

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas

ISSN 1413-2214

BT/PEA/0003

Relé Diferencial para
Transformador de Potência
Implementado com uma Rede MLP

Ricardo Caneloi dos Santos
Eduardo Cesar Senger

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Ricardo Caneloi dos Santos, sob orientação do Prof. Dr. Eduardo Cesar Senger: "Relé Diferencial para Transformador de Potência Implementado com uma Rede MLP", defendida em 01/02/99, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Ricardo Caneloi dos

Relé diferencial para transformador de potência implementado com uma rede MLP / R.C. dos Santos, E.C. Senger. — São Paulo : EPUSP, 2000.

16 p. — (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/0003)

1. Proteção diferencial 2. Relés digitais I. Senger, Eduardo Cesar II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 621.317
621.317

Relé Diferencial para Transformador de Potência Implementado com uma Rede MLP

Ricardo Caneloi dos Santos

Eduardo Cesar Senger

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Av. Prof. Luciano Gualberto, trav.3, nº 158 – São Paulo – SP – CEP: 05508-900

E-mail: ricardo@pcs.usp.br

Resumo

Este artigo apresenta as diversas etapas para a implementação de um relé diferencial percentual capaz de distinguir, de forma eficaz, entre defeito interno em um transformador de potência monofásico de suas demais condições operativas. O algoritmo do relé proposto é formado basicamente por dois blocos: o primeiro é responsável pelo pré-processamento das correntes provenientes dos TCs conectados nos lados de alta e baixa tensão do transformador; o segundo consiste em uma rede "multilayer perceptron" que, a partir dos valores fornecidos pelo pré-processamento digital das correntes, deve avaliar se o transformador encontra-se operando em condições normais ou com defeito interno.

Palavras-chave

Proteção diferencial, Relés digitais, Rede MLP.

1. INTRODUÇÃO

Em geral, os transformadores de potência possuem um alto custo de fabricação, instalação e manutenção, sendo, dessa forma, indispensável que os dispositivos de proteção do equipamento assegurem a sua integridade numa eventual situação de falha no sistema elétrico ou no próprio equipamento.

A seleção dos dispositivos de proteção do transformador deve ser criteriosa, pois se em número reduzido estes dispositivos podem não atuar para situações danosas ao transformador. Entretanto, um exagero no número de dispositivos de proteção, além de tornar a instalação onerosa, pode acarretar interrupções indevidas no sistema elétrico, reduzindo sua disponibilidade.

Os dispositivos de proteção do transformador devem ser dimensionados de forma a não atuarem para defeitos no sistema elétrico que não comprometam o equipamento, atuando somente nas situações que possam causar danos ao transformador. Dessa forma os dispositivos de proteção atuantes no sistema necessitam agir de forma seletiva e coordenada.

Este artigo dará ênfase ao estudo da Proteção Diferencial do Transformador (ANSI 87T), e tem como objetivo final avaliar a eficiência de um dispositivo de proteção diferencial implementado com uma Rede MLP.

No desenvolvimento do relé proposto, um dos passos de maior importância foi a modelagem digital de um transformador de potência. Esta modelagem possibilita simulações do transformador, tanto em operação normal, como em situações de curto-circuito para terra e curto-circuito entre espiras. Essas simulações tem como objetivo gerar condições semelhantes às condições reais de operação de um transformador com defeito, para o treinamento de uma rede neural artificial que deverá atuar como proteção diferencial.

2. PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

Dispositivos de proteção diferencial são instalados em transformadores com potência igual ou superior a 10 MVA [Horowitz-96]. O dispositivo de proteção diferencial deve ser sensível a defeitos internos ao transformador e indiferente a defeitos que ocorram no sistema elétrico ao redor do transformador.

O princípio de funcionamento da proteção diferencial é baseado na constante comparação entre a corrente primária e a corrente secundária do transformador. Em condições normais de operação, essas correntes devem ser inversamente proporcionais à relação de transformação do equipamento (a menos da corrente de magnetização do equipamento) [Caminha-77].

Uma diferença significativa entre a corrente primária e a corrente secundária (guardada a relação de transformação do equipamento) indica um defeito interno ao transformador e provoca a atuação da proteção

diferencial, isolando o equipamento do sistema elétrico através de um sinal de *trip* na bobina de desligamento dos disjuntores.

Na ocorrência de defeitos externos, apesar de maiores, as correntes primária e secundária do transformador ainda são iguais, mantendo inoperante a proteção diferencial do transformador.

O tipo de dispositivo descrito acima apresenta apenas a idéia básica da proteção diferencial, não sendo capaz, no entanto, de operar corretamente para todas as condições de operação de um transformador de potência. O próximo dispositivo a ser apresentado, denominado “Proteção Diferencial Percentual”, acrescenta novas características à proteção diferencial, viabilizando sua utilização em larga escala na proteção de transformadores.

2.1 Proteção Diferencial Percentual de Transformadores

Na realidade, mesmo para o transformador operando sem defeito interno, a corrente diferencial no relé não é nula. As possíveis causas dessa corrente diferencial são:

- 1-) A corrente de magnetização do transformador de potência;
- 2-) Os erros próprios dos transformadores de corrente instalados no primário e no secundário do transformador de potência;
- 3-) O não perfeito ajuste das relações de transformação dos transformadores de corrente;
- 4-) A possível ligação do transformador de potência em um *tap* diferente do nominal.

Todos os fatores citados acima, exceto o primeiro, causam no dispositivo de proteção uma corrente diferencial proporcional à corrente de carga do transformador de potência.

Dessa maneira, é necessário que o Relé Diferencial Percentual tolere uma certa corrente diferencial, atuando somente quando essa corrente exceder um valor percentual (pré-fixado) da corrente que circula pelos enrolamentos do transformador. Portanto, uma condição de atuação do Relé Diferencial Percentual é que $I_d > K \cdot I_r$.

A corrente diferencial I_d e a corrente de restrição I_r são definidas abaixo.

$$I_d = |I_p - I_s| \qquad I_r = \frac{|I_p| + |I_s|}{2}$$

onde:

I_p = Corrente no secundário do TC primário / I_s = Corrente no secundário do TC secundário

O coeficiente K é um parâmetro ajustável no relé e pode ser expresso em termos percentuais (10% a 40%). Esse parâmetro deve ser ajustado de forma que as situações 2, 3 e 4 descritas no início deste item não provoquem a atuação indevida da proteção.

O relé possui ainda uma corrente de *pick-up* (I_{pk}), ou seja, o dispositivo tolera uma pequena corrente diferencial, atuando apenas para valores acima dessa corrente. Este ajuste é devido à corrente de magnetização do transformador que está sempre presente (fator 1 citado acima) e não é proporcional à corrente de carga do transformador de potência.

Dessa forma, a condição de atuação do relé diferencial é alcançada quando as duas expressões abaixo forem satisfeitas.

$$I_d > K \cdot I_r$$

$$I_d > I_{pk}$$

A figura 1 ilustra graficamente essa situação



Figura 1 - Curva típica de um Relé Diferencial Percentual

Algumas situações, que não as de defeito interno no transformador de potência, causam corrente diferencial significativa o bastante para provocar a atuação indevida da proteção diferencial. O conhecimento dessas situações é essencial para que o engenheiro de proteção garanta a operação correta do relé.

As causas mais prováveis de corrente diferencial significativa sem defeito no transformador são:

- 1-) Corrente de *inrush* durante a energização do transformador de potência;
- 2-) Corrente de *inrush* após a remoção de um curto-circuito externo próximo ao transformador de potência;
- 3-) Sobre-excitação do transformador de potência;
- 4-) Saturação desigual dos TCs durante um curto-circuito externo próximo ao secundário do transformador.

As situações de *inrush* e sobre-excitação podem ser reconhecidas, respectivamente, através dos níveis de segunda e quinta harmônica presentes na corrente diferencial. Portanto, o relé diferencial normalmente opera com a filosofia de restrição de harmônicas, ou seja, através do conteúdo harmônico da corrente diferencial este deve ser capaz de distinguir uma situação de defeito interno do transformador das suas demais condições operativas.

3. RELÉ DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR UTILIZANDO UMA REDE MLP

A figura 2 apresenta o diagrama de blocos do relé digital proposto para a implementação da proteção diferencial percentual de transformadores e sua interligação com o pátio da subestação e a sala de controle.

