Desenvolvimento de Metodologia de Gestão de Falhas Transitórias

H.O.Henriques, M.Lellis, C. J. R. D'Ávila, L. Bahiense, A. F. Mello Neto, L. F. Pinheiro

***Resumo* – Este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de tecnologia para diagnosticar e localizar falhas transitórias em redes de distribuição em média tensão, a partir do reconhecimento dos padrões utilizando redes neurais. Em complementação foram desenvolvidos softwares para tratamento dos dados de entrada para as redes neurais, bem como para identificação do tipo de falta e sua localização nos sistemas elétricos. Para obtenção dos dados de entrada foram projetados protótipos de equipamento de medição/transmissão de dados e de transdutores de tensão, sendo instalados em dois alimentadores aéreos na área de concessão da LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE SA, na cidade do Rio de Janeiro. Conclui o trabalho que os resultados obtidos indicam a adequabilidade da aplicação de redes neurais a este projeto.**

***Palavras chaves* – classificação, falhas transitórias, localização, medição, redes de distribuição.**

I. Introdução

Para identificação de potenciais falhas permanentes a LIGHT utiliza atualmente informações sobre falhas transitórias nas redes de Média Tensão (MT) disponibilizadas parcialmente pelo Sistema de Gerência da Distribuição (SGD), pelos relés de proteção de sobrecorrente dos alimentadores de cerca de 50% de suas subestações ou pelos despachantes do Centro de Operações. Entretanto, essas informações não dão indicação de localização e da natureza do problema, sendo necessária investigação no campo de todo o circuito. Amostragem recente realizada em 110 circuitos de MT revelou que para cada falha permanente registrada no SGD ocorrem cerca de 5 falhas transitórias não registradas. Adicionalmente, 92% dos circuitos que sofreram falhas permanentes, sofreram também falhas transitórias precedentes.

Estas informações, se bem tratadas e utilizadas, podem direcionar ações de manutenção preventiva ou corretiva para impedir a ocorrência de falhas permanentes, com forte impacto nos indicadores de continuidade. Além disto, a filosofia de manutenção preventiva da LIGHT poderá sofrer modificações em função da melhoria da observabilidade da rede, com conseqüente redução de custos operacionais.

Desse modo, a possibilidade de contar com um sistema de monitoramento em tempo real que possa disponibilizar essas informações, de forma amigável, se constitui em uma ferramenta importante para orientar as ações preventivas e corretivas das equipes de manutenção e permitir a redução dos índices de FEC e DEC da empresa.

O equipamento desenvolvido foi baseado em uma concepção de baixo custo, compacta e para uso interno no ambiente da subestação. Os dados relacionados com a ocorrência de uma falha são registrados como pontos de um oscilograma e são transmitidos via modem GSM/GPRS, na forma de um arquivo texto, para um site na WEB.

II. Objetivo

Os principais objetivos do projeto são:

I. Desenvolver uma metodologia de gestão das falhas transitórias em redes de MT, com vistas a reduzir a ocorrência de falhas permanentes com impacto direto na melhoria da qualidade de fornecimento e na redução de custos operacionais, através do direcionamento adequado das ações corretivas;

II. Desenvolver um sistema de medição de baixo custo, composto de "hardware" e "software", para monitoramento e registro das grandezas elétricas de tensão e de corrente em tempo real, com vistas à análise preditiva das ocorrências causadoras de falhas de características transitórias;

III. Desenvolver um modelo que possa determinar a possibilidade de falha dos equipamentos do alimentador, devido a defeitos existentes e a agentes externos que possam causar o desligamento;

IV. Implementar projeto piloto de medição em duas subestações da LIGHT, com a instalação de dois medidores protótipos nas saídas de alimentadores de média tensão;

V. Desenvolver um modelo de reconhecimento de padrões de falhas em equipamentos e redes baseado na análise de formas de onda capturadas ("signature analysis") por ocasião do evento que gerou o defeito transitório na linha, obtidas através do sistema piloto de medição;

VI. Desenvolver um modelo que de posse das informações acima consiga diagnosticar a causa da falha transitória.

III. Metodologia

Pode-se dividir o projeto nas seguintes etapas: desenvolvimento dos protótipos do equipamento de medição e dos transdutores de sinais, seleção dos circuitos para realização dos ensaios, instalação dos protótipos e testes preliminares, ensaios de campo realizados, metodologia para tratamento dos sinais registrados e aplicação das redes neurais.

A. *Desenvolvimento dos Protótipos do Equipamento de Medição e dos Transdutores de Sinais*

O equipamento é baseado em uma CPU embedded com processador VIA, 1.0 GHz, embarcada em um gabinete mini ITX, e uma placa conversora A/D, de 8 canais, 16 bits e

200.000 amostras por segundo. Os eventos são registrados com um relógio de tempo universal por GPS e os dados são transmitidos através de um modem GSM/GPRS, quadriband, para um site na Web.

Todas as partes utilizadas no hardware são obtidas com facilidade no mercado e representam um custo baixo na construção do equipamento.

O software é formado por três módulos principais: aquisição, processamento e comunicação. O módulo de aquisição controla a captura e a digitalização dos dados. O módulo de processamento faz a análise em tempo real do arquivo digitalizado e identifica as singularidades na forma de onda, ou seja, variações de tensão de curta duração (afundamentos e elevações de tensão), transitórios e interrupções, armazenando os sinais correspondentes na memória local do equipamento. O módulo de comunicação transfere os dados para a concessionária via modem GSM/GPRS e, ainda, permite o "download" local via protocolo "Bluetooth".

