

# Utilização de Redes Neurais Artificiais para Recuperação de Falhas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Fábio da Silva Avelar, [fabio.avelar@sistemafiep.org.br](mailto:fabio.avelar@sistemafiep.org.br), Faculdade de Tecnologia SENAI CIC, Curitiba-PR.  
Alisson Stadler de Paula, [alisson.paula@sistemafiep.org.br](mailto:alisson.paula@sistemafiep.org.br), Faculdade de Tecnologia SENAI CIC, Curitiba-PR.  
Fausto Félix Batista Silva, [fausto.silva@sistemafiep.org.br](mailto:fausto.silva@sistemafiep.org.br), Faculdade de Tecnologia SENAI CIC, Curitiba-PR.  
Marco Túlio Corrêa de Siqueira [marco.siqueira@sistemafiep.org.br](mailto:marco.siqueira@sistemafiep.org.br), Faculdade de Tecnologia SENAI CIC, Curitiba-PR.  
Danilo Fernandes Gomes. [daniilo.gomes@sistemafiep.org.br](mailto:daniilo.gomes@sistemafiep.org.br), Faculdade de Tecnologia SENAI CIC, Curitiba-PR.

## Resumo

Um modelo computacional para autorrecuperação de redes de distribuição de energia elétrica foi desenvolvido para ser emulado através do modelo IEEE 123. O sistema elétrico considerado possui chaves automáticas capazes de identificar uma falha momentânea na linha e encontrar a melhor reconfiguração para seu religamento. Para isso, uma Rede Neural Artificial (RNA) *Backpropagation*, foi utilizada para fazer a classificação do tipo de falha e a determinação da melhor reconfiguração da rede de distribuição. Inicialmente, foram simuladas cinco situações de falta de energia em determinados trechos distintos da rede elétrica, em seguida, foram realizadas as análises dos fluxos de potência via *software* OpenDSS. Na sequência, foi observado o chaveamento mais adequado dentro do menor intervalo de tempo para restabelecer o fornecimento de energia. Desta forma, tornou-se possível identificar e isolar o trecho com falha tal que, o menor número de consumidores, no menor tempo possível, fique sem o suprimento de energia elétrica. A visualização da solução, que compreende a sequência de chaveamento adequada, foi implementada através do sistema supervisorio Eclipse E3. Com os resultados das simulações, foram realizados testes e análises para verificar sua robustez e velocidade, na expectativa de que o modelo desenvolvido apresente um melhor desempenho em comparação a uma operação realizada por um operador experiente de um Centro de Operação de Distribuição.

**Palavras chave:** Autorrecuperação; Redes Neurais, Otimização; Redes de distribuição; *Smart Grid*.

## Use of Artificial Neural Networks for Fault Recovery in Electric Power Distribution Networks

### Abstract

A computational model for self-recovery of electricity distribution network was developed

to simulate it, emulated by the IEEE 123 nodes model. The electrical system considered has automatic switches capable of identifying a momentary fault in the line and finding the best reconfiguration for its reclosing. An artificial neural network (ANN), backpropagation, was used to classify the type of failure and determine the best reconfiguration of the distribution network. Initially, five power failure scenarios were simulated in certain different parts of the power grid, and power flow analysis via OpenDSS was performed. Following, the most suitable switching was observed within the shortest time interval to restore the power supply. With the purpose of better visualization to identify the reclosing, an implementation was carried out via Eclipse E3. In this way it is possible to identify the faulted segment in order to isolate it, leaving the smallest number of consumers in the shortest possible time without power supply. With the results of the simulations, tests and analyzes were performed to verify their robustness and speed, in the expectation that the model developed, be faster than an experienced Operator of a Distribution Center.

