

Localização de Curtos-Circuitos a partir da Alocação Otimizada de Medidores em um Sistema de Distribuição Subterrâneo

Alexandre Vinícius Festa

Thais Reggina kempner

Mário Oleskovicz

Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP

Av. Trabalhador Sancarlense, 400 – Centro, CEP 13566-590 - São Carlos – SP

alexandrefesta@hotmail.com, kempner@usp.br, olesk@sc.usp.br

Resumo — Apresenta-se nesta pesquisa um método para processar as informações necessárias para localizar a ocorrência de curtos-circuitos em um Sistema de Distribuição (SD). O processamento das informações foi realizado por meio da observação da propagação dos afundamentos de tensão, decorrentes de curtos-circuitos passíveis de ocorrência, e pela alocação de um número reduzido de medidores de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), permitindo a classificação e, posteriormente, a localização da falta sobre o SD. Cabe adiantar que tanto a função de classificação, como a localização, foram desenvolvidas pelo emprego de redes neurais artificiais. Um dos diferenciais da metodologia proposta é que esta utiliza dos valores eficazes das tensões trifásicas, registradas em medidores de QEE estrategicamente alocados. Os resultados encontrados são promissores e satisfatórios, indicando a aplicabilidade da metodologia proposta.

Palavras-chave -- Diagnóstico de faltas, Qualidade da energia elétrica, Redes neurais artificiais, Sistemas de distribuição subterrâneo.

I. INTRODUÇÃO

Diversos fenômenos podem comprometer a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), podendo ocasionar a má operação e/ou danos a equipamentos elétricos, perdas de processos industriais, falhas de equipamentos de proteção, entre outras situações indesejáveis. Entre os fenômenos que comprometem a QEE destacam-se, pela frequência de ocorrência, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Das VTCD, os afundamentos de tensão merecem atenção em especial, dado que grande parte de todos os fenômenos observados e relacionados à QEE dizem respeito a este tipo de distúrbio [1].

Estes eventos, em sua grande maioria, são consequências da ocorrência de curtos-circuitos ao longo do SEP, dado que o afundamento de tensão no ponto da falta se propaga ao longo da linha [2].

Quando da ocorrência de um curto-circuito no Sistema de Distribuição (SD), a concessionária distribuidora de energia elétrica é responsável pela manutenção e restabelecimento do funcionamento normal do sistema. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, regulamenta e fiscaliza a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias [3]. Como fato, sabe-se que esta qualidade do serviço depende diretamente do tempo necessário para efetuar a manutenção do SD frente aos defeitos passíveis de ocorrência sobre o mesmo. Assim, uma rápida localização da falta, com a sua consequente classificação, acelerará o processo de restabelecimento da energia, e refletirá em uma melhor avaliação da qualidade do serviço prestado pela concessionária responsável.

Neste contexto, a proposta desta pesquisa é, através do monitoramento contínuo dos níveis de tensão em alguns pontos específicos, com o uso de medidores de QEE alocados de forma otimizada [4], localizar curtos-circuitos no SD. Desta maneira, os monitores enviarão os dados registrados (*online*) para um centro de processamento inteligente alocado na Subestação de Energia (SE), e/ou centro de operação na concessionária, que, a partir da indicação da área afetada e classificação da falta, via Redes Neurais Artificiais (RNA) [5], irá efetuar a localização da falta, também utilizando RNA.

Para esta pesquisa, o emprego de RNA é justificado devido à sua capacidade de aquisição do conhecimento referente ao desempenho do SEP perante as condições de curtos-circuitos enfrentadas. Além disso, outras propriedades das RNA, tais como capacidade de generalização e tolerância a ruídos, são de grande valia ao monitoramento das grandezas elétricas envolvidas [5,6].

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro disponibilizado para a realização desta pesquisa.

Cabe adiantar que o algoritmo desenvolvido foi compilado dispondo do *software* MATLAB®. A aquisição da base de dados para validação da metodologia foi possível pela aplicação de diferentes situações de curtos-circuitos sobre o SD IEEE 37 barras [7]. Para formar o banco de dados, o SD foi modelado utilizando o *software* ATP (*Alternative Transients Program*) [8] via interface gráfica do ATPDraw [9]. Dispondo do ATP, distintas situações de curtos-circuitos foram aplicadas sobre o SD em análise.