Para o desenvolvimento dos programas foi escolhida como plataforma o Microsoft Visual Studio 2005, rodando o Framework 2.0. São utilizadas, também, bibliotecas baseadas na plataforma .NET, da Microsoft, que possui métodos e atributos específicos para a programação da aquisição.

O equipamento é capaz de monitorar em tempo real as três fases de tensão e corrente.

A Figura 1 abaixo mostra o diagrama de blocos do equipamento.

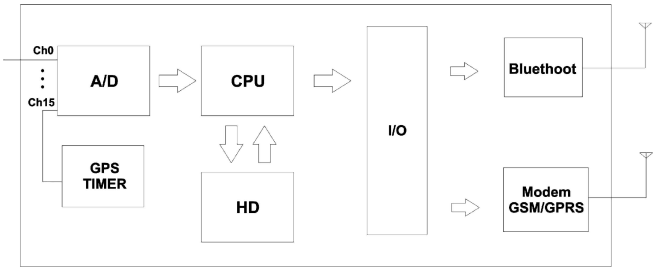

Figura 1. Diagrama de blocos do equipamento.

Para aquisição dos sinais de média tensão foram desenvolvidos pela equipe do LASPI/UFRJ, 6 (seis) transdutores de tensão para operação em ambiente abrigado em subestações.

Os transdutores de tensão apresentam como características um nível de isolamento de 35 kV e uma banda de freqüência maior que 1 MHz, que permite a captura de fenômenos transitórios. O condicionamento do sinal de média tensão para a entrada do equipamento de medição é baseado em um divisor resistivo com compensação capacitiva e uma relação de atenuação de 1:8825. A Figura 2 apresenta o esquema elétrico do transdutor de tensão.

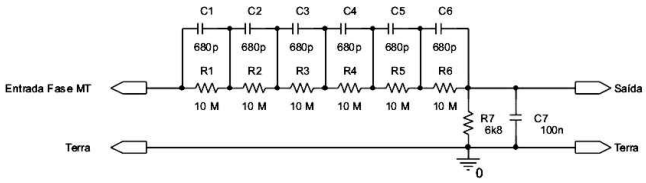

Figura 2. Esquema elétrico do transdutor de tensão.

Para aquisição dos sinais de corrente foram utilizados transdutores do tipo alicate de indução, modelo SR661, de fabricação da AEMC INSTRUMENTS. Esse alicate de corrente possui faixas de medição de 20, 200 e 2000 A de pico e resposta em freqüência de 1 Hz a 100 kHz. A tensão de trabalho é de 600 V.

A Figura 3, a seguir, apresenta as fotos dos transdutores de sinais utilizados na medição.

(a) Transdutor de tensão

(b) Transdutor de corrente

Figura 3. Fotos (a) e (b) dos transdutores de sinais.

B. *Seleção dos Circuitos para Realização dos Ensaios*

Para seleção dos circuitos de distribuição, objeto dos ensaios com o sistema de medição, realizou-se uma análise com base nos relatórios de ocorrências da LIGHT, de forma a identificar àqueles com pior desempenho sob o ponto de vista das mencionadas "falhas transitórias".

Essa seleção considerou como origem de falhas transitórias as ocorrências com as seguintes causas:

- Descarga atmosférica;
- Ocorrência com causa fugitiva, reposição rápida automática;
- Ocorrência com causa fugitiva, reposição rápida manual;
- Ocorrência com causa fugitiva, reposição lenta;
- Queda de galhos de árvores;
- Queda de árvores;
- Pipa presa à estrutura;
- Objeto sobre a rede;
- Falhas/defeitos em equipamentos;
- Falhas/defeitos em outros componentes.

A partir da análise supracitada foram selecionadas 3 linhas de distribuição aéreas de 13,8 kV, LDA Caribu, LDA Menta e a LDA Estrela, sendo as duas primeiras supridas pela Subestação Transformadora da Distribuição Porta D'Água - SETD PDG, e a última pela Subestação Transformadora da Distribuição Frei Caneca - SETD FCN.

A SETD Porta D'Água está localizada no bairro de Fre-

guesia, no município do Rio de Janeiro. A região do trajeto das referidas linhas tem como característica principal ser densamente arborizada, bem como possuir um alto nível isoceráunico.

A SETD Frei Caneca está localizada no bairro do Catumbi, no município do Rio de Janeiro. A região do trajeto da LDA Estrela tem como característica ser moderadamente arborizada, contendo trechos em comunidades de baixa renda.

C. Instalação dos Protótipos e Testes Preliminares

O protótipo do equipamento de medição foi colocado em um espaço localizado no piso inferior do compartimento blindado do disjuntor, enquanto os transdutores de sinais foram instalados na parte posterior do referido compartimento, conectados diretamente no cabo de 13,8 kV na saída do disjuntor. A Figura 4 mostra a foto da instalação dos transdutores na SETD Frei Caneca.

Figura 4. Foto da instalação dos transdutores de sinais.

Testes preliminares foram realizados a partir do monitoramento de duas linhas de distribuição aérea, localizadas respectivamente nas Subestações Frei Caneca e Porta D'Água.

Os eventos registrados nas linhas de distribuição, identificados pelo software de processamento, são armazenados sob a forma de um arquivo texto com os valores instantâneos das amostras de tensão e de corrente. O arquivo corresponde a um oscilograma do instante em que o evento ocorreu. A Figura 5 apresenta uma ocorrência registrada na LDA Estrela, localizada na Subestação Frei Caneca, às 19h07min43s, no dia 15/11/2007.

