



**SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GMI 20
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – GMI

METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIIS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA MANUTENÇÃO DE COMUTADORES DE TAP SOB CARGA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DE EXTRA-ALTA TENSÃO DA ELETRONORTE

**V. Leonardo Paucar *
UFMA**

**Raimundo Nonato Rosa Filho
ELETRONORTE**

RESUMO

Neste trabalho é proposta uma metodologia baseada em redes neurais artificiais (RNA) para análise e diagnóstico da condição de comutadores de tap sob carga (OLTC) de transformadores de potência de extra-alta tensão. Foi adotada uma arquitetura de RNA de multiperceptron com 22 vetores de entrada e apenas uma saída com o status da condição do OLTC em função do tempo de operação indicando quando o comutador deverá sofrer intervenção de manutenção baseada na condição. É realizada uma aplicação do sistema proposto considerando o OLTC de um autotransformador de 500/230/13,8 kV, 600 MVA da subestação São Luis II da ELETRONORTE.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores de potência, comutador de tap sob carga, redes neurais artificiais, manutenção baseada na condição.

1.0 - INTRODUÇÃO

O setor elétrico no mundo todo está se deparando com uma tendência de desverticalização, passando a ser constituído de diversos agentes, com suas próprias decisões, influenciando no comportamento do desempenho dos custos de manutenção (1) através do contrato de prestação de serviço na transmissão (CPST) gerenciado por um órgão operativo tal como o Operador Nacional do Sistema (ONS) que otimiza a produção e transmissão de energia elétrica.

A desregulamentação pode propiciar uma abertura de novos negócios e mercado para a Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE, detentora das interligações nos sistema de transmissão Norte/Nordeste e Norte/Sul. Assim, por exemplo, em 2004 a ELETRONORTE assinou dois contratos para fornecimento de energia elétrica com as empresas de alumínio ALUMAR e ALBRAS, dois grandes consumidores de energia elétrica. Esses dois contratos foram os maiores contratos de venda e compra de energia elétrica no mundo.

Surge no entanto um problema que é a otimização dos custos de manutenção e a qualidade na operação da rede básica de transmissão, visando reduzir as perdas e estabelecer um equilíbrio financeiro entre despesa e receita. As soluções obtidas estão sujeitas às restrições tanto técnicas (originadas no equipamento) (2) como econômicas (CPST) que devem refletir no estado da condição ótima de operação do sistema elétrico de potência considerando as características físicas da rede de transmissão e a disponibilidade dos transformadores de potência (3).

(*) UFMA – DEE, Av. dos Portugueses s/n, Campus do Bacanga – CEP 65085-580 – São Luis, MA – Brasil
Tel: (+55 98) 2109-8824 – Fax: (+55 98) 2109-8241 – Email: Lpaucar@ieee.org

Neste trabalho é proposta uma metodologia computacional baseada em redes neurais artificiais (RNA) para o diagnóstico e análise da condição para a manutenção de comutadores de tap sob carga de transformadores de potência de extra-alta tensão (EAT). O sistema tem sido aplicado a um autotransformador EAT da Subestação São Luis II da ELETRONORTE.

2.0 - CONCEITOS DE MANUTENÇÃO DO COMUTADOR DE TAP SOB CARGA

Um equipamento essencial dos transformadores de potência é o comutador de derivações (*tap changer*) o qual permite elevar ou abaixar a tensão um pouco além dos níveis nominais. A alteração automática de uma derivação a outra, ou de um tap a outro, pode ser realizada através do comutador de tap sob carga ou simplesmente OLTC (*on-load tap changer*). O comutador de derivações sob carga é um dos principais componentes responsáveis pelo normal funcionamento do transformador de potência. O custo dos comutadores de tap sob carga pode representar de 5 a 10% do custo de capital de um projeto de um transformador de potência (4). Com o advento da reestruturação do setor elétrico, a manutenção cobrou uma transcendência ainda maior em que além do objetivo de manter o equipamento em funcionamento, o aspecto de economia é importante.

A complexidade funcional do OLTC e o grande número de operações diárias a que é submetido durante a sua operação faz dele um dos principais causadores de falhas dos transformadores de potência. Na Figura 1 é mostrado um diagrama esquemático com as partes principais do OLTC GI-3022.

A tarefa da manutenção consiste na observação da condição para identificar defeitos ou o começo do defeito e atividades de correção dos defeitos. Estão disponíveis várias técnicas para manutenção de transformadores e de OLTC, algumas técnicas são no modo *on-line* e outras *off-line*. Lyonnet tem identificado três tipos de manutenção (5): 1) Manutenção corretiva; 2) Manutenção preventiva, baseada no período; e 3) Manutenção preditiva, baseada na condição. O custo de manutenção tem sido otimizado quando atividades corretivas são retardadas até a necessidade de evitar a possibilidade do equipamento falhar. Isto deve ser alguma advertência para que proceda a manutenção antes da necessidade verdadeira de fazê-la.