O objetivo das simulações via ATP foi o de registrar os valores eficazes das tensões nos medidores de QEE alocados de forma otimizada, e também das correntes medidas na SE durante a aplicação dos curtos-circuitos. Pelo monitoramento destes valores e processamento dos mesmos por RNA, foi realizada a classificação e a localização dos curtos-circuitos aplicados.

Por esta metodologia, com a localização do curto-circuito, a partir da indicação da área e a classificação da falta, a concessionária responsável poderá efetuar a manutenção e restauração do SD com uma significativa redução do tempo, melhorando a qualidade do serviço prestado e diminuindo os custos operacionais envolvidos.

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente, têm-se exigido um aumento da confiabilidade e segurança dos SD de energia elétrica. Por este motivo, surge a necessidade de automatizar e melhorar as operações relacionadas a este setor.

Sabe-se que os SD Subterrâneos (SDS) apresentam um baixo índice de interrupção devido às suas características construtivas. Apesar disso, na ocorrência de faltas, estas são geralmente de difícil localização, diferentemente das redes aéreas, onde a inspeção visual pode ser efetuada.

Como mencionado, uma correta localização e classificação de um curto-circuito pode acelerar o processo de restauração do SD. Neste cenário, foi desenvolvida uma metodologia capaz de efetuar um diagnóstico de faltas passíveis de ocorrência nestes sistemas. Nos próximos itens todo o procedimento será descrito em detalhes.

A. Alocação ótima dos medidores de QEE

Para a determinação das áreas envolvidas em uma situação de curto-circuito, inicialmente foi realizada a alocação ótima dos medidores de QEE de modo a permitir a observabilidade dos afundamentos de tensão na ocorrência dos diversos tipos possíveis de curtos-circuitos (trifásicos, monofásicos, bifásicos fase-fase e bifásicos fase-fase-terra). Para isto, utilizou-se do SD teste de 37 barras do IEEE [7].

Todo o processo da alocação ótima dos medidores foi realizado com base em [4]. Para este processo, foram aplicados curtos-circuitos em cada uma das barras do SD e calculados, pelo método das posições de falta, os valores das tensões remanescentes nas demais barras. Assim, as simulações foram repetidas para todas as posições de falta de interesse para o estudo, sendo as tensões remanescentes, em todos os barramentos, armazenadas para a construção da Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) para cada tipo de falta [10,11].

Após a obtenção da MTDF, foi determinado um limiar, referente à amplitude da tensão, para o qual se deseja garantir a sensibilidade do sistema frente aos afundamentos de tensão. Para este estudo foi fixado um limiar $\leq 0,5$ p.u.. Cabe comentar que respeitando o limiar de tensão pré-estabelecido ($\leq 0,5$ p.u.), têm-se a observabilidade para todos os afundamentos com tensão remanescente entre 0,5 p.u. e 0,9 p.u. da tensão eficaz em cada um dos barramentos do SD em análise. A análise compreendendo estes níveis de tensão é muito importante, visto que 90% dos eventos associados à falta da QEE estão relacionados a afundamentos com estes níveis de tensão remanescente [12].

A fim de estabelecer a melhor localização de um número mínimo de medidores, optou-se pela utilização de um toolbox do *software* MATLAB® baseado no algoritmo *branch and bound* [13].

B. Delimitação das áreas monitoradas

Conforme anteriormente apontado, o sistema teste utilizado neste trabalho é o SD IEEE 37 barras [7], o qual pode ser visto na Fig. 1. Este é um SDS totalmente conectado em delta. O sistema é bastante desequilibrado, pois utiliza alimentadores não transpostos e é predominantemente carregado com cargas trifásicas desequilibradas. O sistema é composto por quatro configurações de linhas de distribuição, as quais se diferenciam pelo tipo de cabo utilizado nos alimentadores.

