



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7795  
Tópico: Modelagem e Simulações

## SISTEMA INTELIGENTE PARA PREVISÃO DE CARGA EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA: ESTUDOS NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL E EM FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS

ALBINO M F DE MORAIS  
JUNIOR  
NESC/UFPA  
UBIRATAN HOLANDA  
BEZERRA  
NESC/UFPA

ALESSANDRA MACEDO DE  
SOUZA  
NESC/UFPA  
MARIA EMÍLIA DE LIMA TOSTES  
NESC/UFPA

CARLOS T. DA COSTA  
JUNIOR  
NESC/UFPA

### 1.0 INSTRUÇÕES GERAIS

Os avanços tecnológicos ocorridos nas últimas décadas propiciaram a obtenção de grandes desenvolvimentos na área da eletrônica, os quais têm sido repassados sistematicamente para os novos produtos de consumo, beneficiando assim os consumidores de um modo geral.

Existem também hoje programas nacionais que estimulam o uso eficiente da energia, no sentido da redução do consumo como, por exemplo, o emprego de lâmpadas compactas com reatores eletrônicos. Isto também tem contribuído para a degradação das formas de ondas de tensão e corrente nas instalações residenciais. Os consumidores classe B (baixa tensão) de um sistema de distribuição de energia, hoje estão injetando harmônicos na rede de distribuição em um nível que já merece preocupações especiais, no sentido de desenvolver-se estudos para melhor avaliar os impactos que essas fontes distribuídas de geração harmônica podem provocar na qualidade da energia elétrica.

Levando em consideração este crescimento constante de cargas não-lineares nas redes de distribuição, as empresas concessionárias de energia elétrica precisam buscar ferramentas que possam avaliar o comportamento e prever o que possa vir a acontecer ao sistema para se evitar que um evento possa desestabilizar ou até mesmo desligar a rede de distribuição.

Uma das ferramentas que pode ajudar a entender e a planejar melhor as ações para manutenção do sistema de distribuição é a previsão de carga nos transformadores de distribuição para a frequência fundamental e suas múltiplas harmônicas. Isso permitirá que estudos de fluxo de carga na frequência fundamental e nas principais frequências harmônicas de interesse sejam realizados com a finalidade de avaliar os impactos harmônicos sobre a rede de distribuição, e planejar a operação futura do sistema, de forma mais eficiente, econômica e segura.

A previsão de carga em transformadores de distribuição é hoje uma tarefa difícil devido principalmente à falta de dados das redes de distribuição, tanto para a frequência fundamental quanto para as frequências harmônicas. Este trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta utilizando inteligência artificial que venha fazer previsão de carga na frequência fundamental e nas frequências harmônicas em transformadores na rede de distribuição.

Numa primeira fase, apresentar-se-á a coleta de dados que consistiu em medições em transformadores de distribuição de modo a adquirir dados para o projeto de um sistema *neuro-fuzzy*, que foi a ferramenta computacional escolhida para prever a carga de forma inteligente. Por ser um aproximador não linear universal e por possuir a capacidade de

aprendizado de uma rede neural e o aproveitamento do conhecimento humano de um sistema *Fuzzy*, esta técnica é adequada para a modelagem de sistemas com imprecisões e que não disponham de modelos formais para a representação.

O artigo, desta forma, propõe implementar um sistema computacional que faz a previsão de carga em transformadores de distribuição de energia em 60 Hz e nas frequências harmônicas – através da Distorção Harmônica Total de Corrente Percentual (DHTi%) - de modo a procurar descrever de forma aproximada o comportamento dos transformadores da rede de distribuição, nos diversos períodos do dia, da semana e do ano.

A estrutura computacional utilizada faz a previsão de correntes dos alimentadores de uma subestação em dias típicos como um dia de semana normal, um dia de final de semana ou um dia de feriado. Para isso, são utilizados como entradas valores que caracterizam a data e hora para a previsão. Estas informações são importantes, pois é notório que o perfil de carga depende fortemente da hora e do dia da semana, já que os ciclos diários e semanais têm relativa repetitividade.