**Key-words:** Self-healing, Neural Networks, Optimization, Distribution Networks, Smart Grid.

## 1 INTRODUÇÃO

O provimento de energia elétrica representa uma sensível transformação na qualidade de vida de uma população. A partir do momento em que um sistema de distribuição de energia elétrica é implementado, a população local passa imediatamente a contar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico, como de melhores possibilidades de emprego e produtividade, podendo contar com mais equipamentos e máquinas em funcionamento, associando-se assim a um maior rendimento da comunidade como um todo (MEHL, 2013). De acordo com Bernardo (2013), a busca constante pela melhoria na qualidade da energia elétrica distribuída aos consumidores, vem sendo elemento motivador para uma série de modificações, tanto dos instrumentos legais e regulatórios, como para a própria organização das empresas no direcionamento das suas estratégias. Desta forma a disponibilidade constante de energia elétrica é imprescindível para o desenvolvimento da sociedade moderna.

*Self-healing* (do inglês autorrecuperável) é um sistema capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de Energia Elétrica (EE) de forma automática e em alguns casos de forma instantânea (VIEIRA, 2011). Tal sistema utiliza informação em tempo real, gerada por sensores dispostos na rede de distribuição para responder de modo reativo, quando já ocorreu degradação do serviço, ou ainda proativo quando se encontra sem restrição ao serviço contratado aos problemas da rede. Evitando ou mitigando automaticamente quedas ou problemas com a qualidade de energia e a descontinuidade de serviços.

Sendo uma das funcionalidades do *smart grid*, o *self-healing* tem como objetivo melhorar a confiabilidade da rede, apresentando uma resposta rápida em decorrência de uma falha na rede de distribuição (RD), isolando-a e reduzindo o período de falta de energia (IEA, 2011). Portanto, o *self-healing* representa um sistema altamente interligado, monitorado e interativo.

Encontram-se dentre os principais benefícios da aplicação do conceito de *self-healing* em sistemas elétricos: (i) rápida restauração do sistema ao modo operativo; (ii) restauração de

maior quantidade de cargas e (iii) menor necessidade de enviar equipes de campo para reconfigurar e reestabelecer a rede de EE (OUALMAKRAN et. al, 2012). Diante desse cenário e conhecendo-se o potencial do *smart grid*, em especial, de uma de suas funcionalidades, o *self-healing*, torna-se viável propor uma solução para resolver o problema de desligamento, redistribuição e restauração de redes de EE através da implantação sistemas de redes neurais artificiais (RNAs) utilizando o método ou algoritmo, *backpropagation*.

O objetivo deste artigo consiste em demonstrar através de simulações em um sistema supervisor a restauração de uma rede de distribuição de EE representada pelo modelo IEEE 123 Node Test Feeder (IEEE, 2014), que em português significa Alimentadores para Teste de Nós, conforme as premissas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) utilizando para isso as redes neurais artificiais.

## 2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

O presente artigo tem caráter de pesquisa bibliográfica e exploratória experimental. Utilizou como base os dados alguns elementos do IEEE Xplore, pesquisas realizadas sobre *self-healing* (autorrecuperação), dissertações e teses nas áreas de rede de distribuição energia elétrica, além de informações da COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) e da ANEEL.

### 2.1 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)

Uma RNA define-se como um sistema distribuído e paralelo, que pode ser dividido em diversas unidades de processamento simples, sendo essas dotadas de capacidade de processar a informação obtida do banco de dados. Com esta definição, observa-se que existem semelhanças entre um sistema RNA e o sistema nervoso humano. Dentre as quais se destacam a capacidade de processar a informação em diversas unidades simples denominadas neurônios artificiais, a capacidade de interligação entre essas unidades, o estabelecimento de informações na RNA e a transmissão de dados e sinais através de conexões entre os elementos envolvidos. Com relação ao armazenamento das informações, pode-se destacar que cada interação entre as unidades simples é representada por um peso associado, variando de acordo com a eficiência da conexão. A avaliação do ambiente fornece informações para construção de uma base de conhecimento e faz parte do processo de aprendizagem, sendo que este processo é basicamente responsável por adaptar pesos às conexões realizadas em reação aos estímulos do ambiente (DECANINI, 2012).

Neste artigo foi utilizada uma Rede Neural Artificial (RNA) no algoritmo *backpropagation*, que considerou cinco tipos de falhas distintas para solução do problema da restauração do religamento da rede elétrica.