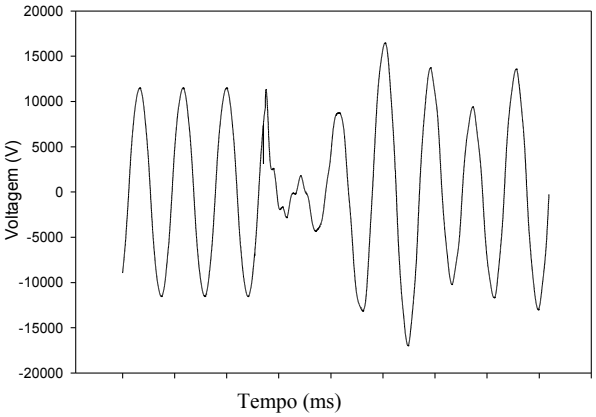

Figura 5. Transitório na LDA I Frei Caneca.

D. Ensaios de Campo Realizados

O início dos ensaios com os protótipos do sistema de medição ocorreu no final de novembro de 2007, permanecendo instalados até o encerramento do projeto.

Durante esse período foi obtida uma quantidade de registros de medição significativa, possibilitando a formação de um banco de dados relevante, abrangendo as diferentes causas acima mencionadas. Esses ensaios possibilitaram também o aprimoramento dos protótipos, principalmente no que se refere à filosofia de disparo dos canais de medição.

Os protótipos dos sistemas de medição de falhas transitórias (SMFT) foram instalados na saída dos disjuntores das respectivas linhas.

O condicionamento dos sinais de tensão foi obtido através de divisores resistivos instalados diretamente no 13,8kV, conectados entre fase-terra. Para os sinais de corrente foram utilizados alicates de corrente instalados diretamente nos cabos de 13,8 kV.

Principais Resultados dos Ensaios

O SMFT gera arquivos, em formato texto, que devem ser tratados por um aplicativo gráfico para obtenção da oscilografia dos sinais de tensão e de corrente. No presente trabalho foi utilizado o programa de planilha eletrônica "Excel" que, além de permitir a geração da oscilografia dos sinais, possibilita uma série de cálculos matemáticos facilitando a análise e tratamento das grandezas medidas.

São apresentados a seguir alguns exemplos de gráficos de tensão e de corrente representando eventos ocorridos na linha em medição, em linhas adjacentes e em linhas não adjacentes, contemplando diferentes tipos de falhas transitórias.

Eventos Ocorridos na SETD Porta D'Água

A SETD Porta D'Água é uma subestação alimentada em 138 kV, possuindo transformação para 25kV e 13,8 kV. Sendo assim, com o medidor instalado em uma linha de 13,8 kV, é possível obter registros de eventos da própria linha, de linhas adjacentes e de linhas não adjacentes. No caso da ocorrência de eventos em linhas não adjacentes a repercussão sobre a linha em medição ocorre via o transformador de 138/13,8 kV.

A Figura 6 apresenta a oscilografia dos sinais das tensões fase-terra para o evento na LDA Menta registrado à 01h06min30s do dia 30/10/08. Essa ocorrência na LDA Menta foi registrada no SGD da LIGHT com o Nº1542807, sendo classificada como "causa fugitiva-reposição lenta". No referido gráfico pode ser observado o afundamento de tensão na fase C e a elevação da tensão nas outras fases.

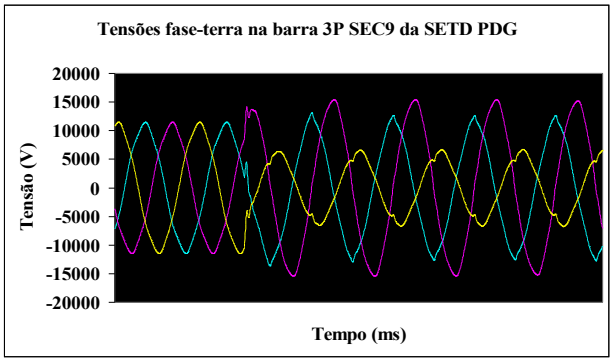

Figura 6. Evento com disparo em tensão registrado no dia 30/10/08.

A Figura 7 apresenta a oscilografia das correntes de linha na LDA Menta, correspondentes ao evento da Figura 6. No referido gráfico pode ser observada a corrente de curto-circuito fase-terra envolvendo a fase C, que atingiu uma amplitude máxima de 1.900A.

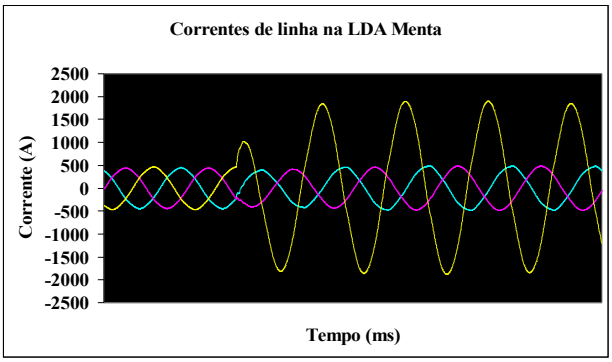

Figura 7. Correntes registradas referentes ao evento da Figura 6.

A Figura 8 apresenta o registro da oscilografia dos sinais das tensões fase-terra na LDA Menta às 14h45min56s do dia 25/10/08, devido a uma ocorrência na LDA Crame (linha adjacente à LDA Menta) registrada no SGD com o Nº1536082 e classificada como "queda de galhos de árvores". No referido gráfico pode ser observado um afundamento de tensão nas fases A e B.

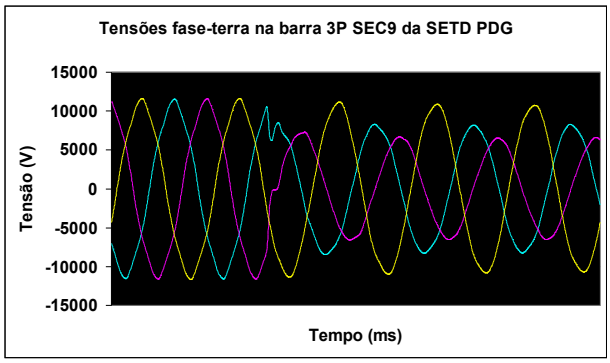

Figura 8. Evento com disparo em tensão registrado no dia 25/10/08.