## 2.0 SISTEMA NEURO-FUZZY

A ferramenta computacional escolhida para a previsão de carga fundamental e harmônica foi o sistema *Fuzzy*. Porém, para se trabalhar com esta ferramenta de inteligência artificial é necessário a montagem de uma base de regras que relacionem a entrada com a saída. Isto é muitas vezes um trabalho altamente exaustivo e demorado, visto que é necessário que as regras prevejam todas as entradas e as possíveis saídas, além da preocupação de eliminar qualquer tipo de conflito na parte **ENTÃO** das regras, o que ocasionaria duas saídas diferentes para uma mesma entrada.

Para solucionar este problema é proposto neste trabalho a utilização de uma rede *neuro-fuzzy*, onde a rede será treinada utilizando técnicas de redes neurais para a montagem das regras que serão posteriormente utilizadas no sistema *fuzzy* montado a partir dos coeficientes obtidos no treinamento da rede. Neste caso, o objetivo da rede neural é processar a informação de acordo com seu prévio treinamento com dados de entrada e saída. A escolha da rede neural se deve ao fato das redes neurais serem

extremamente paralelas, pois suas numerosas operações são executadas simultaneamente.

O sistema *neuro-fuzzy* escolhido foi o sistema criado por J. S Roger Jang chamado *ANFIS* (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) que faz uma adaptação dos valores de entrada e saída para uma base de regra que interliga todas as entradas e saídas, formando assim uma base de regras robusta que cria um sistema de inferência *fuzzy* que contempla todas as possíveis entradas.

O sistema *ANFIS* foi escolhido por ser usado para aplicações de **previsão** e **aproximação** de funções. Além disso, ele é um sistema de Takagi-Sugeno e demonstra-se que seu modelo de primeira ordem é um aproximador universal. Sua popularidade é tão grande que o levou a ser implementado no MatLab. Um exemplo de sistema de Takagi-Sugeno de primeira ordem pode ser visto abaixo.

Tendo duas variáveis de entrada  $x$  e  $y$  e uma saída  $z$  e as regras:

**Regra 1: SE  $x$  é  $A_1$  e  $y$  é  $B_1$  ENTÃO**

$$f_1 = p_1 \times x + q_1 \times y + r_1$$

**Regra 2: SE  $x$  é  $A_2$  e  $y$  é  $B_2$  ENTÃO**

$$f_2 = p_2 \times x + q_2 \times y + r_2$$

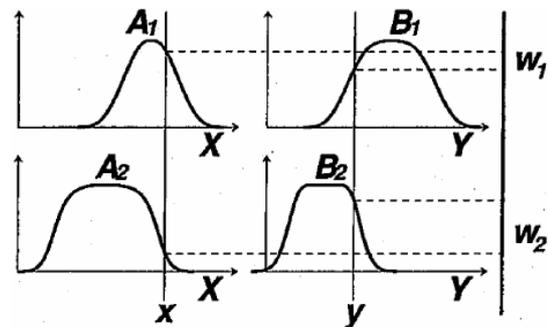


Figura 1- Exemplo do Sistema Takagi-Sugeno de primeira ordem

Então através da Figura 1 temos:

$$z = \frac{w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2}{w_1 + w_2}$$

Podemos ver na Figura 2 a arquitetura do modelo *ANFIS* e suas diversas camadas.

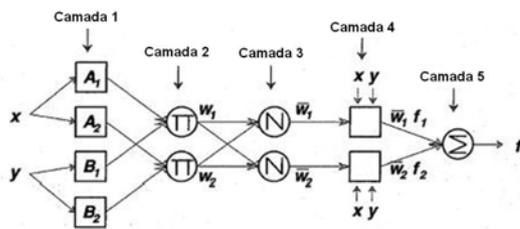


Figura 2- Arquitetura do Sistema ANFIS

Descrição das Camadas:

**Camada 1:** Calcula o grau de pertinência com que as entradas satisfazem os valores ou termos lingüísticos associado a estes nós. É chamada camada dos antecedentes.

**Camada 2:** Cada nó desta camada corresponde a uma regra e calcula com que grau o conseqüente da regra está sendo atendido.