### 2.2 A IEEE 123 NODE TEST FEEDER E AS FERRAMENTAS UTILIZADAS

A proposta deste trabalho consiste em demonstrar uma técnica de autorrecuperação ou restauração de um trecho de rede elétrica baseado em um modelo da IEEE 123 *Node Test Feeder*, utilizando-se para isso uma RNA *backpropagation*, método esse, largamente difundido nos meios acadêmicos.

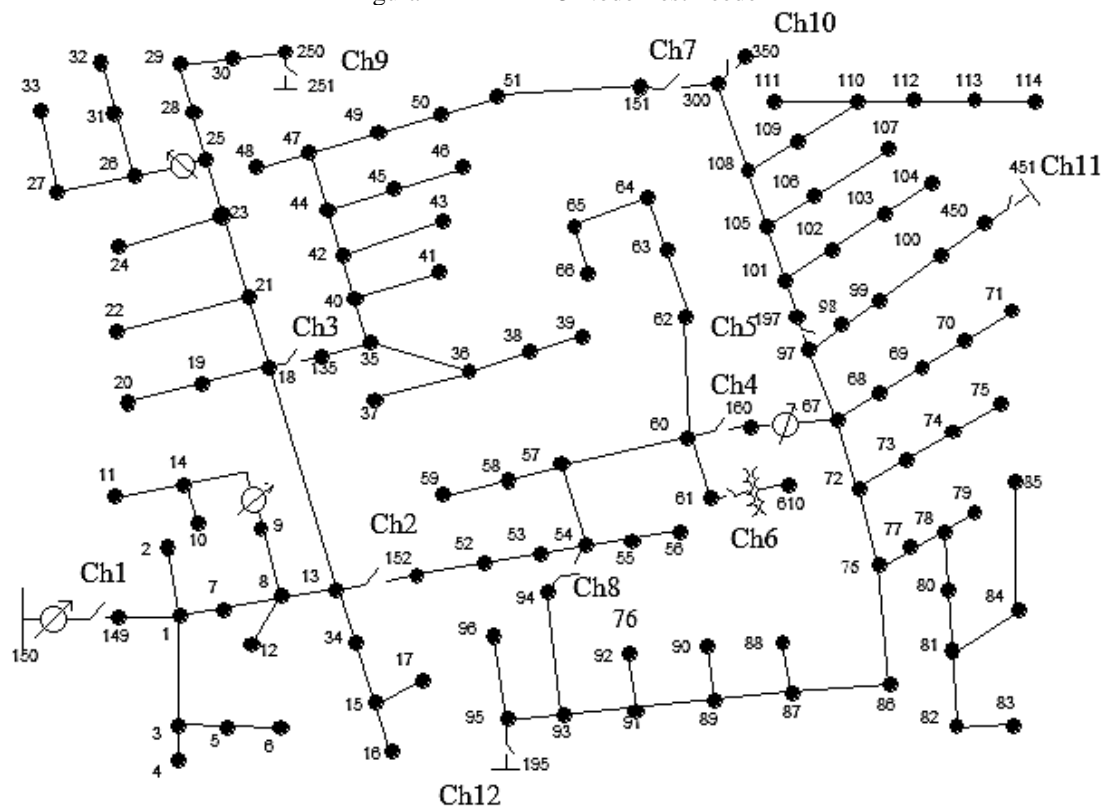
Primeiramente, foi realizado um estudo no fluxo de potência no modelo através do *software* OpenDSS. Utilizando-se as informações do *software* fornecidas pelas simulações, foi construída uma base de dados, composta por mais de duas mil informações por falha, e com os valores das correntes redes elétricas são atribuídas as cinco falhas simuladas pelo OpenDSS em cada trecho do sistema. Essa base de dados foi então utilizada no treinamento da RNA que, uma vez treinada, serviu de base para a realização de diversos testes e para a obtenção da informação desejada, avaliando-se assim, a classificação do tipo de falha resultante.