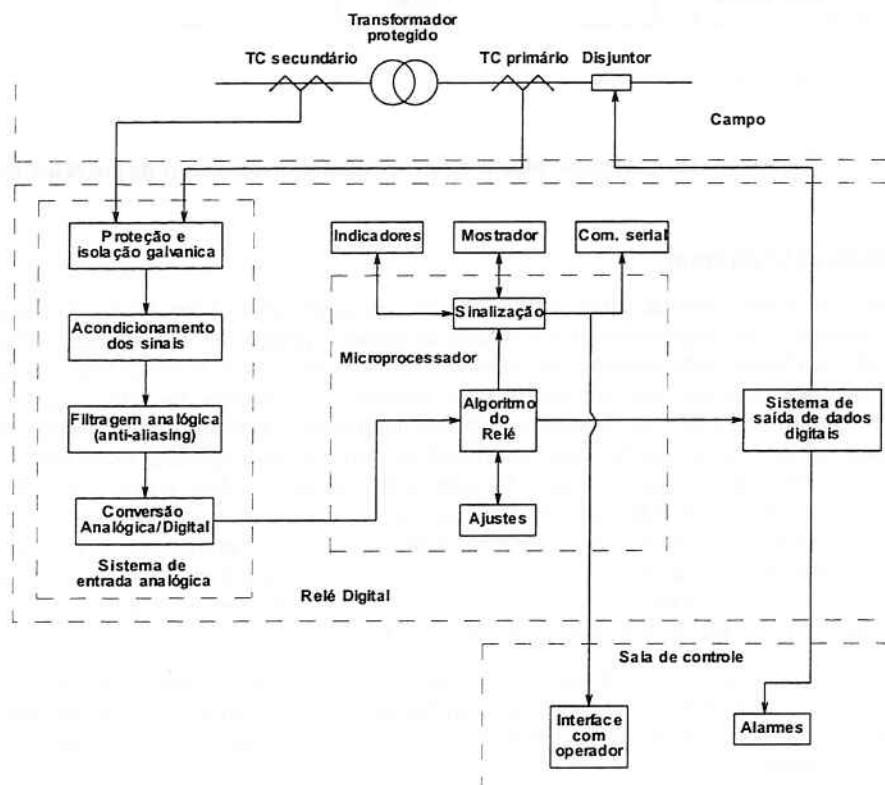


Figura 2 – Diagrama de blocos do relé digital e sua interligação com o pátio da subestação e a sala de controle

O hardware mostrado na figura acima é típico dos relés digitais. Para outras aplicações (relé de distância, sobrecorrente, etc) esse hardware praticamente não se altera (exceto pelo número de entradas e saídas que variam conforme a aplicação), sendo necessário alterar apenas seu algoritmo, pois cada aplicação requer um algoritmo diferente.

A seguir serão apresentadas as funções de cada bloco que compõe o relé digital apresentado na figura 2.

Sistema de entrada analógica – O sistema de entrada analógica possui as seguintes funções: a) Proteger o circuito eletrônico do relé das interferências eletromagnéticas conduzidas pelos cabos dos sinais; b) Realizar o acondicionamento dos sinais de entrada (o sinal de corrente proveniente dos TCs devem ser transformados em um sinal de tensão, normalmente, na faixa $-5V$ a $+5V$); c) Filtragem analógica passa baixa, necessária para evitar o erro de *aliasing*; d) Digitalização do sinal com resolução e frequência de amostragem convenientes.

Microprocessador – Neste bloco os sinais digitalizados das correntes provenientes dos TCs são aplicados ao algoritmo, cuja função é decidir sobre a saída do relé (*trip* ou não *trip*). Este bloco também é responsável pelas funções de autoteste, comunicação e sinalização, e ajustes do relé.

Sistema de saída de dados digitais – A função deste bloco é transformar o sinal de *trip* fornecido pelo microprocessador, normalmente em nível TTL, em um tipo de saída conveniente para a atuação do disjuntor (na quase totalidade dos casos uma saída a relé). Esse bloco também deve proteger o circuito eletrônico do relé de interferências eletromagnéticas conduzidas pelos cabos que interligam o relé ao disjuntor.

No relé diferencial percentual proposto, os sinais de corrente são processados de forma analógica e digital, conforme indicado na figura 3.

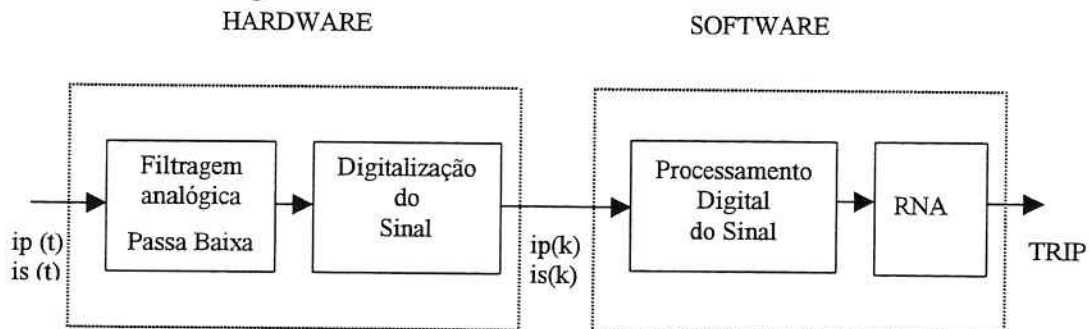


Figura 3 – Diagrama de blocos do processamento dos sinais de corrente no relé

3.1 Digitalização do sinal

No processo de digitalização do sinal, a resolução do conversor A/D e a frequência de amostragem adotada são os dois parâmetros mais importantes. Com relação ao primeiro parâmetro, conversores A/D com resolução de 12 a 16 bits são facilmente encontrados a um custo aceitável. Essa faixa de resolução garante um pequeno ruído de amostragem e uma boa precisão em toda a faixa dinâmica de operação do relé, o que torna a análise desse parâmetro desnecessária. Já com relação ao segundo parâmetro, a definição da frequência de amostragem a ser adotada depende de uma análise do sinal digitalizado no domínio da frequência. Dado que no algoritmo proposto utiliza-se até a quinta harmônica do sinal, a frequência de amostragem deve ser escolhida de forma que o erro de *aliasing*, introduzido pela digitalização do sinal, não deteriore a informação correspondente a essa harmônica. O efeito de *aliasing* pode ser observado com o auxílio da figura 3.1. Nos gráficos (a) e (b) é apresentado, a título de exemplo, um possível sinal analógico $i(t)$ e seu correspondente espectro em frequência $I(f)$, sendo que a máxima frequência presente nesse sinal é F_{max} . Amostrando-se o sinal $i(t)$ com uma frequência F_a ($1/T_a$) obtém-se o sinal de tempo discreto $i(kT_a)$ apresentado no gráfico (c).

É sabido da teoria de processamento digital de sinais [Orsini-91] que o espectro do sinal amostrado é formado pelo espectro do sinal original, denominado banda-base, e mais infinitas bandas secundárias formadas pela translação da banda-base de múltiplos inteiros da frequência de amostragem. O gráfico (d) ilustra o espectro $I_a(w)$ do sinal digitalizado.

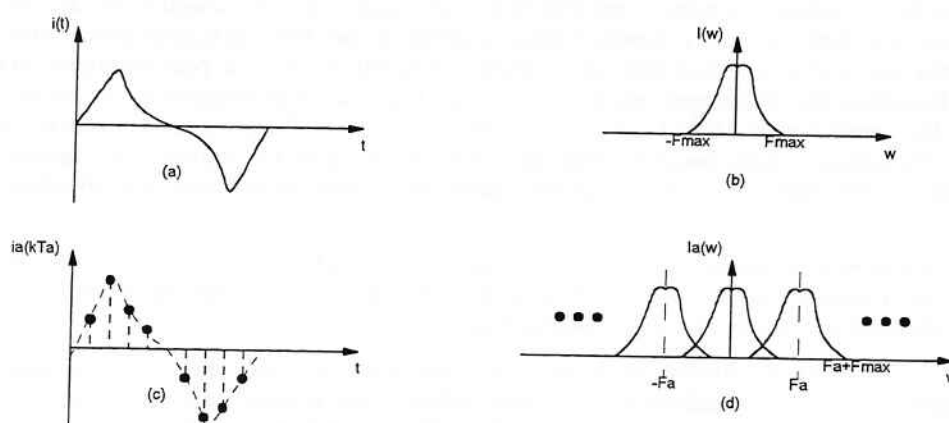


Figura 3.1 – Espectro de um sinal $i(t)$ sendo amostrado com uma frequência F_a

Caso a frequência de amostragem não seja suficientemente elevada, pode ocorrer a sobreposição da primeira banda secundária (centrada em F_a) com a banda-base. Esse fenômeno, conhecido como *aliasing*, pode comprometer a informação de algumas frequências da banda-base para as quais a sobreposição ocorre.

A figura 3.2 ilustra essa situação e permite determinar qual frequência (F_x) irá se sobrepor à quinta harmônica devido ao erro de *aliasing*, quando o sinal é amostrado com uma frequência F_a .