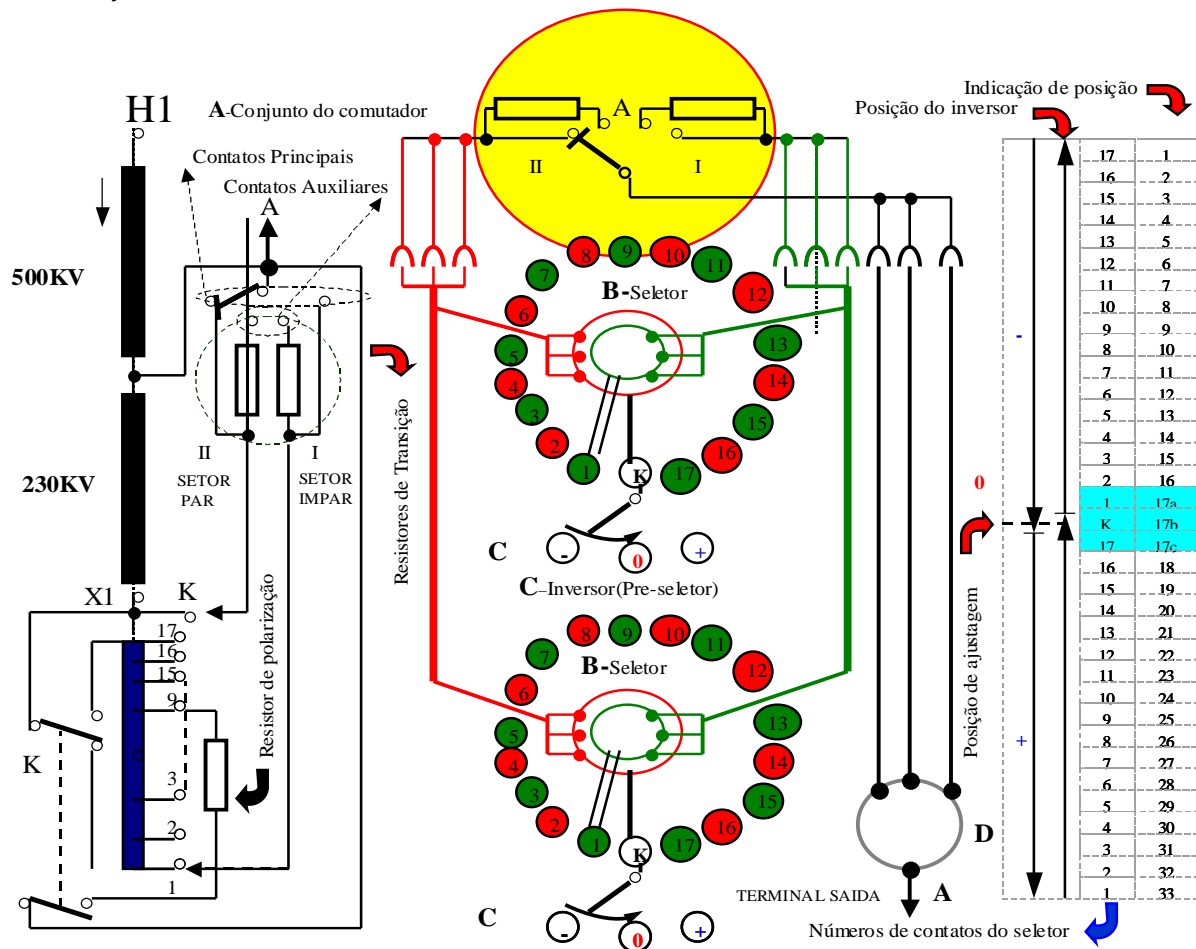


FIGURA 1 - Detalhe das partes principais do OLTC GI-3022.

2.1 Conceitos básicos de manutenção de comutadores de derivações

A manutenção do OLTC de transformadores de potência EAT pode ser definida seguindo práticas estabelecidas pelos padrões e normas existentes (6), bem como pela prática adotada pelas concessionárias de eletricidade. No entanto, existem basicamente algumas tendências técnicas para a realização da manutenção.

A manutenção de comutadores de tap se restringe, fundamentalmente, à chave comutadora e ao mecanismo de acionamento motorizado. O seletor e o pré-seletor praticamente não necessitam de manutenção porque seus contatos não sofrem a ação do arco elétrico e suas partes, em geral, não se desgastam. Esse tipo de serviço exige pessoal bem treinado para realizá-lo, conhecimento detalhado da estrutura e do funcionamento do comutador e do mecanismo de acionamento motorizado, disponibilidade de peças de reserva e óleo mineral isolante; e instrumentos e equipamentos adequados. Uma revisão do comutador pode ser realizada em aproximadamente 8 horas. O cilindro da chave comutadora não deve ficar exposto ao ar por mais de 10 horas pois pode absorver umidade e prejudicar a resistência de isolamento.