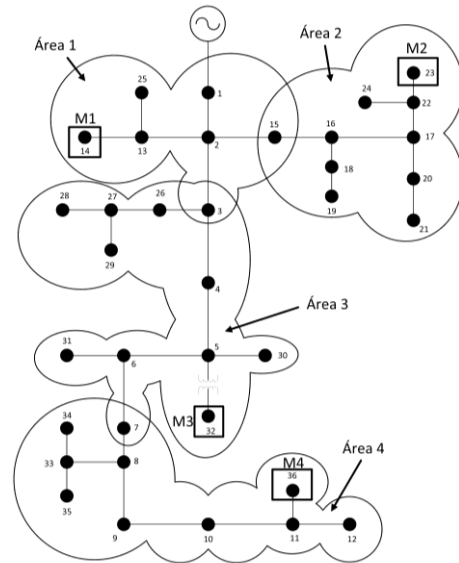


Figura 1. O SD em análise e a divisão do mesmo em quatro áreas de interesse.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção apresenta uma breve explicação sobre o processo de localização da área e classificação do tipo da falta, para, posteriormente, explicitar os conceitos utilizados para fornecer a distância da falta. Também são apresentados alguns conceitos sobre RNA e como foi compilado o banco de dados utilizado para os processos de treinamento, teste e validação da metodologia. O fluxograma da metodologia como um todo pode ser visualizado na Fig. 2.

A. Delimitação das áreas e fluxograma

Conforme apresentado, a Fig. 1 mostra o SD em análise, com a representação dos quatro monitores de QEE instalados (M1 na barra 14, M2 na barra 23, M3 na barra 32 e M4 na barra 36). Observa-se que quatro áreas para a localização dos curtos-circuitos foram definidas. O algoritmo desenvolvido para a delimitação das quatro áreas leva em consideração o valor do limiar dos afundamentos de tensão a serem monitorados, ou seja, um limiar $\leq 0,5$ p.u.. Desta forma, todas as barras que estão dentro de uma determinada área devem ser monitoradas pelo respectivo medidor, respeitando o limiar estabelecido.

Na Fig. 1 pode ser visto que as numerações das barras do sistema foram atribuídas e adaptadas, como utilizadas por [4]. A autora cita que a opção pela numeração foi tomada para manter uma sequência das barras que são eletricamente próximas umas das outras, de acordo com a construção da matriz impedância de barra.

Para garantir que nenhuma porção do SD fique fora de uma das quatro áreas e venha a caracterizar um “ponto cego”, o algoritmo de delimitação gera uma sobreposição proposital e desejável das áreas. Desta maneira, uma barra terminal entre duas áreas sempre ficará coberta por ambas as áreas, como acontece na Fig.1 com as barras 3, 7 e 15.

O fluxograma da Fig. 2 ilustra de forma sucinta a metodologia proposta, a qual contempla os procedimentos e resultados que serão apresentados, referentes a este trabalho.

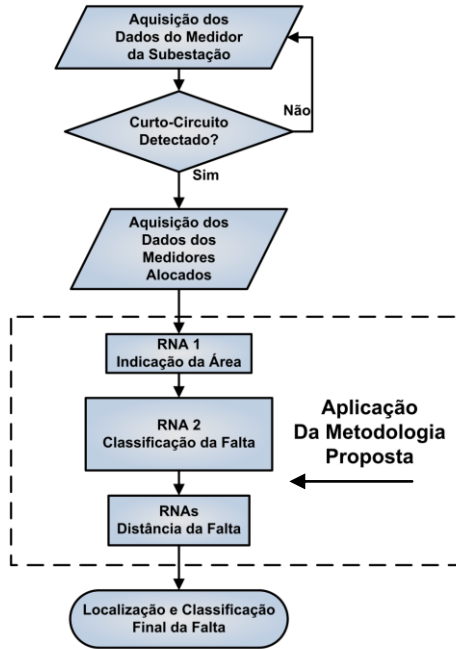


Figura 2. Fluxograma da proposta geral da pesquisa.

Deve ficar claro que os resultados apresentados neste artigo referem-se somente a indicação da distância da falta, conforme ressaltado na Fig. 2. Os outros resultados referentes à indicação da área e classificação da falta podem ser encontrados em [14]. Neste, primeiramente uma RNA foi utilizada para indicar a área em falta, para posteriormente outra RNA classificar o tipo da falta.