A Figura 9 apresenta a oscilografia das correntes de linha na LDA Menta, correspondentes ao evento da Figura 8. No referido gráfico pode ser observada a elevação da amplitude da corrente na fase C e a queda das amplitudes nas fases A e B. Tal situação corresponde a um curto-circuito fase-fase-terra na linha adjacente à linha em medição.

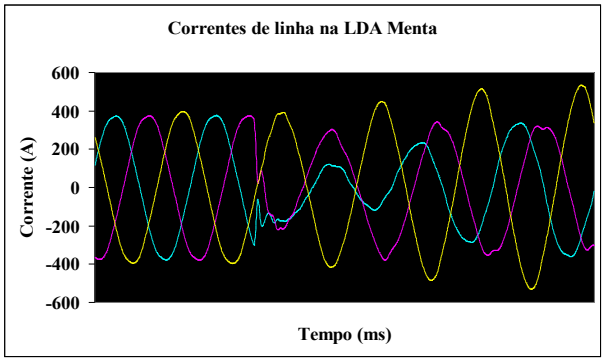

Figura 9. Correntes registradas referentes ao evento da Figura 8.

A Figura 10 apresenta o registro da oscilografia dos sinais das correntes na LDA Menta às 13h56min58s do dia 22/10/08, devido a uma ocorrência na LDA Artistas (linha não adjacente à LDA Menta) registrada no SGD com o Nº15300797 e classificada como "objeto sobre a rede". No referido gráfico pode ser observada uma inexpressiva elevação das amplitudes das correntes de linha por ocasião do disparo.

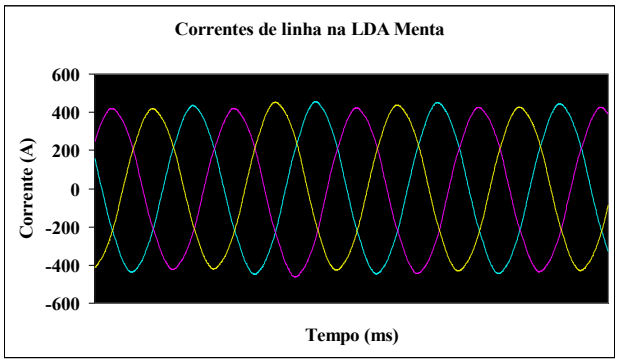

Figura 10. Evento com disparo em corrente registrado no dia 22/10/08.

A Figura 11 apresenta a oscilografia das tensões fase-terra na LDA Menta, correspondentes ao evento da Figura 10. No referido gráfico pode ser observada que na ocasião do evento as tensões não tiveram variações nas suas amplitudes.

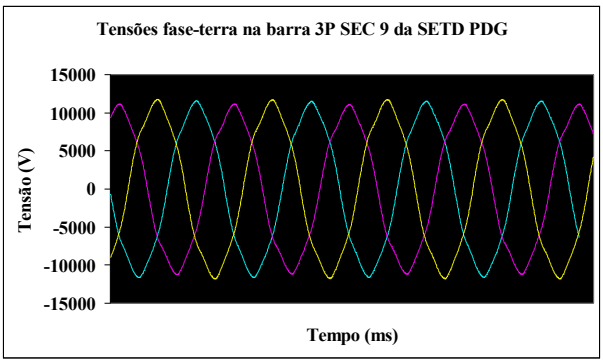

Figura 11. Tensões registradas referentes ao evento da Figura 10.

A Figura 12 apresenta o registro da oscilografia dos sinais das correntes na LDA Menta registrado às 14h08min24s do dia 25/10/08, devido a uma ocorrência na LSA Pintor registrada no SGD com o Nº1536046 e classificada como "queda de galhos de árvores". A LSA Pintor é uma linha do sistema de subtransmissão de 25 kV.

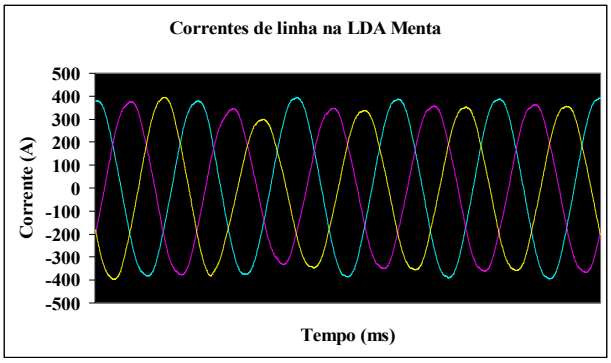

Figura 12. Evento com disparo em corrente registrado no dia 25/10/08.

No referido gráfico pode ser observada uma queda momentânea das amplitudes das correntes de linha das fases B e C por ocasião do disparo, enquanto a amplitude da fase A sofreu ligeira elevação.

A Figura 13 apresenta a oscilografia das tensões fase-terra na LDA Menta, correspondentes ao evento da Figura 12. No referido gráfico pode ser observada por ocasião do referido evento um afundamento momentâneo na amplitude da tensão nas fases B e C, enquanto a amplitude da fase A não sofreu variação.