As manutenções das chaves comutadoras estão divididas em duas categorias:

- *Manutenção baseada no tempo (TBM):* São manutenções periódicas realizadas pelo número de comutações ou/e no tempo, o que ocorrer primeiro.
- *Manutenção baseada na condição (CBM):* São manutenções aperiódicas realizadas na condição do óleo isolante coletado para análise de teor de água e rigidez dielétrica. Caso encontra-se fora dos valores especificados pelo fabricante o comutador deve ser retirado de operação para substituição do óleo.

2.2 Práticas de manutenção de comutadores de derivações

As práticas de manutenção utilizadas pela ELETRONORTE nos comutadores GI-3022 instalados nos bancos de autotransformadores 500/230/13,8 kV, 600 MVA na subestação de São Luis II são subdivididas nas manutenções preventivas baseadas no tempo, em que as chaves são inspecionadas com a substituição de peças de acordo com o número de operações do comutador, fornecidos pelo fabricante MR (Maschinenfabrik Reinhausen) e as manutenções preditivas baseadas na condição, em que são retiradas amostras de óleo do comutador para que seja realizada análise físico-química (rigidez dielétrica, teor de água) e gascromatografia visando o monitoramento *off line* das suas condições de operação. Na Tabela 1 é mostrada uma lista das principais falhas dos OLTC.

TABELA 1 – Síntese das principais categorias de falhas dos comutadores de tap sob carga.

Tipo de defeito	Causa base	Resultado	Conseqüências
1- Falha mecânica na haste de acoplamento, guias componentes e acessórios. 2-Falhas nos componentes do contator suporte.	1-Projeto inadequado: Controle de qualidade deficiente na fabricação ou lugar de montagem. 2-Idade do componente ou fadiga	1-Perda de acionamento e sincronismo entre a chave e o seletor. 2-Perda de contato.	1-Arcos de falta no seletor e/ou chave. 2-Falha principal na mudança de tap/transformador
3-Chave opera lentamente ou incompleta.	3.1- Projeto inadequado ou Controle de qualidade. 3.2-Componente deteriorado.	3-Operação lenta ou incompleta da chave.	3.1-Arcos de falta no seletor e/ou chave. 3.2-Falha principal na mudança de tap/trafo
4-Aumento do carvão/Arco por pirólise	4.1- Projeto inadequado e/ou infrequente uso da chave de carga	4-Falha no seletor de tap	4.1-Gás no seletor e/ou falha por arco. 4.2-Possibilidade de maior falha
5-Falha do separador	5-Causado por manutenção.	5-Separador quebrado (rachado)	5-Maior falha do OLTC ou transformador.
6-Ligações ou resistor de transição	6- Projeto inadequado, uso ou período de vida do componente	6-Superaquecimento ou falta por formação de gás	6-Retirada não planejada para inspeção.
7-Variadas de defeitos menores (falha de fixação, falha de vedação, erosão de contato e falha de articulações correntes)	7.1- Projeto inadequado. 7.2-Período de vida de componentes. 7.3-Manutenção inadequada	7.1-Vazamento de óleo ou entrada de água. 7.2-Superaquecimento	7.1-Transtorno geral. 7.2-Sobre-aquecimento. 7.3-Retirada não planejada

As manutenções desenvolvidas em comutadores de tap sob carga na ELETRONORTE estão migrando gradual e cautelosamente das manutenções baseadas no tempo, para as manutenções baseadas na condição com monitoramento *off line* do óleo com o acompanhamento das inspeções realizadas conforme solicitação do fabricante, que interagem com a manutenção implementando melhorias contínuas no projeto com a substituição dos componentes que se deterioram com a idade e se desgastam com o número de operações.

As experiências em manutenções de OLTC constituem um processo em constante evolução tecnológica no qual se tem constatado um número razoavelmente grande de falhas mecânicas que necessitam do desenvolvimento de sondas confiáveis, para que possa ser realizado um monitoramento *on line* de seus componentes.

3.0 - METODOLOGIA RNA PARA DIAGNÓSTICO DA CONDIÇÃO DO OLTC

3.1 Conceitos de RNA

Uma das principais características das redes neurais artificiais é a sua capacidade de generalização (7) em que, por exemplo, após a realização de um treinamento e teste bem sucedidos, a RNA será capaz de estimar o resultado para dados de entrada que não foram usados durante o treinamento, desde que o intervalo do domínio dos dados de entrada seja similar ao utilizado durante o treinamento.