Como o chaveamento já era previamente conhecido, foi construída uma interface gráfica utilizando-se o *software* de sistema supervisorio Elipse E3, de modo a simular um Centro de Operação da Distribuição (COD).

### 2.3 MODELO IEEE123 NODE TEST FEEDER

Foi escolhido o modelo do alimentador de teste IEEE 123 nós, por ser um modelo de simulação oficial e portanto já consolidado; operando a uma tensão nominal de 4,16 kV. Embora este não seja um nível de tensão popular, fornece problemas de queda de tensão que devem ser resolvidos com a aplicação de reguladores de tensão e capacitores *shunt*. Esse circuito é caracterizado por linhas aéreas e subterrâneas, carga desequilibrada com corrente constante, impedância e potência, quatro reguladores de tensão, bancos de capacitores *shunt* e chaves múltiplas. O circuito está com problemas de convergência mínimos (IEEE, 2014), conforme a figura 1.

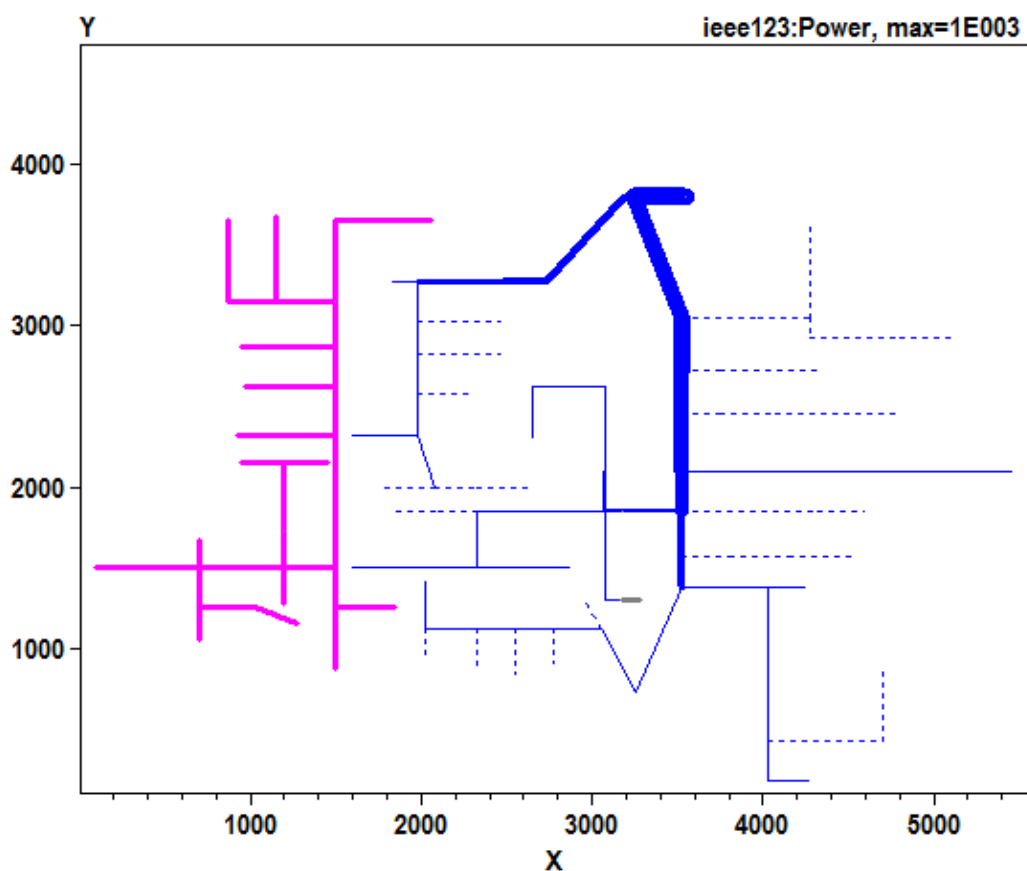
Figura 1 – IEEE 123 Node Test Feeder



## 2.4 OPENDSS

O Open Distribution System Simulator (OpenDSS, ou simplesmente, DSS) é uma ferramenta de simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica. OpenDSS refere-se ao código aberto implementação do DSS implementado como um programa executável autônomo de servidor DLL (*Dynamic Link Library*) em processo projetado para ser movido a partir de uma variedade de plataformas *software* existente. A versão executável tem uma interface de usuário básica.