**Camada 3:** Esta camada realiza uma normalização dos valores da camada anterior.

**Camada 4:** Nesta camada as saídas dos neurônios são calculadas pelo produto dos valores normalizado na camada anterior e dos valores do conseqüentes da regra. É chamado camada dos conseqüentes.

**Camada 5:** O nó desta última camada da arquitetura calcula a saída precisa do sistema e , juntamente com os nós das camadas 3 e 4, promove a defuzzificação.

Este sistema utiliza o particionamento Fuzzy-grid Adaptativo. Seu aprendizado (identificação da estrutura e parâmetros) é feito em duas etapas que se repetem até que o critério de parada seja alcançado.

**ETAPA 1:** Os parâmetros dos antecedentes ficam fixos e os conseqüentes são ajustados pelo método MQD- estimação por Mínimos Quadrados Ordinários.

**ETAPA 2:** Os parâmetros dos conseqüentes ficam fixos e os antecedentes são ajustados pelo algoritmo Gradiente Descendente.

### 3.0 IMPLEMENTAÇÃO

Para esta fase de implementação, foram coletados dados em dois transformadores de distribuição. As medições foram feitas nos períodos matutino, vespertino e noturno para dias de semana comuns e para dias de fins de semana e feriado, a fim de se poder reproduzir o perfil de carga em qualquer período desejado após o desenvolvimento da ferramenta.

Será implementado um sistema de previsão de carga fundamental e harmônica, que terá como entrada o dia da semana, a hora do dia e o tipo

de transformador no qual foram obtidos os dados. Já a saída será composta pelas correntes fundamental e harmônicas nas três fases, as quais caracterizam as condições de carregamento dos transformadores, nas respectivas frequências.

### 3.1 Coleta de dados para o aprendizado da rede

Inicialmente a caracterização das fontes distribuídas de geração de harmônicos no alimentador foi feita por meio de um plano de medição que foi realizado durante diversos dias.

Foram executadas medidas de modo a construir uma amostragem da injeção harmônica do transformador, através de registros das formas de onda da tensão e da corrente nos transformadores de dez em dez minutos, em dias de semana comum e dias de fim de semana, em horários incluindo os períodos matutino, vespertino e noturno.

As medições foram realizadas com um equipamento de análise de qualidade de energia, modelo trifásico, que pode coletar dados por dias e até semanas inteiras sem a necessidade de retirada dos dados dos mesmos. O analisador de qualidade de energia utilizado tem como capacidades nominais 600 V e 2000 A. Este instrumento faz decomposição harmônica até a 51ª ordem, expressando esta decomposição espectral através de gráficos de barras ou entregando os dados por planilhas do excel.

Para validação do modelo desenvolvido, foi escolhido apenas um transformador, com diversos bancos de dados de medições em diferentes dias, para que fosse feito o treinamento e a validação dos dados de saída da rede *neuro-fuzzy* a fim de mostrar um resultado claro de que a rede *ANFIS* tem um alto poder de aprendizagem e serve perfeitamente para a análise e previsão de carga fundamental e harmônica do transformador por ela treinado. O transformador escolhido para a validação da previsão para o carregamento do transformador foi um transformador de 150KVA, já para a validação da previsão de carga harmônica foi um transformador de 300KVA. Não foi utilizado o mesmo transformador para a validação, já que o banco de dados das medições para harmônicos disponibilizava de maior número de medições do transformador de 300KVA.

### 3.2 Metodologia utilizada

Os bancos de dados utilizados para modelagem foram coletados durante semanas seguidas, dando a possibilidade de ter a disposição várias medições para o mesmo dia da semana o que torna mais confiável o sistema, já que com uma gama grande de dados pode-se descartar as medições que apresentaram uma forma atípica.

O processo de coleta de dados é feito a cada segundo, sendo que o equipamento foi programado para armazenar estes dados de 10 em 10 minutos ocorrendo, então, a integralização dos diversos valores obtidos durante 10 minutos para o armazenamento de apenas um valor. O arquivo obtido é transferido para o computador e utilizando o programa fornecido pelo fabricante do analisador de qualidade de energia, e convertido para texto.