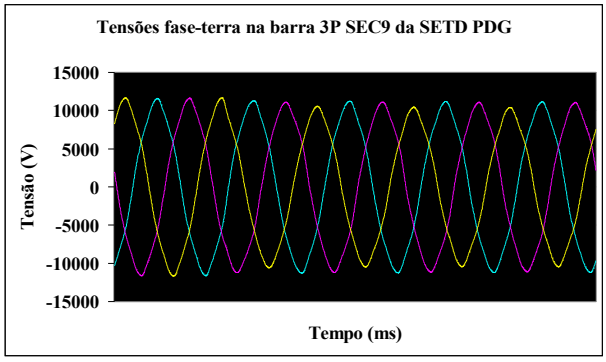

Figura 13. Tensões registradas referentes ao evento da Figura 12.

Eventos Ocorridos na SETD Frei Caneca

A SETD Frei Caneca é uma subestação alimentada em 138kV, possuindo transformação para 25kV e 13,8kV. Sendo assim, com o medidor instalado em uma linha de 13,8kV, é possível obter registros de eventos da própria linha, de linhas adjacentes e de linhas não adjacentes. No caso da ocorrência de eventos em linhas não adjacentes a repercussão sobre a linha em medição ocorre via o transformador de 138/13,8kV. Essa subestação alimenta grande parte da rede de distribuição subterrânea do centro do Rio de Janeiro. O transformador que alimenta a LDA Estrela supre, também, seis circuitos subterrâneos.

A Figura 14 apresenta a oscilografia dos sinais das tensões fase-terra para o evento na LDA Estrela registrado à 09h55min39s do dia 22/05/08. Essa ocorrência na LDA Estrela foi registrada no SGD com o Nº1285289, sendo classificada como "interferência acidental de particular". No referido gráfico pode ser observado o afundamento de tensão nas fases A e B, enquanto a fase C permanece inalterada.

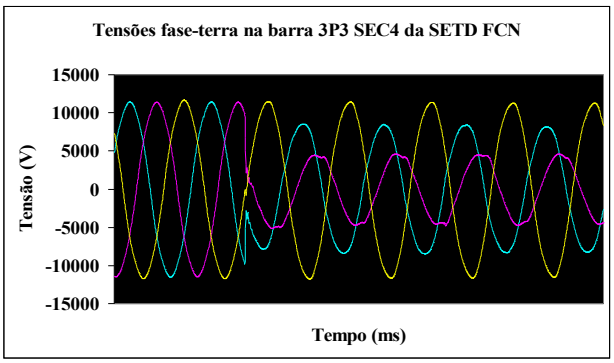

Figura 14. Evento com disparo em tensão registrado no dia 22/05/08.

A Figura 15 apresenta a oscilografia das correntes de linha na LDA Estrela, correspondentes ao evento da Figura 14. No referido gráfico pode ser observada a elevação brusca das amplitudes das correntes nas fases A e B, correspondendo a um curto-circuito fase-fase na linha em medição.

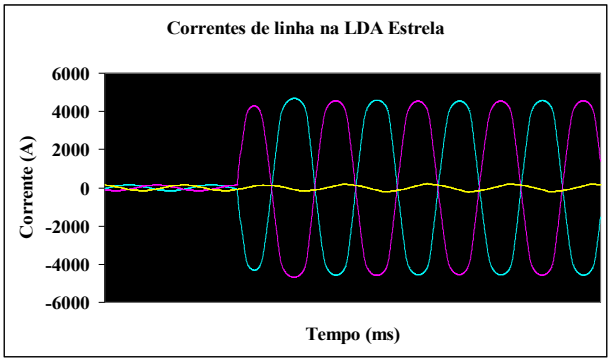

Figura 15. Correntes registradas referentes ao evento da Figura 14.

A Figura 16 apresenta o registro da oscilografia dos sinais das tensões fase-terra na LDA Estrela registrado à 10h19min27s do dia 10/06/08, devido a uma ocorrência na LDS 1767 registrada no SGD com o Nº1315381 e classificada como "falha/defeito em cabo subterrâneo". Nesse dia houve registro de vários eventos a partir das 10h19min27s. No referido gráfico podem ser observadas as falhas de forma de onda da tensão nas fases A, B e C, durante o evento. Nota-se que a amplitude do transitório na fase C chegou próxima de 20 kV.

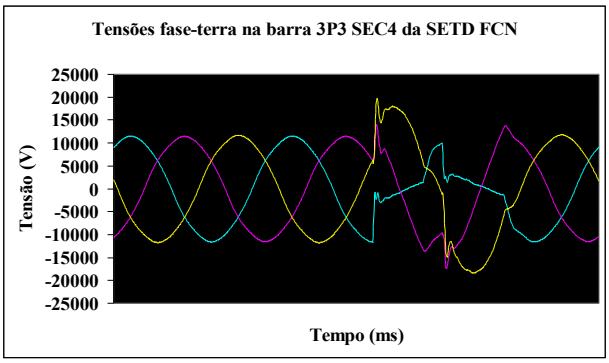

Figura 16. Evento com disparo em tensão registrado no dia 10/06/08.

A Figura 17 apresenta a oscilografia das correntes de linha na LDA Estrela, correspondentes ao evento da Figura 16. No referido gráfico podem ser observados transitórios das correntes nas fases A, B e C durante a ocorrência do evento.

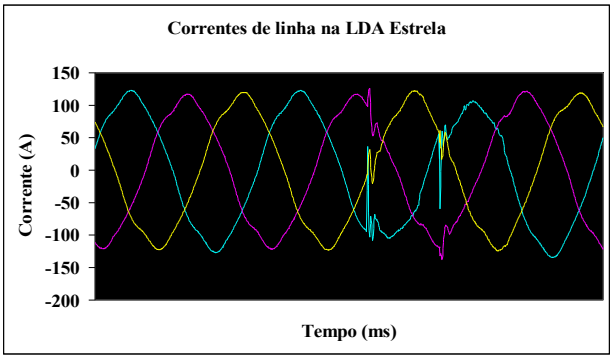

Figura 17. Correntes registradas referentes ao evento da Figura 16.