B. Redes neurais artificiais

As RNA são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos. Possuem a capacidade de adquirir conhecimento a partir de processos de treinamentos. As RNA podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, caracterizadas por neurônios artificiais [5].

A arquitetura de uma RNA define a forma como seus diversos neurônios estão dispostos, uns em relação aos outros. Dentre as diversas arquiteturas existentes, neste trabalho, a RNA escolhida é uma rede *feedforward* do tipo *Perceptron* Múltiplas Camadas (PMC) [5].

As RNA adquirem conhecimento através de um processo de treinamento. Este consiste da aplicação de um conjunto de passos ordenados com o intuito de ajustar os parâmetros da rede. O método escolhido para este estudo foi o *Levenberg-Marquardt*.

C. Obtenção dos dados para validação da metodologia

Para aplicação, treinamento e validação das RNA, diversos tipos de curtos-circuitos foram aplicados sobre o SDS modelado. Os tipos de faltas que foram aplicadas podem ser observados na Fig. 3.

Para a resistência de falta R_{ff} , representada nas Figuras 3(a), (d) e (e), os curtos-circuitos foram simulados considerando os valores de 0, 10, 20, 50 e 100 Ω . Vale destacar que o objetivo da pesquisa foi de trabalhar com faltas de baixa impedância, que, para SD, pode variar de 0 a 50 e/ou 100 Ω , conforme a literatura consultada [15,16].

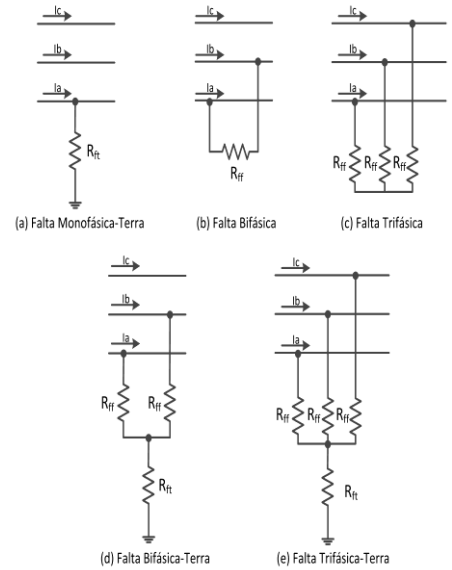


Figura 3. Tipos de faltas simuladas.

Nos casos em que se considera a resistência de falta entre fases (R_{ff}), o valor da resistência é normalmente baixo, devido a curta extensão do caminho entre os condutores [17]. Para as resistências R_{ff} , apontadas nas Figuras 3(b), (c), (d) e (e), o valor utilizado foi de 0 Ω .

Com relação aos locais de aplicação das faltas, inicialmente foram aplicados curtos-circuitos sobre as barras principais e, posteriormente, a 25%, 50% e 75% de todas as linhas que formam o SDS. Efetuadas as devidas combinações,

totalizaram-se 5.499 casos para formar um conjunto representativo de dados, os quais foram posteriormente divididos para os processos de treinamento, teste e de validação das RNA.

IV. RESULTADOS OBSERVADOS NO PROCESSO DE LOCALIZAÇÃO DA DISTÂNCIA

A partir da indicação da área da falta e da classificação da mesma (conforme fluxograma da Fig. 2 e resultados apresentados em [14]), tem-se a determinação da localização da falta. Na sequência, será descrita a metodologia para determinação da distância de falta, incluindo todo o processo de treinamento e de validação, assim como os dados de entrada utilizados.

Inicialmente definiu-se um ponto de referência para a determinação da distância de ocorrência da falta. A barra de referência para cada área foi escolhida como aquela de instalação do medidor de QEE (Fig. 1), ou seja, é a barra onde o medidor de QEE está alocado, conforme apresenta a Tabela 1.

TABELA I. BARRAS DE REFERÊNCIA PARA DETERMINAR A DISTÂNCIA DE OCORRÊNCIA DA FALTA.