Foi implementado um sistema de previsão de carga fundamental e harmônica – DHTi% - utilizando a ferramenta chamada de ANFIS editor, que terá como entrada o dia da semana, a hora do dia e o tipo de transformador no qual foram obtidos os dados. Já a saída será composta por corrente fundamental e DHTi%.

A primeira etapa para a implementação do sistema para a previsão de carga é a preparação dos dados de entrada. Neste caso, os dados de entrada estão em arquivos com a extensão “.dat”. Vale salientar que o sistema ANFIS disponibilizado no MatLab permite várias entradas, porém, apenas uma saída. A preparação destes arquivos foi feita utilizando a planilha eletrônica Microsoft Excel.

Após a conversão, os dados são carregados no editor do ANFIS no MatLab, onde são selecionados o tipo de particionamento que, no caso deste trabalho, será *Grid partition* e o número de funções para a camada de entrada, além do tipo de função de pertinência, bem como o número de regras. A rede ANFIS é treinada até satisfazer um critério de parada que pode ser o número de épocas ou o valor do erro, o que for atingido primeiro pela rede ANFIS.

Para se chegar a um resultado satisfatório na previsão de carga deste trabalho, foram necessários diversos testes, já que foi notado a existência de um ponto de saturação para a redução do erro, que depende diretamente do número de regras desejadas. Então, para que o valor mínimo do erro fosse atingido, foram feitos vários testes até obter-se um número de regras

adequadas para o treinamento atingir o valor mínimo do erro.

Cada corrente prevista neste trabalho teve um número de regras que satisfizeram ao critério do erro mínimo, já que procurou-se manter um compromisso com a otimização do sistema de previsão de carga, pois, com um excessivo número de regras, obtém-se um erro bem menor, porém prejudica-se muito o desempenho do sistema de previsão, tornando-o muito lento.

Para validação deste trabalho, serão mostrados os resultados obtidos para as correntes fundamental e harmônicas da fase A em um dia de final de semana (Domingo) e um dia de semana (Segunda-feira). Em todos os casos foram utilizados o tipo de função de inferência na forma gaussiana e o tipo de aproximador universal do tipo de Takagi-Sugeno de primeira ordem.

## 4.0 RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Previsão de carga de carregamento do transformador.

O modelo para previsão de carga no transformador foi construído com base nos dados das seguintes curvas de carga de um dia de segunda-feira, onde foram utilizadas duas medições para o treinamento da rede e uma, do mesmo dia da semana, para a sua validação, já com o modelo ANFIS resultante do treino.

O treinamento da rede ANFIS foi feito mantendo o número de épocas fixas em 100, já a função de pertinências escolhida neste caso foi a *gassiana*. Para obter o número de funções de pertinência, foram realizados diversos testes com o número de funções de pertinência variando de 3 até o número que satisfizesse a condição de parada, que no caso é o máximo erro de 0,5.

Na Figura 3, observa-se a previsão de carga para uma segunda-feira2 onde o treinamento foi feito com dois bancos de dados chamados segunda-feira1 e segunda-feira3.

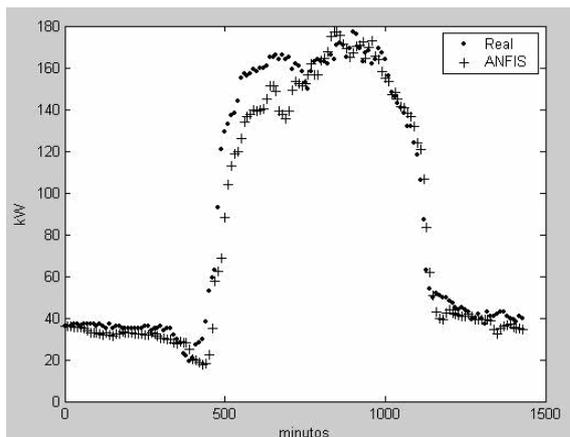


Figura 3 – Previsão de carga para uma segunda-feira de um transformador de distribuição de 150kVA - Saída real e saída ANFIS

Nesta figura, apresentou-se um erro muito pequeno, quando comparado a uma medição real ocorrida no mesmo dia. Percebe-se também que o perfil de subidas e decidas da rede real é acompanhada pela rede ANFIS.