E. *Metodologia para Tratamento dos Sinais Registrados*

Metodologia para Classificação da Causa da Falha Transitória

O tratamento das grandezas medidas tem por objetivo fornecer os dados de entrada para treinamento da rede neural que irá classificar as falhas transitórias, com base em eventos selecionados e devidamente analisados.

A metodologia adotada considera as seguintes premissas:

VII. Análise apenas dos sinais de tensão;

VIII. Frequência de amostragem: 25 kHz por canal;

IX. Nº de amostras por ciclo: 417 amostras;

X. Ponto de disparo: amostra de nº 4.170.

Considerando as premissas acima relacionadas foram calculadas as amplitudes máximas de cada canal de tensão para as 4.000 primeiras amostras, tendo em vista que o disparo foi ajustado para a amostra de nº 4.170.

De posse do valor da amplitude máxima de cada sinal de tensão foram geradas amostras seqüenciais a partir da função senoidal (1).

$$Vi = Vmáx \cdot sen(w \cdot \Delta t \cdot k) \qquad (1)$$

Sendo:

Vi = Valor instantâneo da amostra de ordem i

$Vmáx$ = Tensão máxima entre 4.000 primeiras amostras

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$ (radiano)

Δt = Tempo de amostragem

k = Número da amostra de ordem i

Considerando que a frequência de amostragem é igual ao produto do número de amostras pela frequência da rede, a expressão acima se reduz à seguinte formulação:

$$Vi = Vmáx \cdot sen(2\pi \cdot k \div 417) \qquad (2)$$

Para enquadramento das amostras dos sinais de tensão às amostras geradas em (2) é necessário identificarmos a menor variação de quantidade de amostras, calculada a partir do primeiro ciclo positivo dos respectivos sinais até a última amostra do sinal.

Esse enquadramento entre os sinais de tensão e a função de geração de amostras é realizado através da diferença entre as amostras, considerando o deslocamento devido ao primeiro ciclo positivo que aparece no conjunto de amostras de cada sinal. Posteriormente, o conjunto de amostras enquadradas é dividido pelo valor da tensão máxima utilizada em (2).

Esse novo conjunto de amostras enquadradas é submetido a uma função de distribuição de freqüência, cujo resultado será utilizado como dado de entrada para a rede neural.

Pela análise da oscilografia dos sinais de tensão e de corrente, cada ocorrência selecionada para o estudo recebe uma classificação da causa primária que originou a falha transitória, conforme a seguir:

XI. Descarga atmosférica;
XII. Descarga disruptiva;
XIII. Queda de árvores;
XIV. Queda de galhos de árvores;
XV. Objeto sobre a rede;
XVI. Pipa presa à estrutura;
XVII. Pipa empinando;
XVIII. Poste/tirante abalroado;
XIX. Animais;
XX. Falha/defeito em outros componentes;
XXI. Falha/defeito em interruptores.

Convém ressaltar que, caso haja necessidade, outras causas poderão ser catalogadas, sendo necessário apenas o treinamento pela rede neural.

A título de exemplo a Tabela 1 apresenta a distribuição de frequência das amostras enquadradas para um evento classificado como "descarga disruptiva", que teve como conseqüência um curto-circuito fase-fase. Essa ocorrência foi classificada no sistema SGD da LIGHT como "causa fugitiva-reposição rápida automática".

Tabela 1. Distribuição de freqüência de uma descarga disruptiva.

Faixa de Variação da Tensão Enquadrada (p.u.)	Nº de Amostras Enquadradas do Sinal de Tensão por Faixa de Variação		
	Fase A	Fase B	Fase C
v ≤-0,5	57	10	10
(-0,5:-0,4]	368	172	539
(-0,4:-0,3]	255	501	208
(-0,3:-0,2]	97	170	136
(-0,2:-0,1]	130	94	478
(-0,1:0,0]	850	869	685
(0,0:0,1]	720	775	484
(0,1:0,2]	121	87	118
(0,2:0,3]	97	138	142
(0,3:0,4]	272	453	524
(0,4:0,5]	395	93	38
v ≥0,5	0	0	0

A Tabela 2 apresenta a distribuição de freqüência das amostras enquadradas para um evento classificado como "queda de árvores", que teve como conseqüência um curto-circuito fase-fase. Essa ocorrência foi classificada no sistema SGD da LIGHT como "queda de árvores".

Tabela 2. Distribuição de freqüência de uma queda de árvore.

Faixa de Variação da Tensão Enquadrada (p.u.)	Nº de Amostras Enquadradas do Sinal de Tensão por Faixa de Variação		
	Fase A	Fase B	Fase C
v ≤-0,5	0	0	0
(-0,5:-0,4]	75	42	0
(-0,4:-0,3]	469	545	0
(-0,3:-0,2]	297	258	0
(-0,2:-0,1]	329	408	372
(-0,1:0,0]	3096	2995	3995
(0,0:0,1]	2928	2838	3573
(0,1:0,2]	319	415	366
(0,2:0,3]	233	291	27
(0,3:0,4]	524	517	0
(0,4:0,5]	63	24	0
v ≥0,5	0	0	0

A distribuição das amostras enquadradas dos eventos também é utilizada para estimar a distância do local em que ocorreu a falha transitória. Essa estimativa considera apenas as distâncias referidas ao tronco principal, não levando em consideração as distâncias dos ramais.