Figura 2 – Simulação feita no OpenDSS



A figura 2 representa o modelo IEEE 123 node test feeder no OpenDSS, em que existe uma alimentação principal impedida de suprir as cargas do circuito elétrico, devido a uma falha na região onde está situada a subestação, para isso foram disponibilizados alimentadores alternativos que serão capazes de religar o máximo de consumidores possíveis, deixando apenas o setor defeituoso isolado, para que a manutenção solucione o problema e depois religue-os também.

O quadro 1 demonstra as falhas ocorridas no modelo do IEEE e as soluções do OpenDSS. A linha normal representa a configuração default do software. Dentro de uma falha existem alternativas de restabelecimento da energia elétrica, dependendo onde está localizada. Sendo as letras “a,b,c,d e” as alternativas possíveis sem que haja uma falha simultânea, e os números 0 e 1 representam a chave aberta e fechada respectivamente.

Quadro 1 – Chaveamento de acordo com a falha

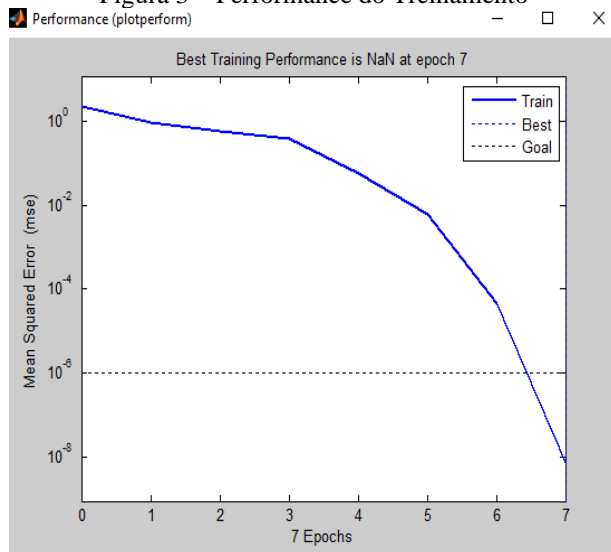
Falha	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch10	ch11	ch12
Normal	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Falha1	a	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
	b	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
	c	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
Falha2	a	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	b	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0
	c	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0
	d	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
	e	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Falha3	a	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
	b	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
	c	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
	d	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
	e	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
Falha4	a	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	b	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
	c	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
Falha5	a	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	b	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0
	c	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
	d	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0

## 2.5 TRATAMENTO DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Com os resultados das simulações do OpenDSS, elaborou-se uma planilha com as correntes em cada trecho, ou seja, cada pedaço entre dois postes consecutivos. Para aplicar a rede neural, a planilha foi separada em três partes, sendo uma para o treinamento da RNA, outra para escolha do tipo de falha (cinco opções) e a terceira e última, o teste efetivamente delas.

Na figura 3 é apresentado o gráfico de desempenho no treinamento. Verifica-se que antes de chegar na sétima época atingiu o erro médio quadrático dentro dos limites estabelecidos.

Figura 3 – Performance do Treinamento



No quadro 2 são mostrados os resultados do treinamento realizado na rede neural para cada tipo de falha, o número de épocas que cada treinamento levou para chegar a solução, tempo em segundos e o erro médio quadrático para cada situação.