Já na figura 4, apresenta um modelo para previsão de carga que foi construído com base nos dados chamados segunda-feira1 e segunda-feira2, e a checagem da rede ANFIS criada, forma usados os dados da segunda-feira3. Para este modelo, foram necessária 65 funções de pertinência do tipo gaussiana, onde o erro máximo foi mantido em 0,5 assim como as 100 épocas de treinamento.

Observam-se trechos em que o erro foi praticamente nulo entre a previsão da rede ANFIS e a medição real, além de ter um perfil que segue a rede real tanto quando o erro é praticamente zero como quando ele é um pouco maior.

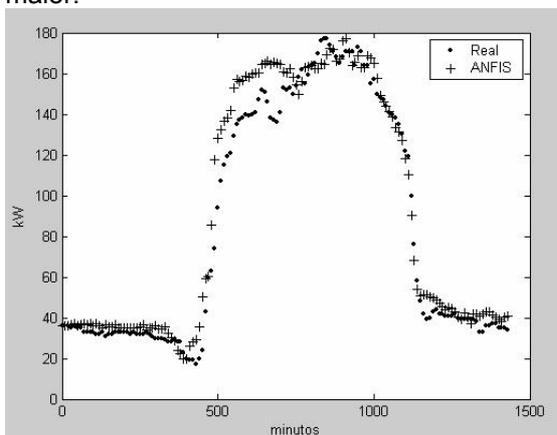


Figura 4 – Previsão de carga para uma segunda-feira de um transformador de distribuição de 150kVA Saída real e saída ANFIS

A última validação do modelo de previsão de carregamento de transformador foram utilizadas todas as três medidas para o treinamento e foi comparado cada um dos três conjuntos de treinamentos para a validação separadamente (Figuras 5, 6 e 7), a fim de comprovar que o sistema ANFIS reproduz qualquer um dos três conjuntos.

O sistema ANFIS chegou no erro máximo desejado de 0,5 após 100 épocas para um número de 65 funções de pertinências gaussianas.

Nas Figuras 5, 6 e 7, que utilizam os bancos de dados da segunda-feira1, da segunda-feira2 e da segunda-feira3, respectivamente, observa-se que a maioria dos pontos previstos foram coincidentes com os pontos reais. Comprovando desta forma que a rede Neuro-Fuzzy ANFIS é um boa ferramenta de previsão para o carregamento de transformadores.