Além da capacidade de generalização, as RNA são flexíveis nas grandezas ou sinais de entrada fornecidas. Isto é, se uma determinada entrada não for utilizada, a RNA ainda poderá resolver o problema, talvez sem a precisão mais fina a ser conseguida, porém sendo capaz de produzir resultados ainda válidos (7).

O problema de diagnóstico da condição de OLTC é parte importante da manutenção dos transformadores de potência. Esse problema é resolvido por especialistas humanos que realizam um conjunto de atividades de análise e diagnóstico da condição do comutador. Dentro de domínios bem definidos, um sistema de inteligência artificial pode realizar tarefas com sucesso similar àquelas produzidas por especialistas humanos. Neste caso, uma RNA é considerada uma alternativa para poder realizar esse tipo de tarefa.

3.2 Modelo RNA proposto

As técnicas de inteligência artificial têm sido aplicadas às diversas áreas de sistemas de potência. Dentre elas as redes neurais artificiais constituem-se uma ferramenta que pode auxiliar nas tarefas de manutenção de equipamentos dos sistemas elétricos e especificamente nos transformadores de potência. (8), (4)

Atualmente a arquitetura de rede neural artificial mais utilizada é o perceptron multicamada, enquanto que o algoritmo de treinamento preferido é o *back-propagation* dentro de um paradigma de treinamento supervisionado. Neste trabalho é proposta uma RNA não-linear de perceptron multicamada *feedforward* (sem realimentação) para diagnosticar a condição de comutadores de tap sob carga de transformadores de potência EAT. A finalidade do diagnóstico da condição é evitar atividades de manutenção desnecessárias, dessa maneira os custos na manutenção poderão ser minimizados.

Em vista de que na ELETRONORTE estão disponíveis dados históricos sobre a manutenção dos seus transformadores de grande potência e os seus OLTC, a utilização do paradigma de treinamento supervisionado tem justificativa prática. Portanto, a rede neural proposta é uma rede convencional e básica, considera-se que outros tipos de redes neurais podem ser utilizados com sucesso para resolver o mesmo problema.

Na Figura 2 tem-se a estrutura do modelo da rede neural artificial proposta a ser usada para o diagnóstico da condição do OLTC, incluindo as grandezas e os blocos a serem abstraídos e representados pela rede neural. Considera-se que uma rede neural de perceptron composta de duas camadas escondidas de neurônios pode resolver um problema altamente não-linear tal como o diagnóstico da condição de comutadores de tap sob carga.

São considerados nove módulos de diagnóstico e estimativa:

- Módulo 1: Envelhecimento do OLTC.
- Módulo 2: Falhas elétricas e falhas mecânicas.
- Módulo 3: Falhas induzidas por manutenção e falhas de regulação do sistema.
- Módulo 4: Análise físico-química.
- Módulo 5: Análise gascromatográfica.
- Módulo 6: Envelhecimento acelerado dos componentes.
- Módulo 7: Óleo deteriorado.
- Módulo 8: Arco elétrico.
- Módulo 9: Diagnóstico final da condição do OLTC.

Na Figura 3 é apresentada a configuração final da rede neural artificial para o diagnóstico da condição do OLTC visando a redução de custos de manutenção de transformadores de potência de EAT na ELETRONORTE. O total de entradas consideradas foi de 22 (ver Figura 2) em que os módulos 1, 2, 3, 4 e 5 consideram 4, 4, 2, 3 e 9 entradas, respectivamente.

Os módulos 6, 7 e 8 não precisam ser representados através de redes neurais intermediárias pois as camadas intermediárias de neurônios têm a capacidade de obter o modelo implícito do comportamento desses módulos bem como dos outros módulos. Já o módulo 9 apenas servirá para ponderar o sinal de saída para valores adequados ao usuário do sistema inteligente. Alguns testes iniciais de validação cruzada permitiram desconsiderar a alternativa de utilizar várias redes neurais para os correspondentes blocos dos módulos 6, 7 e 8. Validação cruzada é uma técnica estatística que no caso de redes neurais, um número de arquiteturas de RNA são testadas mediante treinamento rápido (*fast training*) principalmente tentando encontrar o número mais adequado de neurônios em cada camada escondida.