Quadro 2 – Resumo de Falhas

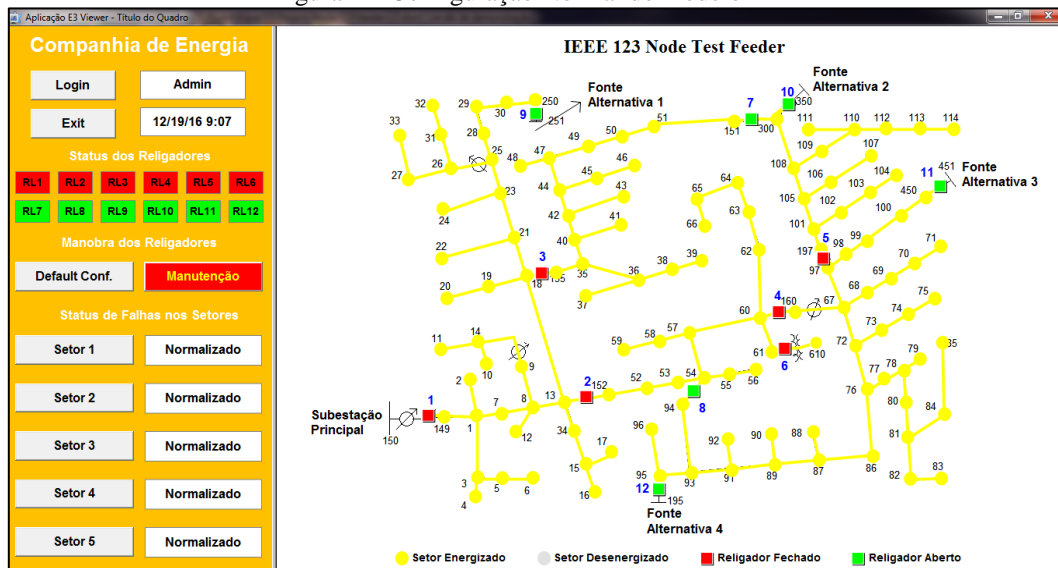
Tabela Resumo de Falhas			
Classificação	Épocas	Tempo (s)	Erro
Falha 1	3	17	0,025
Falha 2	6	42	0,066
Falha 3	7	4	0,088
Falha 4	17	38	0,023
Falha 5	4	8	0,045

## 2.6 SIMULAÇÕES NO ELIPSE E3

Uma maneira de ilustrar o chaveamento necessário em uma situação pós-falta na rede de distribuição IEEE 123 nós foi através do software Elipse.

O Elipse E3 é ideal para sistemas de missão crítica e centros de controle, é uma consagrada ferramenta SCADA para monitoramento e controle de processos, oferecendo escalabilidade e constante evolução para diversos tipos de aplicações, desde simples interfaces HMI, até complexos centros de operação em tempo real.

Figura 4 – Configuração Normal do modelo IEEE

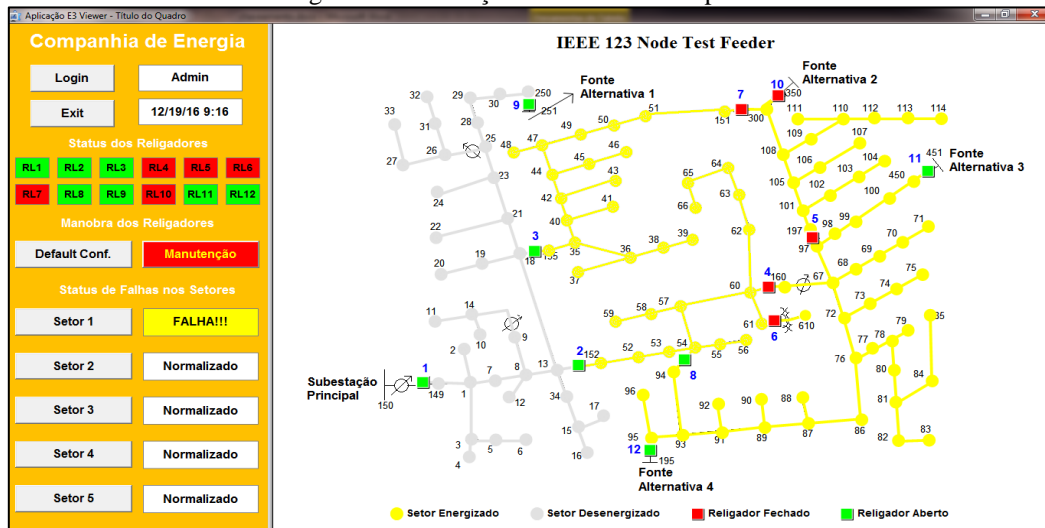


Na figura 4 é apresentado um exemplo supervisorio em um Centro de Operação da Distribuição (COD) através do Elipse E3. A interface é amigável e de fácil visualização. Comparando a parte gráfica no DSS com do Elipse, é notável a diferença neste aspecto, por

que a visualização é mais compreensível na interface do sistema supervisor se comparado ao OpenDSS.