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
Barra de Referência	14	23	32	36

Para exemplificar as distâncias referenciadas, analisando-se a Fig. 4 (em escala e com aumento da Fig. 1), caso a falta ocorra na barra 2, a distância total será a distância da barra 14 (referência) para a 13 (97,53 m), mais a distância da barra 13 para a barra 2 (121,92m), totalizando 219,45m. Esta metodologia foi seguida para todas as barras do sistema.

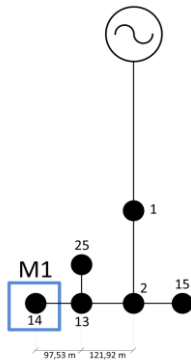


Figura 4. Distância entre a barra 2 e a barra 14 (barra de referência para a área 1).

Para melhorar o processo de treinamento é necessário pré-processar os padrões de entrada, visando uma maior eficiência e evitando as regiões de saturação das funções de ativação. Todo este processo corresponde a um problema de aproximação de funções. Assim, todos os valores de distância foram normalizados. Estes foram definidos no intervalo entre 0 e 1, os quais foram obtidos dividindo-se todos os valores de distância pelo valor de distância base, apresentados inicialmente na segunda coluna da Tabela 2.

Com objetivo de aumentar a eficiência do processo da indicação da distância da falta, decidiu-se adicionar aos dados

de entrada das RNA a corrente RMS medida somente na SE. Isto se justifica pelo fato de que o valor da corrente de curto-circuito também depende da distância da falta (impedância do curto-circuito observado).

A arquitetura das RNA utilizadas é a apresentada na Fig. 5. Todas as redes propostas neste trabalho para a determinação da distância da falta utilizam a mesma arquitetura, usada para a aproximação de funções [5]. A rede é composta de n entradas (tensões dos medidores selecionado(s) e correntes da SE, das fases selecionadas), uma camada escondida com m neurônios, com funções de ativação sigmoide logística, e uma camada de saída com 1 neurônio (distância da falta), utilizando-se da função de ativação linear.

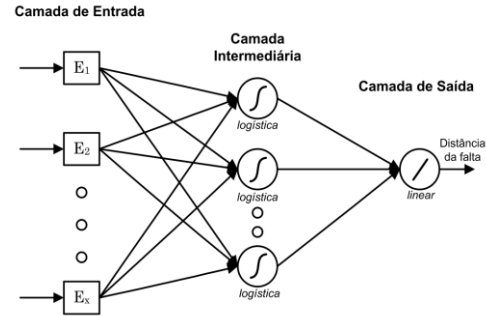


Figura 5. Modelo das RNA utilizadas para a determinação da distância da falta.

Alguns testes iniciais foram efetuados com o intuito de definir o melhor método para indicar a distância exata da falta. Após estes testes iniciais, definiu-se aleatoriamente um total de 80% dos dados para conjunto de treinamento, e o restante, 20%, para o conjunto de teste/validação. Estes valores encontram-se dentro dos recomendados na literatura [5].

Para o treinamento, como método de avaliação do desempenho das RNA, foi utilizado o cálculo do erro MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). O erro foi calculado em função da distância apresentada pela RNA. A equação (1) define este erro.

$$E = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{D_{real}(i) - D_{rna}(i)}{D_{real}(i)} \right| \right) \times 100\% \quad (1)$$

Sendo o erro total (E) um valor percentual (%); n o número de casos; D_{real} a distância real de aplicação da falta e D_{rna} a distância estimada pela RNA para a situação enfrentada.

Para cada tipo de falta, uma RNA foi treinada utilizando os valores das tensões RMS do medidor da área em falta, bem como as tensões das áreas adjacentes. Também foram utilizadas as correntes das fases em falta medidas a partir da SE.

Por exemplo, para ocorrência de uma falta monofásica envolvendo a fase “a” na área 2, as entradas da RNA responsável por determinar a distância da falta serão as tensões da fase “a” dos medidores M1 e M2 e a corrente RMS da fase “a” medida na SE. A Tabela 2 apresenta a configuração de cada RNA utilizada para a localização de faltas monofásicas, além dos respectivos erros observados.

TABELA II. ERROS DAS RNA NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS MONOFÁSICAS, POR ÁREA.