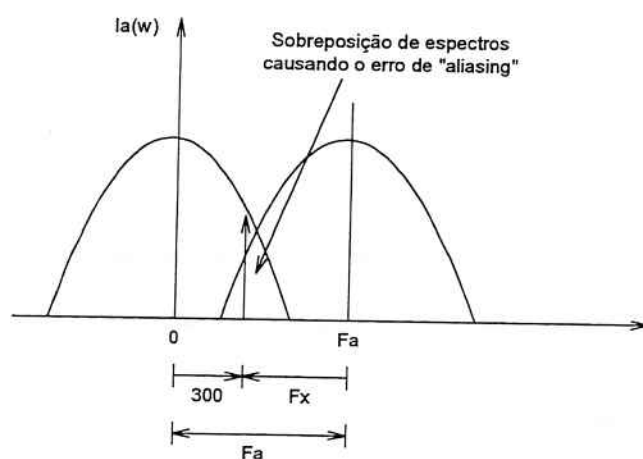


Figura 3.2 – Sobreposição dos espectros

Através da figura 3.2 elaborou-se a tabela 1, cuja função é auxiliar na determinação da frequência de amostragem conveniente para o algoritmo proposto.

N (número de amostras / ciclo)	F_a (Hz) (frequência de amostragem)	F_x (Hz) (frequência que se sobrepõe à 5ª harmônica – 300 Hz)
12	720	420 (7ª harmônica)
16	960	660 (11ª harmônica)
24	1440	1140 (19ª harmônica)

Tabela 1 – Frequência que se sobrepõe à 5ª harmônica em função da frequência de amostragem

Com relação à tabela 1, conclui-se que uma taxa de amostragem de doze amostras por ciclo não é adequada para o algoritmo proposto, pois demanda a implementação de um filtro analógico passa baixa de ordem muito elevada. Isto se deve à proximidade entre a frequência de 300 Hz (utilizada pelo algoritmo) e a frequência de 420 Hz (frequência que se sobrepõe aos 300 Hz). Já para uma taxa de amostragem de dezesseis amostras por ciclo (960 Hz), verifica-se na tabela 1 que a componente de 660 Hz se sobrepõe à componente de 300 Hz. Neste caso, um filtro analógico passa baixa de ordem não muito elevada pode ser utilizado para atenuar suficientemente a frequência indesejada (660 Hz) e não alterar o ganho das frequências utilizadas pelo algoritmo (60 Hz, 120 Hz e 300 Hz).

A utilização de uma taxa de amostragem de 24 amostras por ciclo (1440 Hz) é mais favorável do ponto de vista do filtro analógico (requer um filtro de pequena ordem para evitar o erro de *aliasing*), porém irá impor ao microprocessador uma maior carga computacional.

Uma vez que a taxa de amostragem de dezesseis amostras por ciclo já se mostrou viável para o projeto do filtro analógico, essa será a frequência de amostragem adotada, pois se comparada com a taxa de amostragem de 24 amostras por ciclo requer uma menor carga computacional do microprocessador.

O item 3.2 apresenta um filtro analógico denominado *anti-aliasing*, convenientemente projetado para ser utilizado com a frequência de amostragem de dezesseis amostras por ciclo.

3.2 Filtragem analógica do sinal

Um filtro passa baixa *Butterworth* de ordem cinco e frequência de corte 500 Hz foi utilizado para atenuar a 11ª harmônica e garantir que a quinta harmônica não seja comprometida devido ao erro de *aliasing*. A resposta em frequência do filtro analógico utilizado no relé é apresentada na figura 4.

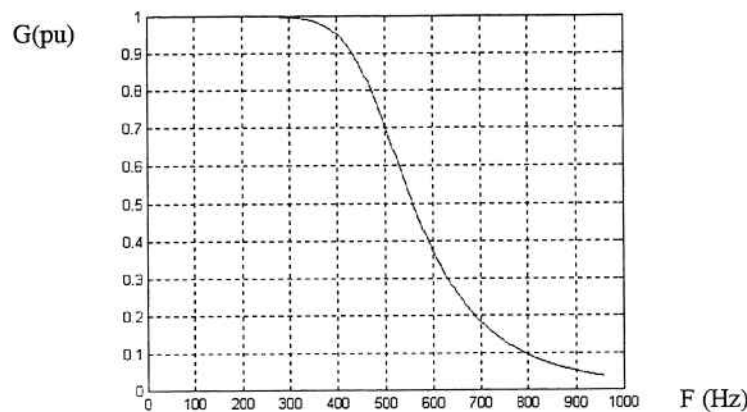


Figura 4 – Resposta em frequência do filtro passa baixa analógico

3.3 Processamento Digital do Sinal

Após os sinais das correntes primária e secundária do transformador serem filtradas analógicamente e amostradas com uma frequência de 960 Hz, elas são submetidas a um processamento digital que tem por objetivo básico extrair os indicadores que irão possibilitar ao relé decidir se existe ou não uma falta interna ao transformador protegido.

Tendo como objetivo treinar uma Rede Neural Artificial (RNA) para atuar como proteção diferencial de um transformador de potência, o vetor de entrada da RNA deve conter informações suficientes para diferenciar entre um transformador operando em condições normais e operando com defeito interno. Para formar o vetor de entrada da RNA serão utilizados os indicadores fornecidos pelo processamento digital dos sinais.

Conforme discutido no item 2, as relações abaixo possuem essas informações e, dessa forma, foram escolhidas como as entradas da RNA [Bastard-95] [Horowitz-96] [Piovesan-97].

$$\frac{|Id_1|}{|Ir_1|} \quad (3.1)$$

$$\frac{|Id_1|}{|Io|} \quad (3.2)$$

$$\frac{|Id_2|}{|Id_1|} \quad (3.3)$$

$$\frac{|Id_5|}{|Id_1|} \quad (3.4)$$

A expressão (3.1) corresponde à relação entre a componente fundamental (60 Hz) da corrente diferencial e a componente fundamental (60 Hz) da corrente de restrição.

A expressão (3.2) corresponde à relação entre a componente fundamental da corrente diferencial e a corrente de magnetização nominal do transformador.

A expressão (3.3) corresponde à relação entre a segunda harmônica (componente de 120 Hz) e a componente fundamental da corrente diferencial.

A expressão (3.4) corresponde à relação entre a quinta harmônica (componente de 300 Hz) e a componente fundamental da corrente diferencial.

As variáveis utilizadas para formar o vetor de entrada da RNA são obtidas através do processamento digital dos sinais das correntes provenientes dos TCs.

Os módulos das componentes fundamental ($|Id_1|$); segunda harmônica ($|Id_2|$) e quinta harmônica ($|Id_5|$) são calculados utilizando-se a técnica de Fourier, através das seguintes expressões:

$$Ia_k = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} id(n) \cdot \cos(k \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{N}); \quad k = 1, 2, 5$$

$$Ib_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} id(n) \cdot \sin(k \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{N}); \quad k = 1, 2, 5$$

$$|Id_k| = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(Iak^2 + Ib_k^2)}; \quad k = 1, 2, 5 \quad (3.5)$$

onde,

$N = 16$ (número de amostras por ciclo)

As entradas da RNA são definidas substituindo-se os valores de $|Id_k|$ (3.5) nas relações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4).

A resposta em frequência dos filtros digitais utilizados para extrair as componentes harmônicas da corrente diferencial são apresentadas sobrepostas à resposta em frequência do filtro analógico, uma vez que este deve atenuar a banda que interfere na frequência desejada (figuras 5, 6 e 7). O segundo gráfico de cada figura apresenta a resposta em frequência da associação (produto) do filtro analógico com filtro digital.

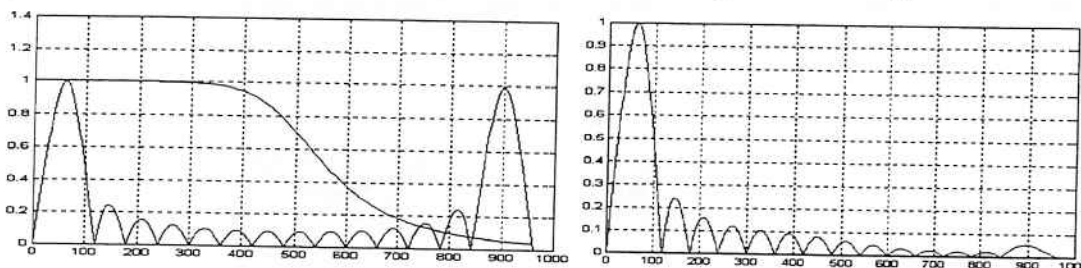


Figura 5 – Resposta em frequência do filtro digital e do filtro analógico - Resposta em frequência da associação dos filtros para a componente fundamental