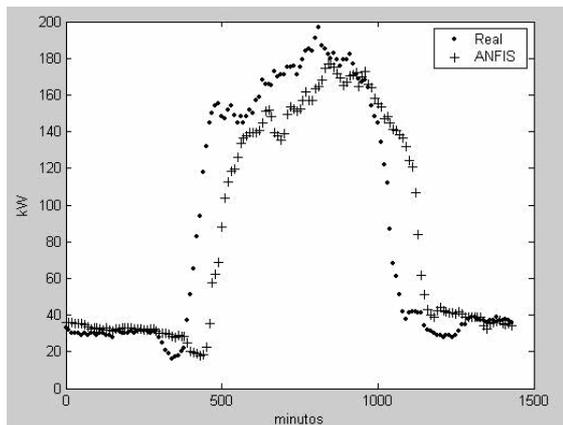


Figura 5 – Saída real e saída ANFIS para a segunda-feira1

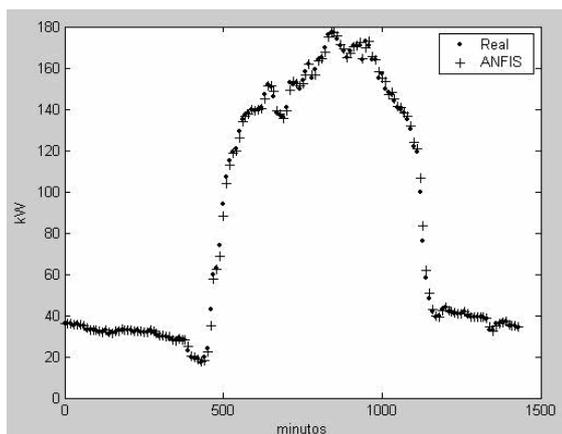


Figura 6 – Saída real e saída ANFIS para a segunda-feira2

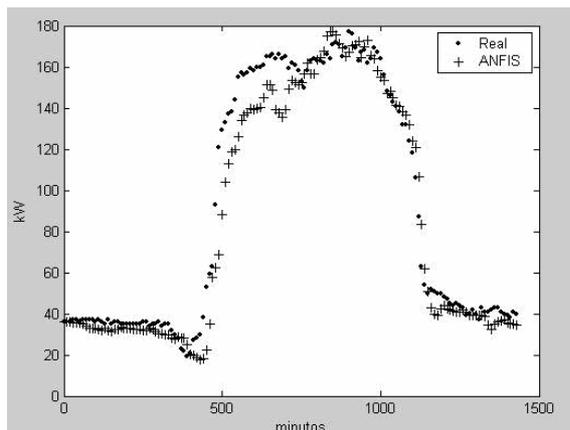


Figura 7 – Saída real e saída ANFIS para a segunda-feira3

#### 4.2 Previsão de alocação de carga harmônica em transformadores

Para a previsão de alocação de carga harmônica (DHTi%) foi utilizado diversos dias da semana para procurar as semelhanças entre os diversos perfis. Sendo que para cada dia da semana foram utilizados 5 conjuntos de medições do mesmo dia, sendo estas medições iniciadas a zero hora e terminadas as 24 horas do mesmo dia.

##### Previsão da Distorção Harmônica Total de corrente (DHTi%)

A modelagem da Distorção foi feita utilizando quatro das cinco medições para o treinamento e a quinta para a validação. O primeiro conjunto de dados foi treinado alterando o número de funções de pertinência de 3 até o valor onde o erro máximo foi atingido. Após a determinação do número de funções de pertinência feita pelo primeiro conjunto de dados de treino, foi mantido o mesmo número de funções de pertinência para os outros três conjuntos de dados de entrada, variando somente o número de épocas de treinamento, até atingir o valor máximo de erro que foi escolhido como 0,5.

Para a criação do modelo ANFIS do dia de segunda-feira, foram necessárias 20 funções de pertinência para se garantir o erro máximo requerido. Na Figura 8, pode-se observar que a resposta da rede ANFIS para o quinto conjunto de dados comparada com a rede real praticamente coincide durante o período de aproximadamente 7 horas até as 9 horas, e que durante o período aproximado de 9 horas até as 21 horas o erro teve um valor relativamente pequeno. Vale ressaltar também que mesmo nos valores onde o erro é grande a rede prevê a tendência da DHTi%.

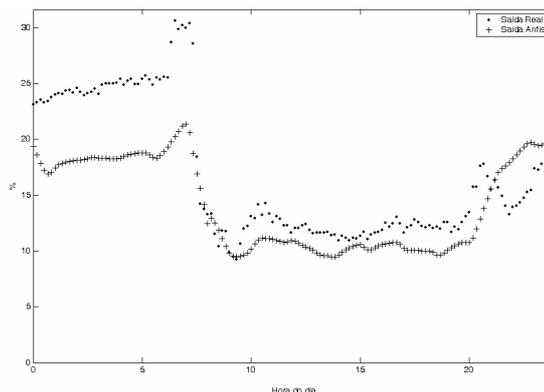


Figura 8 - Previsão de DHTi% para um transformador de 300kVA para uma segunda-feira comum.

Já para um dia de terça-feira, o modelamento do perfil do DHT precisou de 17 funções de pertinência para garantir o erro até o máximo exigido. Após isso foi utilizado os outros três conjuntos de dados para o restante do treinamento que consistiu em manter as 17 funções de transferências e variar somente o valor do número de épocas até alcançar o erro máximo.

Na Figura 9, que apresenta a resposta da rede ANFIS e da rede real, pode-se verificar que os valores das duas são muito semelhantes, tendo horários onde o valor dos dois foram coincidentes.