Área	Dist. Base (m)	Estrutura	Erro MAPE (%)	Erro Médio (m)	Erro Máximo (%)	Erro Máximo (m)
1	934,97	[4 8 1]	14,85	33,96	57,68	275,46
2	938,78	[3 9 1]	2,86	12,94	26,09	97,02
3	487,68	[4 12 1]	5,56	6,03	145,16	35,18
4	1048,5	[3 9 1]	7,06	11,86	129,18	65,6

O gráfico da Fig. 6 mostra, para faltas monofásicas, o número de casos em função de uma determinada faixa de erro. Analisando esta figura, pode-se concluir que os erros apresentados na Tabela 2 são casos específicos, já que para a maioria dos casos, estes se encontram na faixa de erro de 0 a 5%.

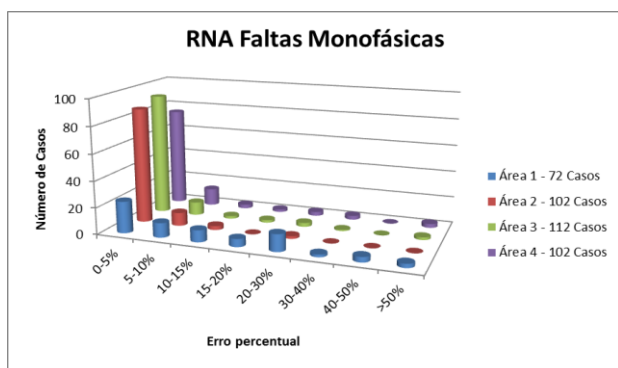


Figura 6. Erros das RNA para a localização de faltas monofásicas.

Similarmente às faltas monofásicas, para as faltas bifásicas e bifásicas-terra, as entradas de cada rede foram as respectivas tensões RMS do medidor da área e das áreas adjacentes, e as correntes RMS medidas na SE das fases envolvidas na área. A Tabela 3 apresenta, para as faltas bifásicas, as especificações de cada RNA e os erros encontrados para cada área.

TABELA III. ERROS DAS RNA NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BIFÁSICAS, POR ÁREA.

Área	Dist. Base (m)	Estrutura	Erro MAPE (%)	Erro Médio (m)	Erro Máximo (%)	Erro Máximo (m)
1	934,97	[8 14 1]	4,45	14,08	14,08	65,23
2	938,78	[6 8 1]	0,77	3,13	2,67	16,54
3	487,68	[8 12 1]	1,5	2,21	6,02	7,37
4	1048,5	[6 8 1]	0,92	2,76	4,09	25,69

Para as faltas bifásicas, na Fig. 7, pode ser observado que grande parte das situações analisadas ficaram com erros entre 0 e 5%, sendo que nas áreas 1 e 3 alguns casos apresentaram valores entre 5 e 10%.

A Tabela 4 apresenta, para as faltas bifásicas-terra, as especificações de cada RNA e os erros encontrados.

A Fig. 8 apresenta o número de casos em função da faixa de erro para as RNA de localização de faltas bifásicas-terra.

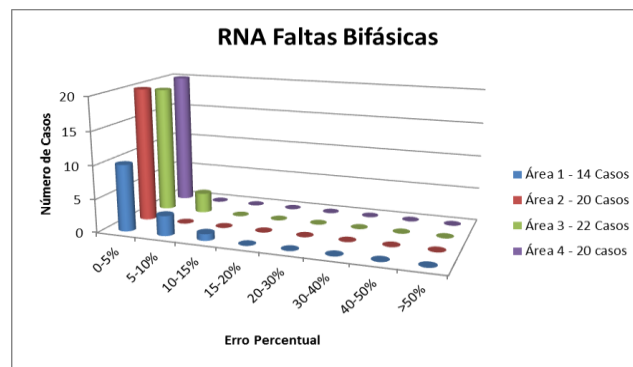


Figura 7. Erros das RNA para a localização de faltas bifásicas.

TABELA IV. ERROS DAS RNA NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BIFÁSICAS-TERRA, POR ÁREA.