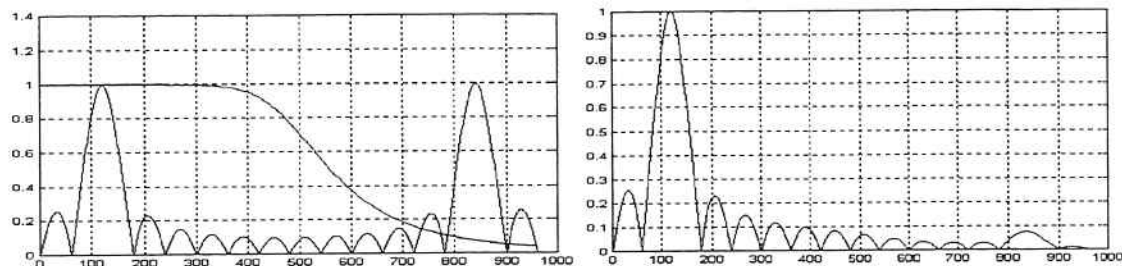


Figura 6 – Resposta em frequência do filtro digital e do filtro analógico - Resposta em frequência da associação dos filtros para a 2ª harmônica

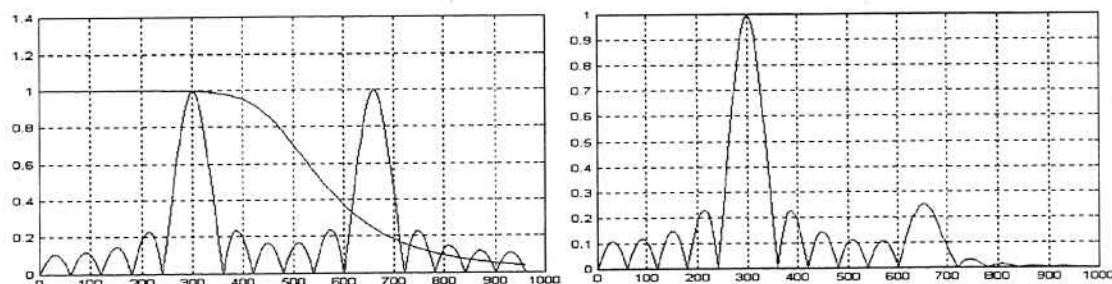


Figura 7 – Resposta em frequência do filtro digital e do filtro analógico - Resposta em frequência da associação dos filtros para a 5ª harmônica

3.4 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)

Atualmente, inúmeros trabalhos são publicados com a finalidade de validar a utilização de Técnicas de Inteligência Artificial em Sistemas Elétricos de Potência. As Redes Neurais Artificiais (RNA - denominada por alguns como uma subespecialidade da Inteligência Artificial) e suas aplicações em Sistemas Elétricos de Potência é sem dúvida um dos temas que vem chamando a atenção dos pesquisadores. Com o intuito de contribuir nessa área, procurou-se avaliar neste artigo o desempenho de uma RNA atuando como proteção diferencial de um transformador de potência.

Todos os passos necessários para a elaboração da RNA proposta neste artigo serão apresentados a seguir, porém, antes de iniciar essa apresentação, julga-se importante a abordagem de alguns conceitos básicos sobre Redes Neurais Artificiais.

Neurônio Biológico

Este é composto pelo corpo celular (*soma* – centro do processo metabólico da célula nervosa) e por extensões filamentosas, os *dendritos* e o *axônio*. A figura 8 apresenta o Neurônio Biológico.

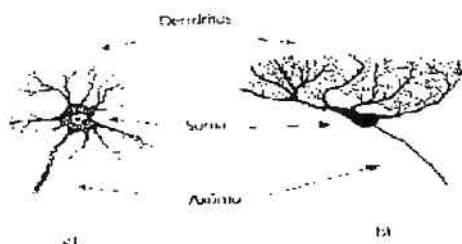


Figura 8 – Neurônio Biológico [Kovács-96]

Com alguma aproximação, pode-se dizer que os neurônios são interligados entre si formando extensa cadeia de neurônios (ou rede de neurônios). Estas interligações ocorrem através de uma conexão sináptica, que une o *axônio* de um neurônio a um dos *dendritos* de outro neurônio. Informações se manifestam nos primeiros *dendritos* da cadeia na forma de impulsos elétricos. Estes impulsos são enviados ao *soma* (que processa os

impulsos dos *dendritos* a si conectados e gera uma saída na forma de impulso elétrico de maior ou menor intensidade) que posteriormente os envia a outro *dendrito* através do seu *axônio*, e assim por diante. Dessa maneira, após o processamento dos impulsos de entrada por toda a cadeia de neurônios, o *axônio* na saída da cadeia possui uma informação para tomar uma decisão.

Rede Neural Artificial

Deve tomar decisões corretas diante de situações desconhecidas. Isto é possível através de um processo de treinamento da RNA (onde “ensina-se” a RNA o que fazer diante de determinadas situações) e posteriormente através de uma verificação de generalização da RNA (onde, através de situações desconhecidas, verifica-se se a RNA “aprendeu” o que fazer).

O treinamento (ou aprendizagem) da RNA é o processo automático de alteração dos seus pesos, visando ensinar a rede uma função de interesse. O treinamento pode ser feito basicamente de duas maneiras:

Treinamento supervisionado, onde aplica-se uma entrada à RNA e espera-se por uma saída conhecida. Caso a saída oferecida pela RNA, para uma determinada entrada (conhecida), não seja a saída esperada (conhecida), alteram-se os pesos da rede para sua correção. Este procedimento é repetido até que a saída oferecida pela rede seja a mesma que a saída esperada.

Treinamento não supervisionado, onde não há uma resposta conhecida para as informações fornecidas para rede. A RNA altera-se internamente para fazer a classificação dos dados de entrada.

O Perceptron

Este representa um neurônio da forma mais simples possível, ou seja, possui saída igual a um, se a soma ponderada de suas entradas for maior que um certo valor de referência, e saída igual a zero, caso contrário. A figura 9 apresenta o Perceptron.

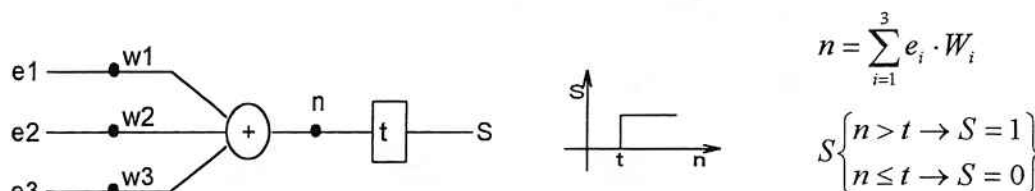


Figura 9 – Perceptron e a função de ativação degrau

Rede de Perceptron (MLP- MultiLayer Perceptron)

Este foi criado por Rosenblatt no final da década de 50. Um MLP é uma rede composta de neurônios dispostos em várias camadas. Os neurônios que recebem os sinais de entrada constituem a camada de entrada, enquanto que os neurônios na saída da rede constituem a camada de saída. Os neurônios que se encontram entre as camadas de entrada e saída constituem as camadas ocultas. A figura 10 apresenta uma rede MLP de três camadas.

Cada camada é composta por pesos (\$W\$), neurônios e valores de limiar (\$T\$). Para simplificar, na figura a seguir não foram representados todos os (\$W\$) e (\$T\$).

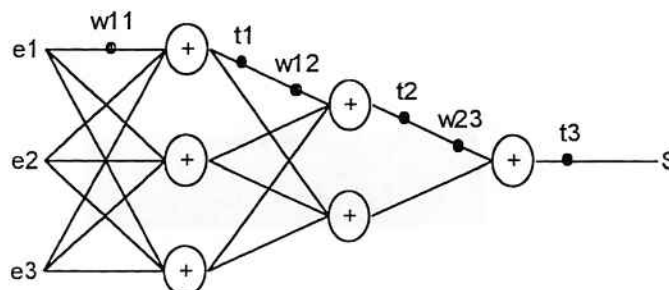


Figura 10 - MLP com 3 camadas

O Método *Backpropagation*

O algoritmo de *Backpropagation* foi desenvolvido para redes de neurônios de múltiplas camadas (MLP) resolvendo uma das limitações fundamentais para o treinamento de redes complexas [Kóvacs]. O objetivo desse algoritmo é determinar novos pesos (novo vetor W) para a RNA, visando reduzir o erro quadrático entre o par de vetores saída desejada / saída calculada.

Momentum

Este é uma implementação do método *Backpropagation* com taxa de aprendizado adaptativa, ou seja, a taxa de aprendizado varia de forma a tornar mais rápida a convergência da RNA.

3.5 Escolha da Arquitetura e treinamento da Rede MLP para a Implementação de uma Proteção Diferencial Percentual

A RNA escolhida para atuar como proteção diferencial é uma MLP (Multilayer Perceptron), uma vez que esta possui como uma de suas principais aplicações a classificação de dados, e esta é a função da proteção diferencial [Bastard-95].

Através de mudanças na arquitetura e nos parâmetros da rede, várias configurações de MLP foram testadas. Dentre as configurações de MLP que obtiveram sucesso no treinamento, optou-se pela configuração com arquitetura mais simples, pois dessa forma uma menor carga computacional é imposta ao microprocessador.