Metodologia para Classificação do Tipo de Falta e da Localização da Falta no Sistema Elétrico

A metodologia desenvolvida a partir da análise dos sinais de tensão e de corrente identifica o tipo da falta, ou seja, se foi um curto-circuito fase-terra, entre duas fases ou trifásico, envolvendo terra ou não, bem como a fase envolvida no defeito.

Além disso, é identificado também o local no sistema elétrico onde ocorreu a falta, ou seja, se ocorreu na linha em medição, em uma linha adjacente ou em uma linha não adjacente, alimentada por outro transformador.

A metodologia para identificação do tipo de defeito baseia-se na comparação dos sinais de tensão e de corrente sob ponto de vista do local de medição, considerando os períodos de pré-falta, falta e pós-falta, tendo em vista que as variações dessas grandezas dependerão do tipo de falta e do local onde ocorreu a mesma.

O algoritmo calcula o valor RMS das grandezas para cada ½ ciclo, representado com 208 amostras, para uma janela de medição de 21 ciclos. Em seguida é calculado o valor relativo de cada ½ ciclo em relação ao valor RMS do primeiro ½ ciclo das grandezas.

A partir da obtenção desses valores é realizada uma comparação com as faixas de variação pré-fixadas para enquadramento às condições que determinarão o tipo de falta, bem como o local da falta no sistema elétrico.

No caso da tensão são atribuídas faixas de variação para condição de sobretensão, tensão operativa normal e subtensão. Para a corrente são atribuídas faixas de variação para condição de curto-circuito, sobrecarregamento, corrente operativa normal, subcarregamento e desligamento.

Essa metodologia foi desenvolvida, utilizado os recursos do programa "Excel" devendo ser incorporada ao software de análise de falha transitória.

Aplicação das Redes Neurais

A aplicação de uma rede neural artificial possibilita tratar a questão da falha transitória como um problema de reconhecimento de padrões. Através da classificação da informação de tensão, torna-se possível classificar e localizar uma falha na linha de distribuição utilizando-se as capacidades de generalização e abstração inerentes às redes neurais.

Foram desenvolvidas duas redes neurais: uma para a classificação e outra para a localização das falhas. As redes foram treinadas, utilizando-se os casos-teste produzidos na fase anterior, com o objetivo de se obter as matrizes de pesos sinápticos, que contêm todas as informações sobre as falhas catalogadas até o momento deste estudo. Após o término da fase de treinamento das redes neurais, essas matrizes de pesos são mantidas constantes e servem de entrada para as fases de classificação e localização de novos eventos.

Uma rede neural artificial pode ser vista como um processador distribuído, constituído de unidades simples de processamento, chamadas neurônios. Ela se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos [1,2]:

XXII. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem;

XXIII. Forças de conexão entre os neurônios, chamadas de pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

A rede neural utilizada neste trabalho foi a "feedforward", onde os neurônios são "perceptrons" e estão conectados e organizados em camadas. Os neurônios são ordenados e classificados de acordo com a topologia da rede. Foi utilizada apenas uma camada intermediária, conforme pode ser visto na Figura 18. Desta forma, a propagação da informação se dá da camada de entrada, passando pela camada intermediária, até chegar à camada de saída.

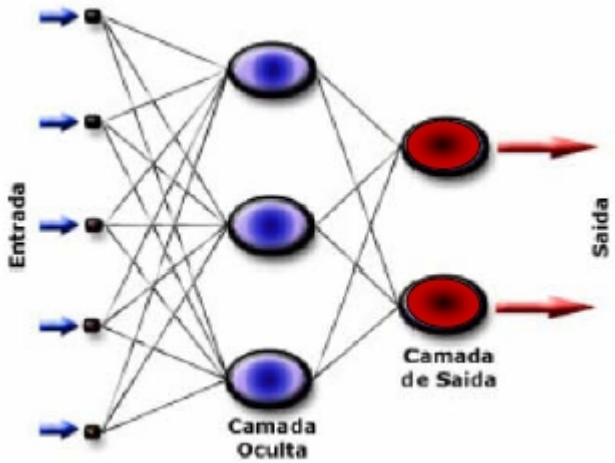

Figura 18. Rede neural feedforward multicamadas

O processo de aprendizagem é realizado através de um algoritmo de aprendizagem ou treinamento, que tem a função de modificar os pesos sinápticos da rede. Os algoritmos de treinamento são classificados como supervisionado, não-supervisionado e outros que são misturas desses dois tipos. Os algoritmos supervisionados são utilizados quando se possui prévio conhecimento sobre as classes a que pertence cada padrão da fase de treinamento.

Neste trabalho utilizou-se o mais famoso dos algoritmos supervisionados: o algoritmo de retropropagação ("backpropagation"). O algoritmo objetiva a minimização do somatório do erro quadrático entre todas as saídas obtidas pela rede e as entradas-alvo correspondentes, e, para isso, utiliza o método do gradiente descendente, com a regra delta generalizada [1,2] como técnica de busca. Os erros quadráticos calculados para a camada de saída e a camada intermediária são utilizados para se ajustar os pesos sinápticos, até que uma tolerância para o erro seja alcançada.