Área	Dist. Base (m)	Estrutura	Erro MAPE (%)	Erro Médio (m)	Erro Máximo (%)	Erro Máximo (m)
1	934,97	[8 15 1]	7,2	15,88	38,43	127,97
2	938,78	[6 12 1]	2,17	11,14	18,81	127,51
3	487,68	[8 15 1]	5,11	5,4	76,07	58,44
4	1048,5	[6 12 1]	4,3	5,12	78,80	54,35

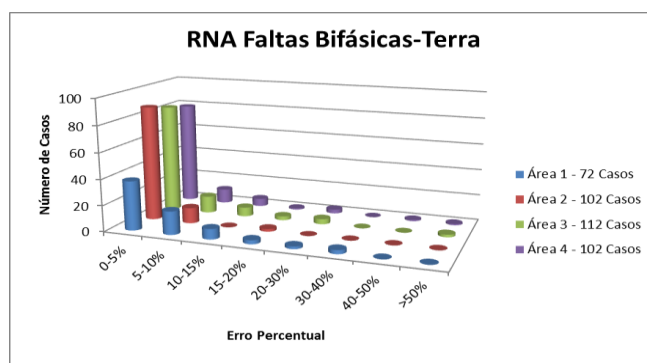


Figura 8. Erros das RNA para a localização de faltas bifásicas-terra.

Para as faltas trifásicas o modelo das RNA seguiu o mesmo padrão anteriormente apresentado (tensões trifásicas do medidor selecionado e das áreas adjacentes, juntamente com as correntes trifásicas da SE). A Tabela 5 apresenta, para as faltas trifásicas, as especificações de cada RNA e os erros encontrados para cada área. Já a Fig. 9 apresenta o número de casos em função da faixa de erro para as RNA de localização das faltas trifásicas.

TABELA V. ERROS DAS RNA NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS TRIFÁSICAS, POR ÁREA.

Área	Dist. Base (m)	Estrutura	Erro MAPE (%)	Erro Médio (m)	Erro Máximo (%)	Erro Máximo (m)
1	934,97	[12 15 1]	1,49	7,4	8,04	63,87
2	938,78	[9 17 1]	1,03	6,17	7,89	50,02
3	487,68	[12 18 1]	0,42	0,54	4,37	2,11
4	1048,5	[9 15 1]	0,67	1,19	5,37	6,71

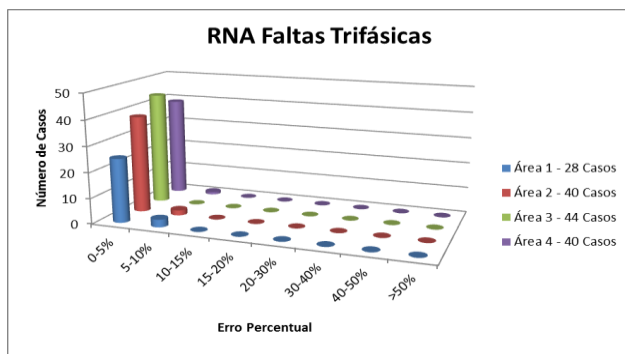


Figura 9. Erros das RNA para a localização de faltas trifásicas.

A Tabela 6 apresenta o erro médio de cada área, em função da resistência de falta considerada. Como se observa, para a maioria das situações de curtos-circuitos analisadas, os erros calculados aumentam com o aumento da resistência da falta. Além disto, é possível ver na Tabela 6 que a Área 1 apresenta o maior erro médio, em relação as outras áreas.

TABELA VI. ERRO MÉDIO POR ÁREA EM FUNÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DAS FALTAS.

Resistência (Ω)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
0	3,66 %	1,08 %	1,60 %	1,41 %
10	7,84 %	1,41 %	2,75 %	4,76 %
20	10,39 %	1,60 %	2,94 %	3,66 %
50	13,47 %	2,88 %	4,90 %	7,28 %
100	14,12 %	4,15 %	8,21 %	6,50 %

V. CONCLUSÕES

A pesquisa apresentou um método para processar as informações necessárias para localizar a ocorrência de curtos-circuitos em um Sistema de Distribuição (SD). Para a localização precisa da falta foram apresentados os resultados obtidos, os quais foram considerados aceitáveis. O erro médio máximo foi de 33,96 metros, sendo que alguns casos tiveram erro médio menor que 1 metro. Os resultados obtidos também mostraram que os maiores erros foram encontrados para as faltas monofásicas. Já os melhores resultados foram obtidos frente às faltas trifásicas.