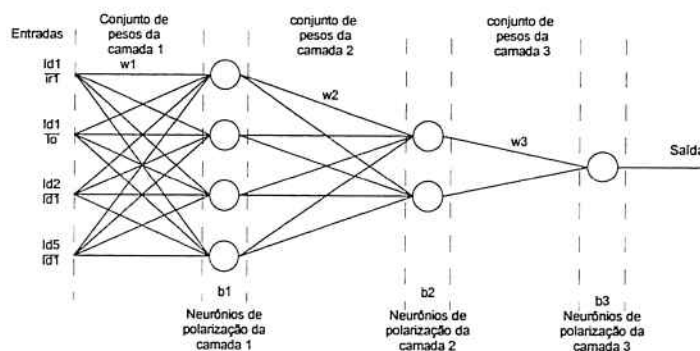


Fig 11 - Arquitetura da RNA utilizada

O processo de treinamento foi supervisionado e implementado com o algoritmo “momentum” (versão melhorada do algoritmo “backpropagation”). As entradas da rede foram normalizadas, uma vez que, após várias tentativas de treinamento esse procedimento se mostrou fundamental para a convergência da rede. A RNA foi implementada para efetuar 100000 iterações ou atingir um erro global de 0.1%. Esta atingiu o erro especificado antes do número máximo de iterações. A figura 11 apresenta a arquitetura da RNA utilizada. A figura 12 apresenta as curvas de “Erro” e “Variação da Taxa de Aprendizagem” para a convergência da RNA utilizada, em função do número de iterações.

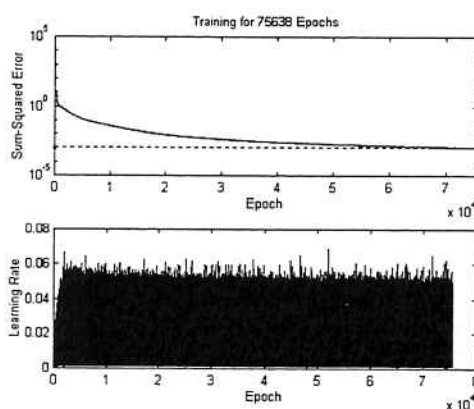


Figura 12 – Erro e Taxa de Aprendizagem da RNA utilizada

Para o treinamento da RNA foram geradas as seguintes situações de operação do transformador:

- 1-) Funcionando em regime sem defeito (81 casos)

- 2-) Iniciando funcionamento sem defeito (54 casos)
- 3-) Funcionando com erro no TC (27 casos)
- 4-) Funcionamento em regime com curto-circuito entre espiras (72 casos)
- 5-) Funcionamento em regime com curto-circuito para terra (72 casos)
- 6-) Iniciando funcionamento com curto-circuito entre espiras (72 casos)
- 7-) Iniciando funcionamento com curto-circuito para terra (72 casos)

As situações geradas acima totalizaram 450 vetores de treinamento. A elaboração desses vetores consiste na variação de alguns “caso base”. Cada “caso base” possui um número de espiras curto-circuitadas, a partir do qual, altera-se:

- a) A carga do transformador

Valores assumidos: 0 Ω , 15,5 Ω , 38,75 Ω , 116,25 Ω , 155 Ω , 193,75 Ω , 310 Ω , 500 Ω e $\infty \Omega$.

- b) A impedância do gerador

Valores assumidos: (0,05+6j) Ω e (1+12j) Ω

- c) O instante de energização do transformador

Valores assumidos: 450°, 510°, 540° e 720°

- d) A tensão do gerador

Valores assumidos: 179 kVp e 197 kVp

- e) A relação entre a resistência e a reatância do gerador

Valores assumidos (X/R): 120 e 40

Para cada “caso base” o número de espiras curto-circuitadas é:

- Curto-circuito para terra: 40, 110, 135 e 205
- Curto-circuito entre espiras: 5, 25, 50 e 95

4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Um dos passos de maior importância, no desenvolvimento do relé, foi a modelagem digital de um transformador de potência. Esta modelagem possibilita simulações do transformador, tanto em operação normal, como em situações de curto-circuito para terra e curto-circuito entre espiras. Essas simulações tem como objetivo gerar condições semelhantes às condições reais de operação de um transformador com defeito, para o treinamento de uma rede neural artificial que deverá atuar como proteção diferencial.

O ATP (versão para PC do EMTP) é uma ferramenta consagrada no estudo de transitórios em sistemas elétricos de potência. Sua utilização neste trabalho se deve ao fato da não disponibilidade de um transformador de potência real, com derivações ao longo dos seus enrolamentos, que possibilitasse a geração de curto-circuitos internos ao transformador.

Dessa maneira, implementou-se de forma digital (através do ATP) um transformador monofásico que permite a aquisição das suas correntes primária e secundária, tanto em operação normal como em situações de defeito (curto-circuito para terra e entre espiras). O transformador simulado possui os seguintes dados de placa: relação de tensão de 127 kV / 88 kV; 50 MVA.

4.1 Modelagem do Transformador sem Defeito Interno

A modelagem do transformador sem defeito interno permite as seguintes simulações: energização do transformador; operação do transformador em regime; curto-circuito externo ao transformador; operação do transformador com erro no TC. Para modelagem do transformador sem defeito interno é necessário utilizar basicamente as rotinas BCTRAN e SATURA do ATP. A rotina BCTRAN emite, a partir dos ensaios de curto-circuito e excitação do transformador, as matrizes $[R]$ e $[wL]$ representativas do transformador, conforme apresentado a seguir [Silva-92].

$$[wL] = w \cdot \begin{bmatrix} L1 & M12 \\ M21 & L2 \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R1 & 0 \\ 0 & R2 \end{bmatrix}$$

Já a rotina SATURA, representa as não linearidades do núcleo do transformador de potência (elemento 98 do ATP), possibilitando, dessa forma, a simulação de eventos como a corrente de *inrush*. A figura 13 apresenta o resultado da simulação do transformador a partir da sua matriz representativa e do elemento 98 do ATP.

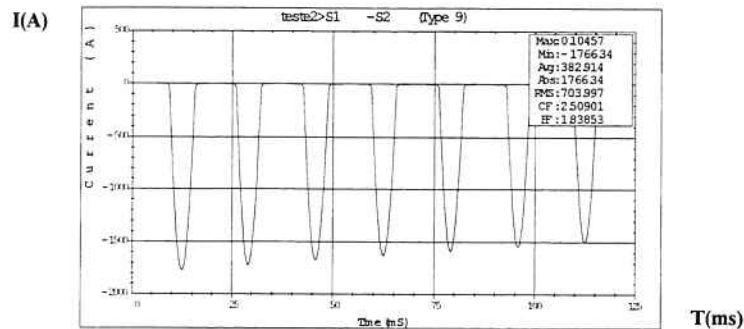
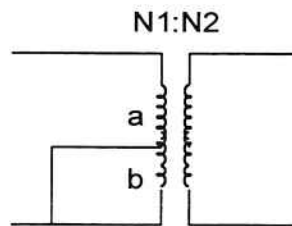


Figura 13 - Corrente no primário com o elemento 98 anexado (corrente de *inrush*)

4.2 Simulação de Curto-Circuito para Terra

Para a simulação de curto-circuito para terra no enrolamento primário do transformador, deve-se dividir o enrolamento com defeito em duas sub-bobinas (sub-bobina *a* e sub-bobina *b*), que determinam a posição do curto-circuito no enrolamento, conforme figura 14. Essa divisão do enrolamento primário gera uma nova matriz $[R]$ e uma nova matriz $[wL]$ que representam o transformador com defeito. A metodologia para a determinação dos novos elementos dessas matrizes é apresentada por [Bastard-94].



$$[wL] = w \cdot \begin{bmatrix} La & Mab & Ma2 \\ Mab & Lb & Mb2 \\ Ma2 & Mb2 & L2 \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} Ra & 0 & 0 \\ 0 & Rb & 0 \\ 0 & 0 & R2 \end{bmatrix}$$

Figura 14 –Transformador com defeito para terra e as novas matrizes $[R]$ e $[wL]$

4.3 Simulação de Curto-Circuito entre Espiras

A simulação de curto-circuito entre espiras requer a divisão do enrolamento primário do transformador em três sub-bobinas, denominadas sub-bobinas *a*, *b* e *c*, conforme ilustra a figura 15. Em consequência da divisão do enrolamento primário em três sub-bobinas, as matrizes $[R]$ e $[wL]$ representativas do transformador passam a ser matrizes 4×4 . A metodologia para a determinação dos novos elementos dessas matrizes é apresentada por [Bastard-94].