Os seguintes fatores são cruciais para um bom aprendizado [1]. Citamos cada um deles, apresentando os valores adotados neste trabalho:

XXIV. Taxa de aprendizado: também chamada de "tamanho do passo", é uma constante positiva utilizada na equação do ajuste de peso no algoritmo. Para o treinamento de classificação das falhas utilizou-se uma taxa de aprendizado de 0.3 e para o treinamento da localização das falhas utilizou-se uma taxa de aprendizado de 0.4;

XXV. Tipo de aprendizado: optou-se pelo aprendizado incremental, onde os eventos catalogados são apresentados à rede de forma aleatória a cada iteração. Isto confere uma natureza estocástica à busca e evita a parada prematura em mínimos locais;

XXVI. Função de ativação dos neurônios: também conhecida como função restritiva, porque restringe a amplitude de saída dos neurônios em um intervalo finito, tipicamente [0,1] ou [-1,1]. Estudos indicam que os perceptrons de múltiplas camadas, treinados com o algoritmo de retropropagação, em geral aprendem mais rápido (número de iterações necessárias à convergência) quando a função de ativação é anti-simétrica. Por isso utilizou-se a função de ativação sigmóide, que apresenta resultados limitados ao intervalo [0,1];

XXVII. Normalização dos dados de entrada: optou-se pela divisão pelo máximo valor, desta maneira os dados de entrada ficam também normalizados no intervalo [0,1];

XXVIII. Inicialização dos pesos: é também um fator importante para o bom aprendizado da rede. Adotaram-se pesos iniciais aleatórios dentro do intervalo (0.5,2);

XXIX. Topologia: para ambas as redes, a camada de entrada possui 36 neurônios: 12 intervalos de frequência para cada fase de tensão; ambas as redes possuem 22 neurônios na camada intermediária; a rede de classificação possui 8 neurônios na camada de saída, uma vez que havia 8 tipos de falhas catalogadas; já a rede de localização possui 5 neurônios na camada de saída, correspondendo a 5 intervalos de provável localização da falha, de acordo com o equipamento de medição: 0-1 km, 1-2 km, 2-3 km, 3-4 km, 4-5 km;

XXX. Critérios de parada: utilizaram-se dois critérios de parada: um principal e outro secundário. Principal: considera-se que o algoritmo de retropropagação convergiu quando a taxa absoluta de variação do erro quadrático médio por iteração for suficientemente pequena. Utilizou-se uma tolerância bem pequena para esta taxa: 10-3. Secundário: como optou-se por uma grande precisão para a taxa de erro, eventualmente esta taxa pode não ser alcançada, mas o erro já pode estar bem pequeno, tipicamente 10-2 nos exemplos testados. Por isso optou-se pelo critério secundário de número máximo de iterações igual a 155.000, também obtido experimentalmente;

XXXI. Momentum: de acordo com o método do gradiente descendente, a taxa de aprendizado não deve ser muito pequena, o que causa treinamento lento, nem muito grande, o que torna a rede oscilatória. Um método simples para contornar a instabilidade consiste na utilização de um termo de momentum na atualização dos pesos sinápticos. Para o treinamento de classificação das falhas utilizou-se um termo de momentum de 0.5 e para o treinamento da localização das falhas utilizou-se um termo de momentum de 0.9.

IV. Resultados Obtidos

Para o caso de classificação dos tipos das falhas foram treinados 28 eventos do sistema LIGHT envolvendo a LDA Menta e circuitos adjacentes. O erro de aprendizagem firmado em 10^{-3} foi alcançado com apenas 31.435 iterações, muito antes do total de iterações estipulados previamente como tolerância, comumente utilizado neste tipo de treinamento neural, e todos os eventos foram classificados corretamente, de acordo com os tipos-alvo fornecidos como entrada.

Para o caso de classificação das localizações das falhas foram treinados 10 eventos do sistema LIGHT, também envolvendo a LDA Menta e circuitos adjacentes. O erro de aprendizagem de 10^{-3} foi alcançado ainda mais precocemente, com apenas 1.949 iterações, e todos os eventos foram localizados corretamente, de acordo com as localizações-alvo fornecidas como entrada.

Vale ressaltar que o ideal é que houvesse mais casos para o treinamento, porém, o excelente resultado obtido em termos de precisão do erro quadrático alcançado versus o número de iterações necessárias, nos faz crer que a aplicação de redes neurais a este projeto é bastante adequada.

V. conclusões

Com os resultados obtidos através da aplicação das redes neurais artificiais, foi possível treinar todos os eventos de falhas transitórias catalogados até o momento, com um número bastante pequeno de iterações computacionais. Isso evidencia a adequabilidade da aplicação de redes neurais a este projeto, apesar do número pequeno de eventos treinados.

O equipamento de medição desenvolvido mostrou-se adequado para a captura de eventos transitórios e tem apresentado um comportamento robusto, com poucas interrupções. A informação disponibilizada em tempo real tem ajudado o planejamento das equipes de operação da concessionária, com impacto direto na melhoria dos serviços.

Finalmente, o baixo custo do equipamento torna viável a instalação de mais unidades nas subestações da concessionária, em uma escala de monitoramento mais abrangente.

VI. Referências Bibliográficas

[1] Haykin, S. – Neural Networks: A Comprehensive Foundation, McMillan College Publishing Co., 1998.

[2] Wasserman, P.D. – Neural Computing: Theory and Practice, Van Nostrand Reinhold, NY, 1989.

[3] R.B. Anderson and A.J. Eriksson, “Lightning parameters for engineering applications”, Electra, n°69, Mar 1980.
[4] CODI - ELETROBRÁS, Coleção Distribuição de Energia Elétrica, Volume 4, Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição, Edgard Blucher, 1982.
[5] CODI - Diretrizes e Critérios para a Manutenção Preventiva das Redes Aéreas de Distribuição, Relatório CODI-16.01.
[6] M. Darveniza and A.E. Vlastos, “The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard waveshapes - a theoretical basis”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, no 3, pp. 373-381, June 1988.
[7] Labrocini, J., “Modelo e Software Associado para Apoio à Gestão da Interrupção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
[8] Piantini, A; Bassi, W; Janiszewski, J.M., “A simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines”, Proc. Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED), Nice, June 1999, Session 2, Paper 2.18.
[9] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan and D. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, MCGraw-Hill, New York, NY, 1996.