O método testado também demonstrou que os erros encontrados aumentam com a resistência da falta, como já evidenciado em trabalhos correlatos. Com relação à área 1, que apresentou o maior erro médio, vale a pena comentar que esta se encontra próximo a SE, quando comparado com a distância das outras áreas, acarretando um menor tempo de deslocamento das equipes de manutenção.

Um diferencial desta metodologia, quando comparada às tradicionais, é que esta utiliza os dados de tensão registrados em medidores estrategicamente alocados sobre o SDS, dividindo o mesmo em áreas específicas.

Como descrito anteriormente, o objetivo final desta pesquisa foi o de oferecer um diagnóstico das situações de curtos-circuitos presenciadas, auxiliando engenheiros e

operadores na tomada de decisões na operação das subestações, e do SD como um todo. Assim, utilizando-se deste processo, será possível reduzir consideravelmente o tempo gasto pelas concessionárias de energia elétrica para localizar os curtos-circuitos passíveis de ocorrência sobre os SDS. Vale lembrar que esse tempo interfere diretamente na qualidade do serviço prestado pelas mesmas, objeto de fiscalização dos órgãos reguladores.

REFERÊNCIAS

- [1] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, New York, McGraw-Hill, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [2] G. Carpinelli, C. Di Perna, P. Caramia, P. Varilone, and P. Verde, "Methods for Assessing the Robustness of Electrical Power Systems Against Voltage Dips," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol.24, no.1, pp.43-51, Jan. 2009.
- [3] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST, Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 641/2014.
- [4] T. R. Kempner, "A robustez de um sistema de distribuição e a alocação de medidores de qualidade da energia elétrica frente aos afundamentos de tensão," 111f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [5] I. N. Silva, D. H. Spatti, R. A. Flauzino, *Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas*, Artliber Editora Ltda, 2010.
- [6] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*, Prentice Hall, 2008.
- [7] IEEE PES Test Feeders, "Distribution System Analysis Subcommittee," IEEE Power Engineering Society, Acessado em novembro de 2015, disponível: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>
- [8] Alternative Transient Program / Electromagnetic Transient Program (ATP/EMTP), 2000.
- [9] L. Prikler, H. K. Hoidalén, ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP User's Manual, 2002.
- [10] T. R. Kempner, M. Oleskovicz, L. A. Ghessi, "Previsão Estocástica dos Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição," IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE. Cuiabá – MT, 31 de Julho a 03 de Agosto de 2011.
- [11] T. R. Kempner, M. Oleskovicz, "Validação do Método das Posições de Falta para a Avaliação dos Afundamentos de Tensão em Sistemas de Distribuição," The 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE. Mar Del Plata – Argentina, 06-09 de Novembro de 2011.
- [12] EPRI – Electric Power Research Institute. Distribution System Power Quality Assessment: Phase II. Voltage Sag and Interruption Analysis. Project Manager A. Sundaram. pp 5 – 17, 2003.
- [13] MathWorks (2011), Optimization Toolbox™, User's Guide R2011b. Acessado em outubro de 2015, disponível: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/optim/optim_tb.pdf.
- [14] A. V. Festa, T. R. Kempner, M. Oleskovicz, "Diagnóstico de Faltas em um Sistema de Distribuição Subterrâneo Utilizando Redes Neurais Artificiais," 20º Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2014.
- [15] J. COSER, J. G. ROLIM. Metodologia para Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição Utilizando Redes Neurais Artificiais. Congresso Brasileiro de Automática, Gramado. CBA, 2004.
- [16] M. S. Neto-Tonelli, J. G. M. S. Decanini, C. R. Minussi, "Detecção e Classificação de Faltas de Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando uma Rede Neural ARTMAP Fuzzy," X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. 18 – 21 Dezembro, 2011.
- [17] J. Coser, "Contribuições aos Métodos para Localização de Faltas em Alimentadores de Distribuição," Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.