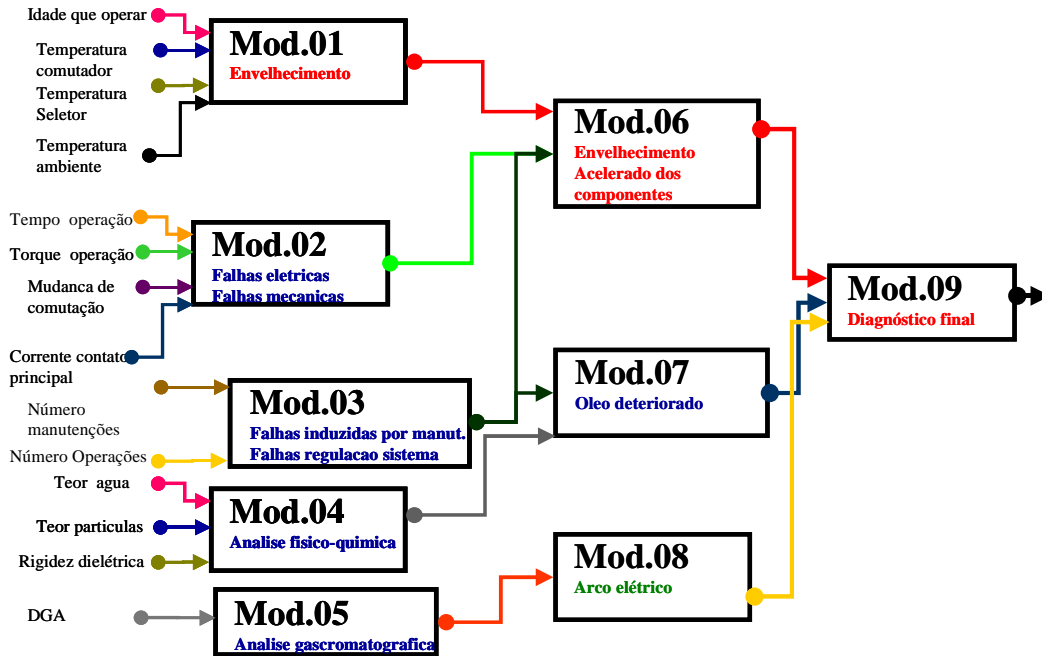


FIGURA 2 – Estrutura para a modelagem da arquitetura da rede neural artificial proposta.

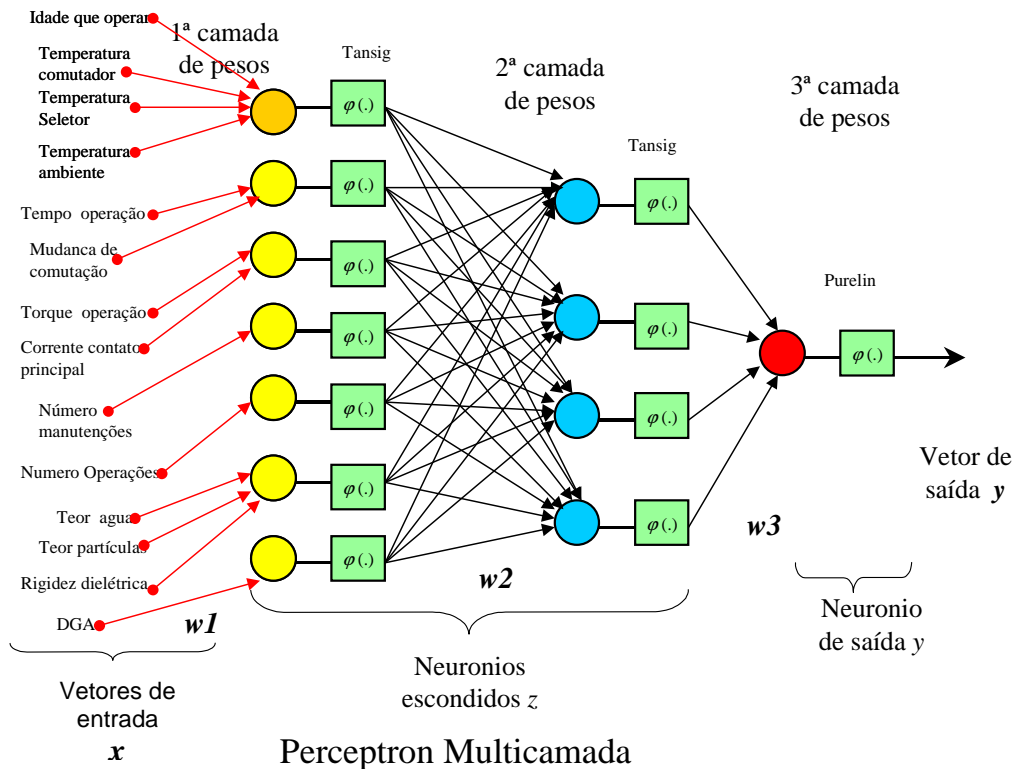


FIGURA 3 – Dados de entrada e arquitetura da rede neural artificial para diagnóstico da condição de OLTC.

4.0 - SIMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A seguir serão descritos os aspectos da implementação da RNA com o modelo proposto e os resultados dos testes aplicativos para o OLTC do autotransformador MR GI-3022 (500/230/13,8 kV, 600 MVA) da subestação São Luís II da ELETRONORTE. Os dados utilizados correspondem a um OLTC real atualmente em operação.