Na figura 4 é apresentada a configuração normal do modelo IEEE 123 node test feeder, sendo a cor amarela representada pela linha em funcionamento, chaves na cor verde são as normalmente abertas, na cor vermelha, as normalmente fechadas.

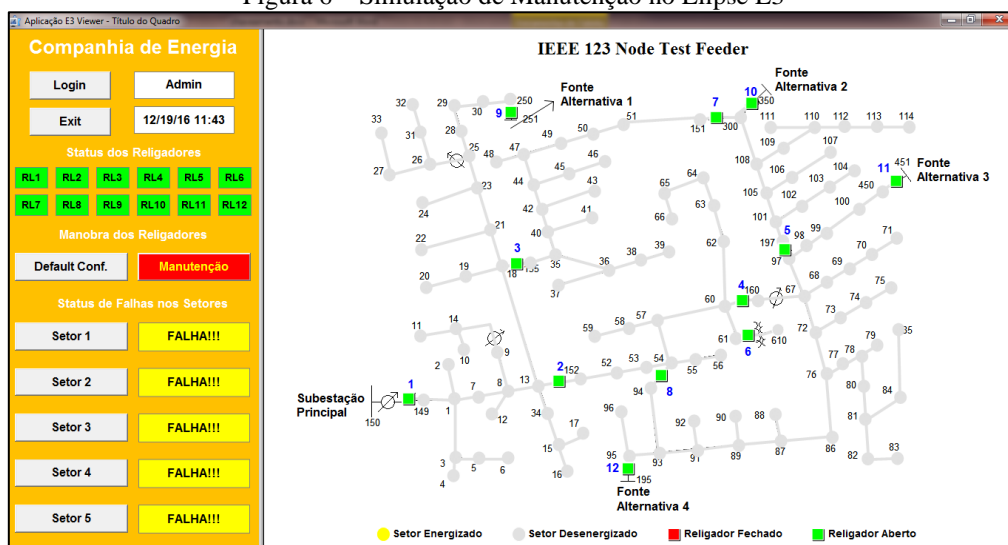
Figura 5 – Simulação de Falha 1 no Elipse E3



Na figura 5 é considerada uma falha no setor 1 (cinza) está sem energia e em amarelo (demais setores) com energia. Nas simulações realizadas no Elipse E3, o suprimento de energia é representado pelo fechamento da fonte alternativa 2 no painel, onde é possível que o operador observe o chaveamento no instante pós-falha.

Além da configuração *default* (ou normal) e todos os chaveamentos possíveis ainda foi simulada uma situação de manutenção total na rede onde todos os religadores são abertos e a rede permanece desenergizada possibilitando e emulando uma situação favorável a suporte técnico conforme a figura 6.

Figura 6 – Simulação de Manutenção no Elipse E3





### 3 DISCUSSÕES

O foco deste artigo foi a simulação de um religamento de uma rede de distribuição de energia elétrica o mais breve possível, considerando que houve uma falha em determinado trecho do modelo.

Segundo Borges (2012), a solução do problema de restabelecimento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é importante. Sobre isso diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos como: Métodos de Busca Exaustiva (GLAMOCIC, 2011); Lógicas de Automação (KAEWMANEE et. al, 2011) e ainda Sistemas Inteligentes. (KONDO, 2015)

Dentre as pesquisas realizadas, pôde-se observar que os pesquisadores utilizaram muitas técnicas de inteligência artificial para solucionar este tipo de problema, porém encontrou-se pouca pesquisa utilizando RNA para autorrecuperação, o que motivou a escolha da técnica.