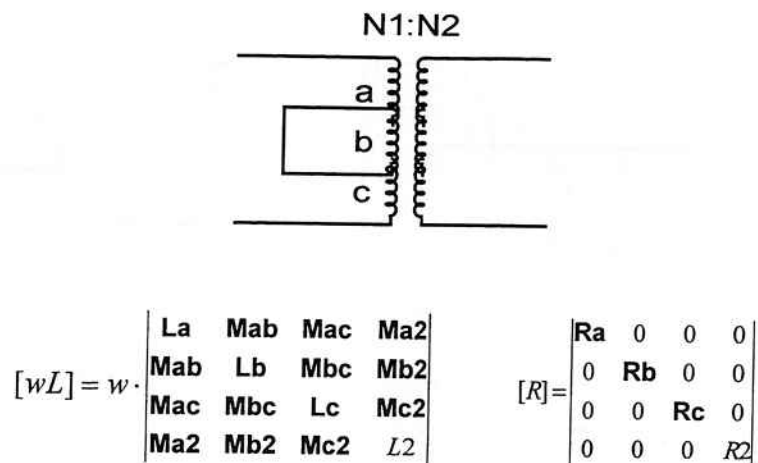


Figura 15 – Transformador com defeito entre espiras e as novas matrizes $[R]$ e $[wL]$

Através das simulações das várias condições operativas do transformador, foram gerados 450 casos diferentes de operação para o treinamento da rede MLP, e mais 136 casos para avaliar a rede diante de situações que não fizeram parte do seu processo de treinamento. Todos estes casos (arquivos de saída do ATP) foram aplicados a uma rotina (elaborada no MATLAB) que extrai o conteúdo harmônico da corrente diferencial, formando as relações que servem de entrada da rede MLP, conforme discutido nos itens anteriores (3.1, 3.2 e 3.3).

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir será apresentado o comportamento da rede MLP diante de situações que não fizeram parte do seu processo de treinamento (Teste de Generalização), sendo possível, dessa forma, avaliar a eficiência da rede como Relé Diferencial do transformador.

As figuras (16) a (21) mostram o resposta da RNA para algumas das diversas situações operativas simuladas. O primeiro gráfico nessas figuras apresenta as correntes primária e secundária nos secundários dos TC's e a saída da RNA (sinal de *trip* do Relé Diferencial). Já o segundo gráfico, mostra os sinais utilizados como entrada para a rede (expressões (3.1) a (3.4)) e novamente a saída da RNA (sinal de *trip*). Os casos mostrados nessas figuras não foram utilizados no processo de treinamento da rede e, como pode ser observado, em todos os casos a rede respondeu corretamente.

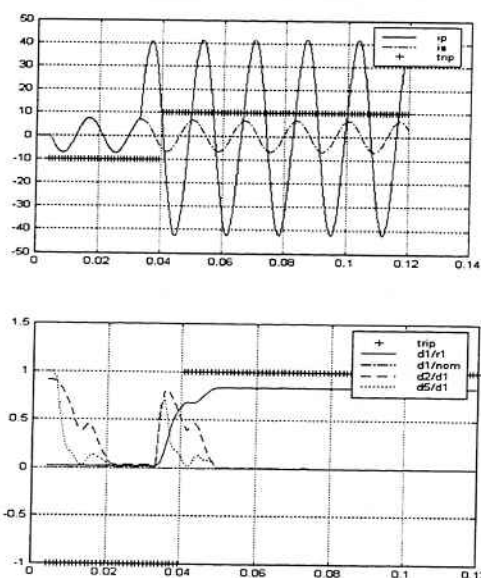


Fig. (16) Funcionando em regime com curto-circuito para a terra

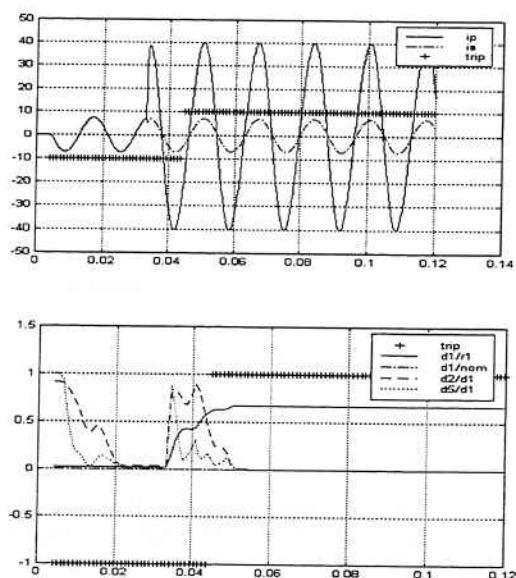


Fig.(17) Funcionamento em regime com curto-circuito entre espiras.

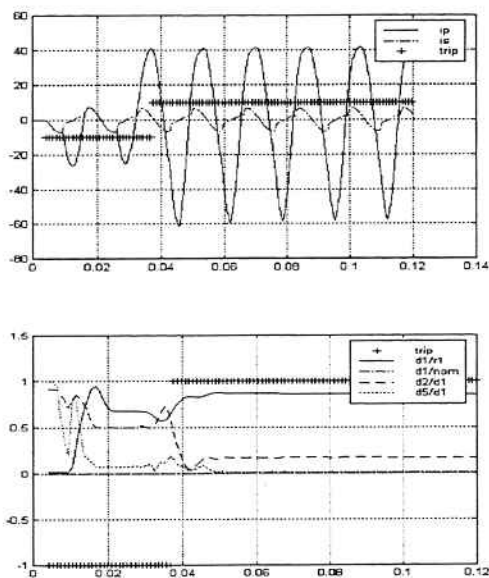


Fig.(18) Inicializando funcionamento com curto-circuito para a terra.

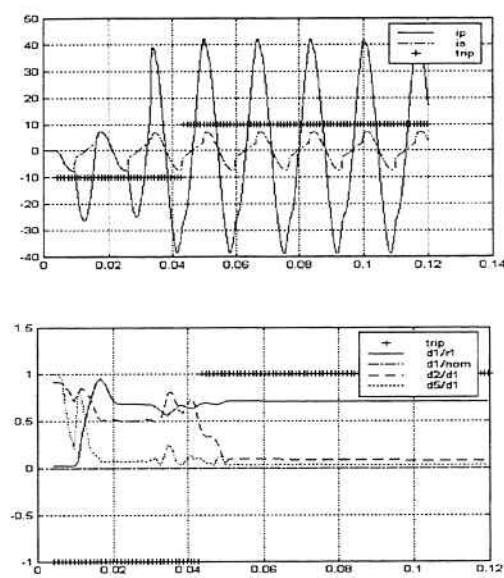


Fig.(19) Inicializando funcionamento com curto-circuito entre espiras.

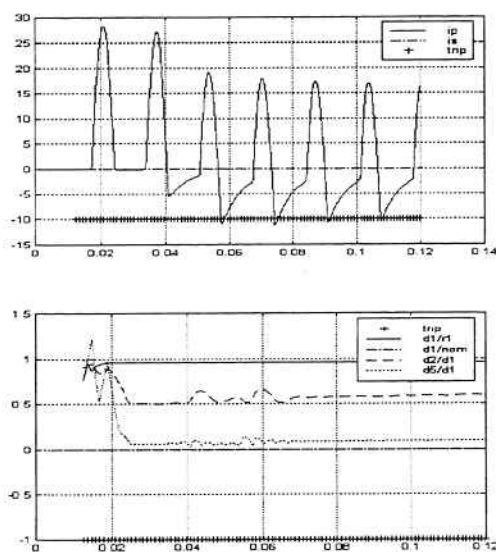


Fig.(20) Inicializando funcionamento sem defeito

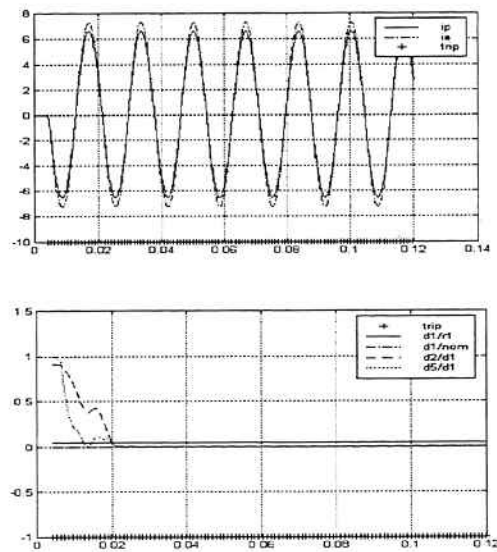


Fig. (21) Funcionamento com erro no TC primário (15%).

5.1 Análise dos Resultados

Neste trabalho foi proposta uma RNA para a implementação de uma proteção diferencial de transformadores de potência. A conclusão apresentada a seguir baseia-se na análise da saída emitida pelo relé para cada uma das diversas condições operativas do transformador.

Este item apresenta uma análise do comportamento da rede MLP diante das várias condições operativas do transformador de potência (figuras 16 a 21).

Funcionando em regime com curto-circuito para terra (24 casos – Figura 16): Esta simulação implica em curto-circuitar para a terra o enrolamento primário do transformador, quando este opera em regime. Diante de todos os casos o relé atuou instantes após o defeito.