O modelo de RNA proposto foi implementado com o software MATLAB (Toolbox de Redes Neurais Artificiais). Foi escolhida a configuração de neurônios perceptron de 3 camadas, sendo duas camadas intermediárias ou escondidas não-lineares e a terceira a camada de saída com função de ativação linear. Para treinar a RNA foi usado o método *feed-forward back-propagation* enquanto a atualização dos pesos foi realizada com o método de otimização de segunda ordem Levenberg-Marquardt.

Foram selecionados 45 pares (x, y) , sendo x o vetor de entrada composto por 22 componentes, y é o vetor de saída de apenas uma componente: o diagnóstico da condição do OLTC. O conjunto dos 45 pares de dados corresponde ao total da coleta de dados. Desses 45 dados, 40 foram utilizados para treinamento e os 5 restantes para o teste da RNA treinada. Os dados de treinamento e teste foram escolhidos aleatoriamente para cada caso.

Para a etapa de treinamento foi adotado um limite de 10000 épocas e considerando diferentes erros limites de treinamento. Dependendo do valor de cada limite ou tolerância de treinamento, a rede neural pode realizar o treinamento em diferente número de épocas.

Para obter uma RNA adequada nas etapas de treinamento e teste foram usadas as seguintes cinco topologias (neurônios na 1ª camada escondida, neurônios na 2ª camada escondida, neurônios na camada de saída): 5-5-1, 5-10-1, 10-10-1, 15-10-1 e 20-10-1. Para cada topologia foram usados diferentes erros limites do treinamento (MSE): 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} e 10^{-7} e para cada erro foram simulados 3 treinamentos, isto último para reconhecer as simulações mais estáveis.

A curva obtida correspondente ao treinamento possui a forma de uma hipérbole, em que conforme é diminuído o erro limite de treinamento (devido ao aumento do número de épocas) o erro máximo (entre o valor simulado e o valor real) diminui. As curvas das etapas de teste possuem um mínimo local que deve ser tomado como melhor caso, devido que o erro máximo entre o valor simulado e o valor real diminui com o número de épocas no início, e depois aumenta ao aumentar o número de épocas.

De cada topologia é escolhido o melhor caso, isto significa escolher os menores erros máximos da etapa de teste. Entre todas as topologias simuladas, a topologia 5-10-1 apresentou o menor erro (6,12%) para um erro limite do treinamento de 10^{-4} . Na Tabela 2 são apresentados os resultados do treinamento e teste para essa topologia e na Figura 4 a curva correspondente ao caso 11. Na Figura 5 é apresentada uma comparação gráfica dos valores simulados pela RNA com os valores reais (obtidos da coleta de dados), isto último obtido para a entrada 1 (idade de operação) e para as diferentes topologias que estão sendo consideradas.

TABELA 2 – Resultados da etapa de treinamento e teste para a topologia 5-10-1.

Identificação do Caso	Etapa de Treinamento				Etapa de Teste		
	Erro Limite	Erro Atingido	Número de épocas	Erro Máximo (%)	Número de Entrada	Erro Máximo (%)	Número de Entrada
Caso1	10^{-1}	6,099E-02	3	45,70%	33	40,54%	5
Caso2	10^{-1}	6,549E-03	6	19,53%	20	44,87%	1
Caso3	10^{-1}	9,499E-02	1	69,33%	20	58,43%	3
Caso4	10^{-2}	9,794E-03	11	27,20%	20	15,65%	1
Caso5	10^{-2}	9,544E-03	27	27,21%	26	12,53%	3
Caso6	10^{-2}	8,331E-03	53	26,54%	20	28,80%	1
Caso7	10^{-3}	9,815E-04	101	8,84%	33	14,67%	1
Caso8	10^{-3}	9,950E-04	37	8,48%	33	16,07%	1
Caso9	10^{-3}	9,834E-04	81	10,00%	33	9,11%	1
Caso10	10^{-4}	9,990E-05	1434	4,04%	37	67,56%	1
Caso11	10^{-4}	1,000E-04	878	2,81%	30	6,12%	2
Caso12	10^{-4}	9,940E-05	481	3,00%	38	17,60%	4
Caso13	10^{-5}	9,500E-06	1860	0,77%	11	16,38%	1
Caso14	10^{-5}	0,00001	1555	1,30%	11	51,94%	1
Caso15	10^{-5}	0,00001	993	1,15%	21	11,02%	4
Caso16	10^{-6}	0,000001	2122	0,40%	6	205,21%	1
Caso17	10^{-6}	0,000001	3510	0,43%	8	8,74%	3
Caso18	10^{-6}	0,0000008	1260	0,30%	13	16,64%	4
Caso19	10^{-7}	0,0000001	2095	0,11%	7	24,66%	1
Caso20	10^{-7}	0,0000001	2771	0,14%	4	89,88%	1
Caso21	10^{-7}	0,0000001	4717	0,14%	7	41,85%	1