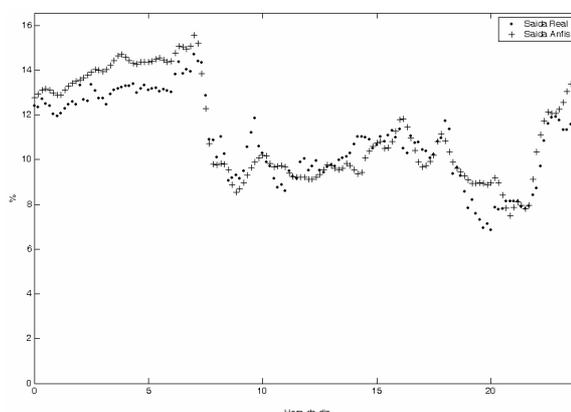


Figura 9 - Previsão de DHTi% para um transformador de 300kVA para uma terça-feira comum.

A saída real comparada com a saída da rede ANFIS para o quinto conjunto de dados pode ser vista na Figura 10. Os dados são de uma sexta-feira, o modelo ANFIS foi feito utilizando o mesmo procedimento descrito para os dias de segunda-feira e terça-feira. O número de funções de pertinências requeridas foi de 20. Vale destacar mais uma vez que a resposta da rede se aproximou muito da resposta real, sendo que a rede ANFIS quando não deu uma resposta tão

próxima da real, continuou a acompanhar a forma da saída real.

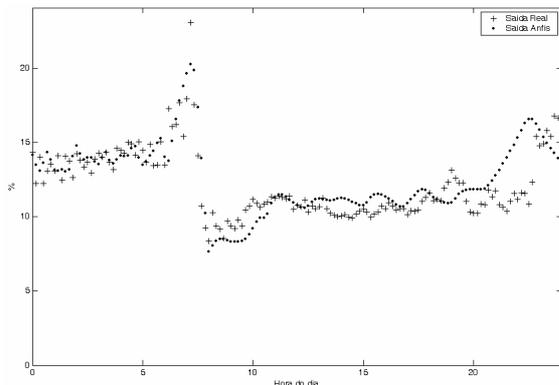


Figura 10 - Previsão de DHTi% para um transformador de 300kVA para uma sexta-feira comum.

Pode-se também fazer uma análise entre os três dias da semana, onde os dias de segunda-feira e sexta-feira apresentam uma forma de onda muito parecida. Isto se deve ao fato destes dois dias terem um perfil parecido, já que um representa a volta ao trabalho após o final de semana e o outro o início de uma nova semana de trabalho. Já o perfil da terça-feira foi um pouco diferente.

## 5.0 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a implementação de um sistema computacional, utilizando rede *Neuro-Fuzzy ANFIS*, que faz a previsão de carga em transformadores de distribuição de energia em 60 Hz e nas frequências harmônicas – através da Distorção Harmônica Total de Corrente Percentual (DHTi%) - procurando descrever de forma aproximada o comportamento dos transformadores da rede de distribuição, nos diversos períodos do dia, da semana e do ano.

Tanto para a frequência fundamental quanto para o DHTi%, observa-se que o modelo desenvolvido em grande parte dos pontos previstos foram coincidentes com os pontos reais. Comprovando desta forma que a rede *Neuro-Fuzzy ANFIS* é uma boa ferramenta para ser utilizada na previsão de carga de transformadores.

Em todos os casos implementados a resposta da rede se aproximou muito da resposta real. Mesmo para situações em que a rede *ANFIS* não apresenta uma resposta tão próxima da real, ela acompanha a forma da saída esperada.

Este trabalho, por ter apresentado resultados promissores, será utilizado em futuro estudos de fluxo de carga harmônico para redes de distribuição.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. Controle e Modelagem FUZZY. Ed. Edgard Blücher LTDA. 1ª Edição.
- (2) Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, 1998 by The MathWorks, Inc.
- (3) Li-Xin Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control, 1997 by Prentice Hall, Inc.
- (4) Tostes, M. E. L.; "Avaliação de Impactos na Rede de Distribuição Causados pela geração de Harmônicos em Consumidores em baixa Tensão"; Tese de Doutorado Defendida em Dezembro de 2003, Curso de pós – Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.