Desta forma, foi possível obter as correntes de cada trecho através do fluxo de potência realizado no OpenDSS, e com estas informações realizar a classificação dos tipos de falhas através de uma RNA *backpropagation* e a demonstração destas informações no supervisorio Elipse E3.

A maneira como foi solucionado o problema foi inovadora no que diz respeito ao tempo, dentro dos parâmetros estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ou seja, menores do que 3 minutos.

Na tabela 1 pode-se notar que o tempo para efetuar o treinamento da RNA foi adequado ao que ANEEL estabelece. O tempo excedente ao estabelecido pode ser explorado no tratamento de outras variáveis, como por exemplo, na comunicação entre a automação e as chaves.

### 4 CONCLUSÃO

A rede IEEE 123 *node test feeder* foi selecionada e testada através do OpenDSS. A partir daí foram realizadas algumas adaptações como a inclusão de chaves que estavam inabilitadas na configuração default, com isso foi possível a alimentação por através delas de maneira a aumentar a confiabilidade do sistema. Para o estudo, estas alimentações secundárias são capazes de suprir toda a necessidade do sistema, tendo em vista a nova realidade, uma vez que um trecho defeituoso está isolado e não participará mais na carga total do sistema. Outro ponto importante é como foram selecionados as falhas, as mesmas por setores, classificando-os em cinco, ou seja, qualquer falha dentro daquela região proporcionará a mesma solução de chaveamento para isolá-la, embora possa haver alternativas de alimentação através das fontes ao redor dos alimentadores, por meio das chaves incluídas no sistema, visando a disponibilidade em horários em que o carregamento dos alimentadores esteja bastante elevado, o que acarretará apenas pequenas mudanças no chaveamento.

Para tornar a solução amigável aos operadores de um sistema elétrico de potência no COD (Centro de Operação da Distribuição), foi utilizado o sistema supervisorio Elipse E3, que deixou mais claro e visual quais são as alternativas para a situação pós-falha, ou seja, a solução do problema. É importante frisar que não foram consideradas falhas simultâneas, porém pode-se aplicar o método em outros sistemas para resolução de outras falhas em redes de distribuição de energia elétrica. Assim, faz-se necessário a realização demais experimentos, para que se confirme a eficiência do método em tempo real e torne conhecida

essa nova técnica. Cabendo aos profissionais da engenharia elétrica sempre buscar soluções eficientes e otimização de serviços.

## REFERÊNCIAS

- BERNARDO, Natália. Evolução da Gestão da Qualidade de Serviço de Energia Elétrica no Brasil. Rio de Janeiro: Projeto de Graduação-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- BORGES, Thiago Trezza. Restabelecimento de sistemas de distribuição utilizando fluxo de potência ótimo. Revista Controle & Automação, v. 23, n. 6, 2012.
- DECANINI, José Guilherme Magalini Santos. Detecção, classificação e localização de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando sistemas inteligentes. 2012.
- GLAMOCIC, Lj R. Combinatory search method for determining distribution network automation. In: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on. IEEE, 2011. p. 1-6.
- IEA, “INTERNATIONAL ENERGY AGENCY IEA.,” in Technology Roadmap - Smart Grid, 2011.
- IEEE, “Distribution Test Feeders,” 2014.. Available: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>.
- KAEWMANEE, Jutanon; SIRISUMRANNUKUL, Somporn. Multiobjective service restoration in distribution system using fuzzy decision algorithm and node-depth encoding. In: Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on. IEEE, 2011. p. 893-896.
- KONDO, D.V. et al. Alocação de Religadores Automatizados em Sistemas de Distribuição, 2015.
- MEHL, Ewaldo LM. Qualidade da energia elétrica. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ–UFPR, 2012.
- OUALMAKRAN, Youssef; MELENDEZ, Joaquim; HERRAIZ, Sergio. Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations. In: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on. IEEE, 2012. p. 1-6.
- VIEIRA, S.; GRANATO, J. PLC como Tecnologia de Suporte à Smart Grid, 2011.