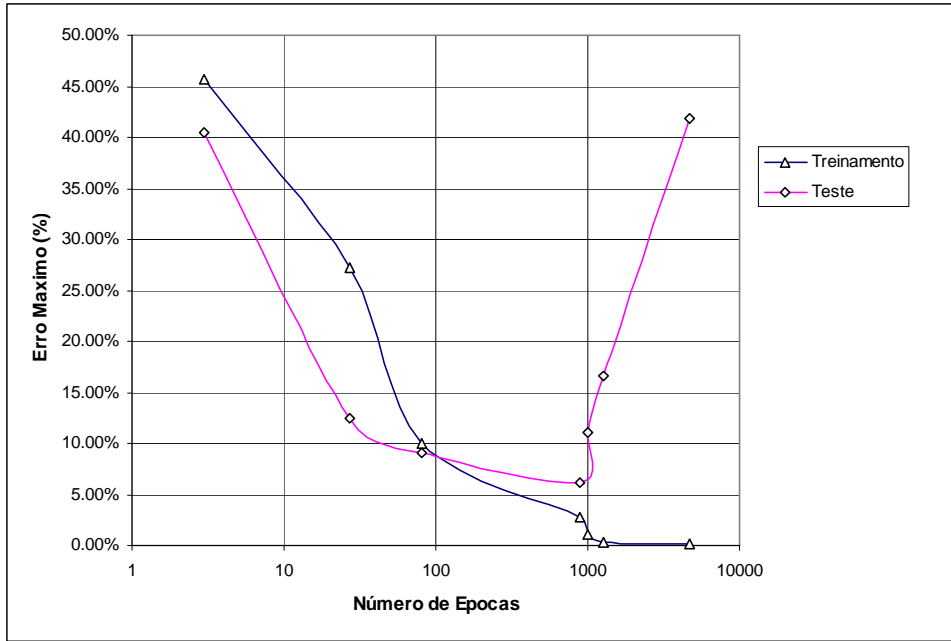


FIGURA 4 - Curva representativa do treinamento e teste para a topologia 5-10-1.