Funcionando em regime com curto-circuito entre espiras (24 casos – Figura 17): Nesta situação aplica-se um curto-circuito entre espiras no enrolamento primário do transformador operando em regime. Conforme o esperado, o relé atua instantes após o defeito.

Iniciando funcionamento com curto-circuito para terra (24 casos – Figura 18): Esta situação simula um defeito para terra no enrolamento primário do transformador durante o transitório de *inrush*. Nesta simulação o relé permaneceu bloqueado enquanto havia componente de restrição na corrente diferencial (antes do defeito). Porém, após o defeito, a corrente diferencial sem componente de restrição proporcionou a atuação do relé. Em todos os casos o relé reconheceu o defeito e atuou instantes depois.

Iniciando funcionamento com curto-circuito entre espiras (24 casos – Figura 19): Esta situação simula um defeito entre espiras no enrolamento primário do transformador durante o transitório de *inrush*. Diante desta situação o relé permaneceu bloqueado enquanto havia componente de restrição na corrente diferencial (antes do defeito). Porém, após o defeito, a corrente diferencial sem componente de restrição proporcionou a atuação do relé. Em todos os casos o relé reconheceu o defeito e atuou instantes depois.

Iniciando funcionamento sem defeito (20 casos – Figura 20): Diante das 20 situações dessa natureza aplicadas ao relé, este manteve-se bloqueado, como esperado. O bloqueio do relé, nesse caso, é consequência da RNA ter reconhecido no conteúdo harmônico da corrente diferencial (que é elevada) uma situação de energização do transformador e não de defeito interno.

Funcionando em regime com erro no TC (20 casos – Figura 21): Neste caso, apesar de haver uma pequena corrente diferencial sem componente de restrição, o relé manteve-se bloqueado, configurando-se como uma proteção diferencial percentual. Sendo esta a resposta esperada, o relé respondeu corretamente para os 20 casos.

Considerando o exposto acima (respostas às várias situações de operação do transformador), conclui-se que houve um acerto de 100% nas respostas emitidas pelo relé para as 136 situações de operação do transformador. Dessa forma, comprova-se a eficiência do algoritmo baseado em RNA proposto neste trabalho; quanto ao acerto nas respostas emitidas para as diversas situações simuladas e quanto ao tempo de atuação do relé em caso de defeito interno ao transformador.

6. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo unir as vantagens oferecidas pelo processamento de sinais, existentes nos relés digitais, com uma das técnicas de Inteligência Artificial de maior destaque na atualidade, as Redes Neurais Artificiais.

Além do projeto e avaliação de um relé diferencial baseado em RNA este artigo teve o intuito de apresentar as diversas etapas necessárias para o desenvolvimento de um relé digital (projeto do filtro analógico, projeto do filtro digital e determinação do conversor A/D), fornecendo uma introdução teórica para outros trabalhos que venham a ser desenvolvidos na área de proteção digital de transformadores.

Com relação ao algoritmo baseado em Redes Neurais Artificiais, aqui desenvolvido, é possível concluir que esta é realmente uma linha de pesquisa promissora para a implementação prática de relés diferenciais. Esta afirmação é respaldada pelo bom desempenho do relé proposto neste artigo, diante das diversas condições operativas de um transformador de potência.

BIBLIOGRAFIA

- [BASTARD-94] BASTARD, P.; BERTRAND, P.; MEUNIER M. "A Transformer Model For Winding Fault Studies". *IEEE Transaction on Power Delivery*, v.9, n.2, p.690-699, Apr. 1994.
- [BASTARD-95] BASTARD, P.; MEUNIER M.; RÉGAL, H. "Neural Network-Based Algorithm for Power Transformer Differential". *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, v.142, n.4, p.386-392, Jul. 1995.
- [CAMINHA-77] CAMINHA, A.C. *Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Itajubá, Minas Gerais, Edgar Blücher, 1977 (Escola Federal de Engenharia de Itajubá).

- [CROSSLEY-98] CROSSLEY, P.A.; LI, H.Y.; PARKER A.D. "Design and Evaluation of a Circulating Differential Relay Test System". **IEEE Transaction on Power Delivery**, v.13, n.2, p.427-433, Apr. 1998.
- [HERMANTO-91] HERMANTO, I.; MURTY, Y.V.V.S.; RAHMAN M.A. "A Stand-Alone Digital Protective Relay for Power Transformers". **IEEE Transaction on Power Delivery**, v.6, n.1, p.85-95, Jan. 1991.
- [HOROWITZ-96] HOROWITZ, S.H.; PHADKE, A.G. **Power System Relaying**. 2.ed., England, Research Studies Press, 1996
- [KASZTENNY-98] KASZTENNY, B.; KEZUNOVIC, M. "Digital Relays Improve Protection of Large Transformers". **IEEE Computer Applications in Power**, p.39-45, Oct. 1998.
- [KOVÁCS-96] KOVÁCS, Z.L. **Redes Neurais Artificiais. Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, Edição Acadêmica, 1996 (Universidade de São Paulo).
- [ORSINI-91] ORSINI, L.Q. **Curso de Circuitos Elétricos**. São Paulo, Edgar Blücher, Vol. 2, Edição Preliminar, 1991.
- [PEI-92] PEI, L. et al. "Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults". **IEEE Transaction on Power Delivery**, v.7, n.4, p.1912-1919, Oct. 1992.
- [PIOVESAN-97] PIOVESAN, L.S. **Avaliação de Algoritmos para Proteção Diferencial de Transformadores de Potência**. São Paulo, 1997. 112p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [RAHMAN-98] RAHMAN, M.A.; ZAMAN, M.R.; HOQUE, M.A. "Testing of Algorithms for a Stand-Alone Digital Relay for Power Transformers". **IEEE Transaction on Power Delivery**, v.13, n.2, p.374-385, Apr. 1998.
- [SILVA-92] SILVA, I.P. **Modelagem de Transformadores para Estudos de Transitórios no EMTP**. São Paulo, 1992. 76p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abridadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usando Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI
- BT/PEA/9603 - Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - ALBERTO BIANCHI JUNIOR, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9604 - Um Sistema de Controle de Velocidade para Motor de Indução Trifásico - CELSO KAZUMI NAKAHARADA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9605 - Controle Vetorial de Motores de Indução, Independente das Alterações de Parâmetros da Máquina - NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR, WALDIR PÓ
- BT/PEA/9606 - Compactação de Subestações de 145 kV Através da Redução das Distâncias entre Fases - GERVASIO LUIZ DE CASTRO NETO, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9607 - Curvas de Carga de Consumidores Industriais - Agregação com Outras Cargas - RONALDO PEDRO CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9608 - Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais Medidas para Determinação de Diversidade de Carga, e Carregamento de Transformadores de Distribuição - EDUARDO LUIZ FERRARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9609 - Comportamento Elétrico de Cabos Cobertos e Pré-Reunidos pelo Método dos Elementos Finitos - JOÃO JOSÉ DOS SANTOS OLIVEIRA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9701 - Repotenciação de Hidrogeradores: Uma Proposta de Metodologia de Análise e Implantação - FÁBIO SALOMÃO FERNANDES SÁ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.

