como Técnico de Manutenção de Subestações da Distribuição.