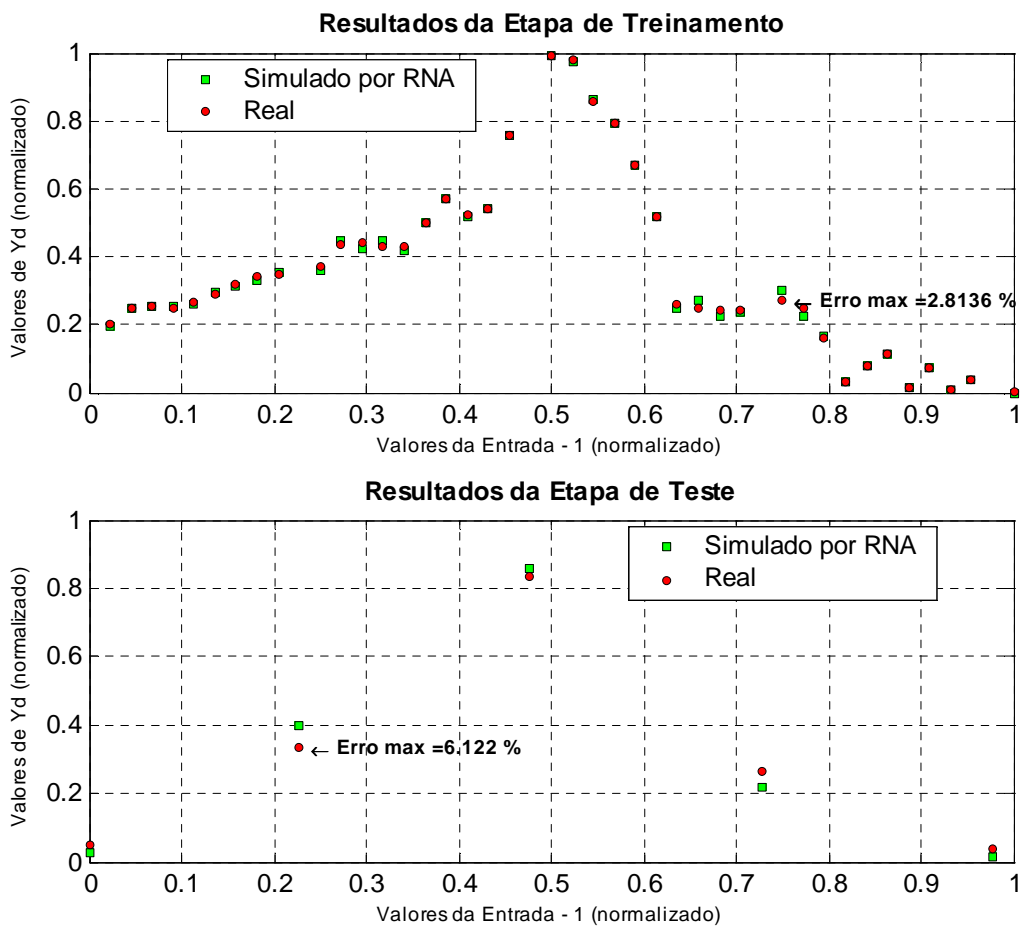


FIGURA 5 – Resultados das etapas de treinamento e teste para o melhor caso (caso 11) da topologia 5-10-1.

5.0 - CONCLUSÕES

A partir da proposta de uma estrutura de blocos para análise e diagnóstico da condição de comutadores de tap sob carga que simula a seqüência de atividades de um especialista humano, tem sido proposta uma metodologia baseada em redes neurais artificiais que permitiu abstrair a estrutura de blocos de diagnóstico da condição de OLTC.

A metodologia baseada em RNA permite interpretar e diagnosticar os intervalos de manutenção do OLTC, prevendo quando o comutador deverá sofrer intervenção de manutenção baseada na condição. A RNA adotada considerou uma arquitetura de perceptron multicamada.

Algumas das vantagens que pode oferecer a utilização do sistema inteligente proposto baseado em redes neurais para o diagnóstico da condição de OLTC são:

- O sistema inteligente permanentemente instalado pode gerenciar a vida útil do OLTC em tempo real viabilizando a disponibilidade dos dados (entrada e saída) a qualquer instante. As medidas dos testes coletados no tempo podem ser acolhidas para pré-ajustes nas entradas do modelo das redes neurais.
- Impacto na redução de custo de manutenção dos comutadores de tap dos transformadores de potência EAT na ELETRONORTE.
- O método proposto viabiliza a migração da manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada na condição de OLTC.

O uso de RNA para a previsão da manutenção de OLTC, via o diagnóstico da condição, é uma alternativa viável segundo os resultados obtidos na comparação entre valores simulados e os valores reais. O modelo não impõe restrição à entrada de sinais ou a aquisição dos modos de falha. O modelo proposto não necessita informar o histórico de manutenção do equipamento, bem como, as características relativas à operação do mesmo.

Das curvas de resultados para a etapa de treinamento, o erro máximo entre o valor simulado pela RNA e o valor real, apresenta uma diminuição apreciável conforme o erro limite de treinamento diminui ou aumenta o número de épocas; assim as curvas tomam a forma de uma exponencial decrescente.

Das curvas de resultados para a etapa de teste, o erro máximo entre o valor simulado pela RNA e o valor real, apresenta inicialmente uma diminuição apreciável até chegar a um mínimo local, daí o erro aumenta; assim as curvas tomam a forma de uma parábola.

Dentre as várias topologias simuladas com validação cruzada, a topologia de RNA 5-10-1 (5, 10 e 1 neurônios nas camadas 1, 2 e 3, respectivamente) apresentou o menor erro máximo (6.12%) e maior estabilidade de resultados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SWIFT G. and MOLINSKI T., "Power Transformer Life - Cycle Cost Reduction", Canadian Electrical Association Technology Seminar, Toronto, Canada, Nov.1995.
- (2) JONES W. H. and STANSBURY M. C., "Power Quality Monitoring Enhances preventive Maintenance Program: Detecting Substation Transformer Tap Changer Problem", IEEE Conference on Industrial Equipment, pp.1-6, 1998.
- (3) WETZER J. M. et al. , "Diagnostic and Condition Assessment-Techniques Goes Condition Based Maintenance", International Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 47-51, 2000.
- (4) KANG P. and BIRTHWHISTLE D., "Condition monitoring of power transformer on-load tap changers. Part 1: Automatic condition diagnostics", IEE Proc. Gener. Transm. and Distrib., vol.148, no.4, pp. 301-306, July 2001.
- (5) HANDLEY B., REDFERN M. and WHITE S., "On Load Tap-Changer Conditioned Based Maintenance", IEE Proc. Gener. Transm. and Distrib., pp. 296-300, Vol. 148, No.4, July 2001.
- (6) IEC60214, "On-load tap-changers", International Standard, Electrotechnical, 3rd edition, 1989.
- (7) HAYKIN S., "Neural Networks: a comprehensive foundation", 2nd. ed., Prentice Hall, 1998.
- (8) KANG. P. and BIRTHWHISTLE D., "Condition Assessment of Power Transformer Onload Tap Changers Using Wavelet Analysis and Self-Organizing Map: Field Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.18, no.1, pp.78-84, Jan. 2003.