- BT/PEA/9702 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação para um Sistema de Automação para um Centro de Operação da Distribuição - PAULO SÉRGIO MIGUEL SURUR, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9703 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística - MARIÂNGELA DE CARVALHO BOVOLATO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9704 - Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SALETE MARIA FRÖES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9705 - Aproveitamento Funcional de Sistemas de Controle e Proteção Digitais em Subestações de Distribuição - JOSÉ LUIZ PEREIRA BRITTES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9706 - Avaliação de Algoritmo para Proteção Diferencial de Transformadores - LUÍS SÉRGIO PIOVESAN, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9707 - Sistema de Proteção para Falhas de Alta Impedância - CAIUS VINICIUS SAMPAIO MALAGODI, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9708 - Um Ambiente para Planejamento da Operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - KLEBER HASHIMOTO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9709 - Análise do Custo - Benefício da Instalação de Equipamentos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição - ANTONIO CLAUDINEI SIMÕES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9710 - Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR - para o Setor Elétrico - MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9711 - Análise de Defeitos no Motor de Indução Trifásico para Predição de Falhas Incipientes - JOSÉ ANTONIO URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9712 - Gerenciamento de Transformadores de Distribuição com Análise na Perda de Vida - CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN, VLADIMIR DUARTE BELCHIOR
- BT/PEA/9713 - Uma Nova Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferrovários - JOSÉ AUGUSTO PEREIRA DA SILVA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9714 - Um Exemplo de Decomposição de Fluxos em Transformadores - NICOLAU IVANOV, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9715 - Custos de Transporte de Energia Elétrica - Análise de Metodologias - DÁRIO TAKAHATA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9716 - Bancada de Ensaios para a Avaliar o Comportamento de Acionamentos Controlados por Inversores PWM - JOSÉ ANTONIO CORTEZ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9717 - Integração de Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos ao Sistema de Gerenciamento da Manutenção Industrial - JOSÉ A. URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9801 - Análise de Confiabilidade para Gerenciamento Operacional de Sistemas Automatizados de Pesagem Rodo-Ferroviária - RUBENS LOPES ROLIM, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9802 - Projeto de um Ondulador Híbrido e Estudo de Onduladores Derivados de Solenóide, para Utilização em Laser a Elétrons Livres - FRANCISCO SIRCILLI NETO
- BT/PEA/9803 - Configuração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Múltiplos Objetivos e Incertezas através de Procedimentos Heurísticos - CARLOS C. BARIONI DE OLIVEIRA, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9804 - Conceituação e Aplicação de Metodologia de Gerenciamento pelo Lado da Demanda em uma Empresa Distribuidora de Energia Elétrica - FERNANDO MONTEIRO DE FIGUEIREDO, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9805 - Acoplamento Circuito Elétrico - Método dos Elementos Finitos em Regime Transitório Utilizando a Metodologia de Dommel - NANCY MIEKO ABE, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9806 - Modelo de Arco Elétrico Aplicado ao Estudo da Interrupção da Corrente em Disjuntores de Média Tensão - LUCILIO CARLOS PINTO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9807 - Proteção para Falta de Alta Impedância Utilizando o Sistema de Rádio Troncalizado - MARCO ANTONIO BRITO, EDUARDO CESAR SENER
- BT/PEA/9808 - Contribuição ao Estudo e Projeto dos Motores Síncronos de Relutância - IVAN EDUARDO CHABU, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9809 - Cabos Cobertos: Metodologia para a Determinação da Espessura da Cobertura - ANTONIO PAULO DA CUNHA, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9810 - Eletrificação Rural - Avaliações em São Paulo - MARCELO APARECIDO PELEGRINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9811 - Política de Eletrificação Rural em São Paulo - LUIZ HENRIQUE ALVES PAZZINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9812 - Uso Racional e Eficiente de Energia Elétrica: Metodologia para a Determinação dos Potenciais de Conservação dos Usos Finais em Instalações de Ensino e Similares - ANDRÉ LUIZ MONTEIRO ALVAREZ, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/9813 - Diretrizes para a Regulação da Distribuição de Energia Elétrica - JAMES S. S. CORREIA, LINEU BELICO DOS REIS

- BT/PEA/9814 - Distribuição da Tensão de Impulso em Enrolamentos de Transformadores de Distribuição - PEDRO LUÍS SANTUCCI DE MENDONÇA, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/9815 - Estudo Comparativo entre os Diversos Métodos de Determinação do Rendimento de Motores de Indução - FRANCISCO ANTONIO MARINO SALOTTI, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9816 - A Nodal Analysis Approach Applied to Electric Circuits Coupling in Magnetodynamic 2D FEM - MAURÍCIO CALDORA COSTA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9817 - Informatização e Automação dos Órgãos Gestores de Mão de Obra - EDUARDO MARIO DIAS, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9818 - Frequência de Ocorrência de Sobretensões Originárias de Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição - NELSON MASSAKAZU MATSUO, LUIZ CERA ZANETA JR.
- BT/PEA/9819 - Um Método de Imposição de Pólos no Estudo da Estabilidade de Redes Elétricas a Pequenas Perturbações - PERCIVAL BUENO DE ARAUJO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9820 - Inter-Relação do Planejamento Agregado de Investimentos com o Planejamento Localizado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - JUCEMAR SALVADOR SIMÕES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9821 - A Produção de Energia Através das Células de Combustível - JOSÉ LUIZ PIMENTA PINHEIRO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9822 - Automação de Processos - Revisão e Tendências - SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9823 - Metodologia para Seleção e Gerenciamento de Transformadores e Distribuição, Aplicando Técnicas de Redes Neutrais Artificiais - SE UN AHN, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9901 - Contribuição ao Modelamento e Simulação de Motores em Ímãs Permanentes e Comutação Eletrônica de Alta Rotação - WANDERLEI MARINHO DA SILVA, CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/9902 - Estudos de Sistemas de Potência e Automação: Plantas Industriais de Grande Porte - MAURÍCIO G. M. JARDINI, JOSÉ A. JARDINI
- BT/PEA/9903 - Synchronous Machines Parameters Identification Using Load Rejection Test Data - E. C. BORTONI, J. A. JARDINI
- BT/PEA/9904 - Identificação de Locais e Opções Tecnológicas para Implantação de Termoeletricas no Sistema Elétrico Brasileiro: Contribuição ao Estado da Arte e Aplicação ao Caso do Gás Natural - ELIANA APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9905 - Sistema de Manutenção Preventiva de Subestações: Uma Abordagem Semântica para o Monitoramento Integrado - ELIAS ROMA NETO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9906 - Previsão das Perdas Magnéticas na Presença de Harmônicos - MARCELO S. LANCAROTTE, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9907 - Comportamento do Aterramento de Sistemas e Equipamentos de Distribuição sob Impulso - CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9908 - Modelo de Sistema de Supervisão e Controle Operacional de Terminais de Contêineres - LEVI SALVI, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/9909 - Medição de Altas Correntes em Frequência Industrial: Instrumentação, Dispositivos de Medição e Calibrações - HÉLIO EIJI SUETA, GERALDO FRANCISCO BURANI
- BT/PEA/9910 - Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão - WILSON KOMATSU, WALTER KAISER
- BT/PEA/9911 - Análise de Desempenho de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência pelo Método dos Elementos Finitos - ANGELO PASSARO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/9912 - Simulação de Motores "Shaded Pole": Uma Nova Abordagem Analítico-Numérica - PASCHOAL SPINA NETO, SILVIO IKUO NABETA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9913 - Estimadores de Estado para Sistemas de Potência: Análise do Estado da Arte - CLEBER ROBERTO GUIRELLI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9914 - Análise sobre o Comportamento de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas Utilizando o Método dos Elementos Finitos - SEBASTIÃO C. GUIMARÃES JR., LUCIANO MARTINS NETO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9915 - Automatização do Atendimento a Reclamações de Interrupção de Energia Elétrica - H. K. Kiyohara, L. C. Magrini, E. P. PARENTE, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9916 - Controle Digital de Tensão e Reativos - PAULA S. D. KAYANO, LUIZ CARLOS MAGRINI, LINEU BELICO DOS REIS, ANTONIO JOSÉ GOMES CARMO, ELIAS DE SOUZA NETO
- BT/PEA/9917 - Localizadores Digitais de Falhas em Linhas de Transmissão - CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9918 - Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão - Propostas de Uma Ferramenta para Investigações Paramétricas - IVANIL POMPEU, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9919 - Viabilidade Técnica de Abertura Monopolar Permanente em Linhas de Transmissão Extra Alta Tensão - FABIANA AP. DE TOLEDO SILVA, JOSÉ ANTONIO JARDINI

- BT/PEA/9920 – Avaliação do U-Net em Custers com Rede My com Rede Myrinet – PAULO A. GEROMEL, SERGIO T. KOFUJI
- BT/PEA/9921 – SAG – Sistema de Apoio Gerencial via Internet – ADRIANO GALINDO LEAL, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9922 – Desequilíbrio de Tensão em Redes Secundárias de Distribuição – PAULO VINÍCIUS SANTOS VALOIS, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9923 – Sistema Não Lineares Controlados pela Lógica Difusa: Uma Aplicação em Acionamentos Constituídos por Motores Assíncronos – WERNER W. PACHECO LUJAN, CÍCERO COUTO MORAES
- BT/PEA/9924 – Arborescência em Cabos Elétricos de Média e Alta Tensão – JOÃO JOSÉ ALVES DE PAULA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JÚNIOR
- BT/PEA/9925 – Estudo para Otimização de Desempenho de Plantas Industriais Automatizadas – ANTONIO ORLANDO UGULINO, SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9926 – Simulação e Análise de Desempenho de Processos Visando a Otimização de Sistemas Integrados de Produção – CÍCERO COUTO DE MORAES, SERGIO LUIZ PEREIRA, JOSÉ ROBERTO R. DE GODOY
- BT/PEA/9927 – Automação Moderna de Processos: Análise de Necessidade, Viabilidade e Tendências Tecnológicas – SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9928 – Modelo de Compensação Série Controlada Aplicado ao Estudo do Amortecimento de Oscilações em Sistemas de Potência – JOSÉ ROBERTO PASCON, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9929 – Cálculo de Trajetórias de Elétrons em Estruturas Magnéticas – YASMARA CONCEIÇÃO DE POLLI, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/0001 – Monitoramento de Transformadores de Potência Direcionado à Manutenção com Base nas Condições – SERGIO COSTA, AUGUSTO F. BRANDÃO JR.
- BT/PEA/0002 – Redes Neurais Artificiais Aplicadas a Estudos de Subestações de Alta Tensão Abridadas Frente a Ensaios de Impulsos Atmosféricos – ANDRÉ NUNES DE SOUZA, FERNANDO SELLES RIBEIRO
-

