

CONVENCION INTERNACIONAL DE LA INGENIERIA EN CUBA CIIC 2010

Evento: VI Conferencia de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial.
CIMEI 2010

Título: Proposta de um algoritmo para diagnosticar a qualidade de energia elétrica utilizando lógica fuzzy.

Autores:

Benevaldo Pereira Gonçalves¹

benevaldo@gmail.com

Jandecy Cabral Leite²

jandecy.cabral@itegam.org.br

Carlos Tavares da Costa Junior³

cartav@ufpa.br

Maria Emilia de Lima Tostes⁴

tostes@ufpa.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta de um algoritmo para diagnosticar a qualidade de energia elétrica através do indicador THD (total de distorção harmônica) em sistema trifásico de baixa tensão utilizando um sistema de inferência Fuzzy.

Palavras-chaves: Qualidade de Energia, Harmônica, Indicador THD, Diagnóstico, Sistema de Inferência Fuzzy.

ABSTRACT

This article presents an algorithm for diagnosing the quality of electric power by the indicator THD (total harmonic distortion) at low voltage three-phase system using a fuzzy inference system.

Key-Words: Power Quality, Harmonics, THD Indicator, Diagnosis, Fuzzy Inference System.

1 - INTRODUÇÃO

O termo qualidade de uma forma geral é um item que tem sido almejado por todos os setores. Este conceito procura assegurar que o produto vai atender às necessidades do consumidor. A qualidade associada à energia elétrica é ainda mais importante, pois está presente nos mais diversos ambientes seja em residências ou na cadeia produtiva.

Com a demanda de energia exigida para manter um grande parque consumidor surge à preocupação com a continuidade do serviço, isto é, ter uma matriz energética capaz de atender as necessidades dos consumidores e por outro lado, tão importante quanto, a questão da qualidade da energia elétrica, foco do presente estudo.

1 Benevaldo Pereira Gonçalves é pesquisador do Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia – ITEGAM

2 Jandecy Cabral Leite é pesquisador do Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia – ITEGAM

3 Carlos Tavares da Costa Junior é professor do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pará (UFPA)

4 Maria Emilia de Lima Tostes é professora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pará (UFPA)

Conceitualmente a Qualidade de Energia está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestada na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Para proporcionar um uma avaliação da qualidade de energia sob a ótica das distorções harmônicas como ferramenta de mensuração pode-se utilizar o indicador da Taxa de Distorção Harmônica (THD) tendo como resultado um diagnóstico representativo da qualidade de energia. O presente trabalho tem o escopo de propor um algoritmo para diagnosticar a qualidade de energia elétrica afetada pelos distúrbios provenientes das distorções harmônicas analisando o indicador de taxa de distorção harmônica (THD) através de um sistema de inferência Fuzzy em sistema trifásico de baixa tensão.

2 – HARMÔNICO E LÓGICA FUZZY

2.1 Harmônico

Definição: Harmônicos do sistema de potência são definidos como tensão e correntes senoidais em frequências que são múltiplos inteiros da principal gerado (ou fundamental) de frequência [1].

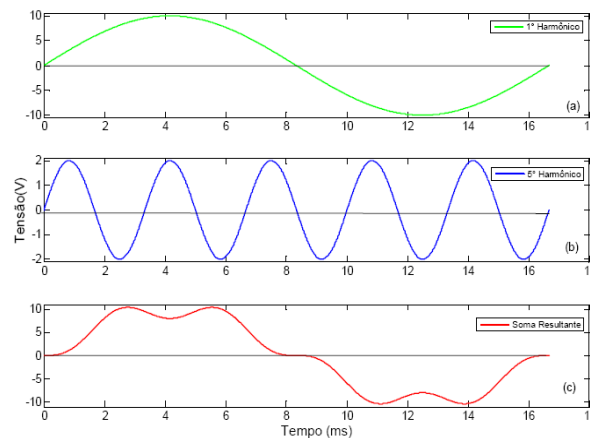


FIGURA 1: Tensão normal adicionada da 5ª harmônica resultando o sinal distorcido.

2.1.1 - Impactos Harmônicos:

Efeitos de distorção harmônicos: Uma vez que as fontes harmônicas estão claramente definidas, devem ser interpretados em termos dos seus efeitos sobre o resto do sistema em pessoal e equipamento externo ao sistema de potência [1]. Cada elemento do sistema de alimentação deve ser examinado para a sua sensibilidade harmônica como base para as recomendações sobre os níveis permitidos. Os principais efeitos da tensão e harmônicas de corrente dentro do sistema de alimentação são [2], [3]:

- A possibilidade de ampliação dos níveis de harmônicas resultantes de série e em paralelas ressonâncias.
- Uma redução na eficiência de geração, transmissão e utilização da energia elétrica.
- O envelhecimento do isolamento dos componentes de instalações elétrico com conseqüente encurtamento de sua vida útil.
- O mau funcionamento do sistema ou fábrica de componentes.

Entre os possíveis efeitos externos dos harmônicos são uma degradação na comunicação sistemas de desempenho, ruído audível excessiva e harmônica induzida por tensão e correntes [4].

2.2 Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy ou nebulosa é uma das tecnologias atuais bem sucedidas para o desenvolvimento de sistemas para controlar processos sofisticados [7]. Com sua utilização, requerimentos complexos podem ser implementados em controladores simples, de fácil manutenção e baixo custo. O uso de sistemas construídos desta maneira, chamados de controladores nebulosos, é especialmente interessante quando o modelo matemático está sujeito a incertezas [18].

A teoria dos conjuntos fuzzy ou nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 com os trabalhos de Lotfi Zadeh, professor na Universidade da Califórnia em Berkeley [16].

Formalmente, um conjunto nebuloso A do universo Ω é definido por uma função de pertinência $\mu_A: \Omega \rightarrow [0,1]$. Essa função associa a cada elemento x de Ω o grau $\mu_A(x)$, com o qual x pertence a A [1]. A função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

- $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
- $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

Um controlador nebuloso é um sistema nebuloso a base de regras, composto de um conjunto de regras de produção do tipo **Se** <premissa> **Então** <conclusão>, que definem ações de controle em função das diversas faixas de valores que as variáveis de estado do problema podem assumir [18]. Estas faixas de valores são modeladas por conjuntos nebulosos e denominadas de termos lingüísticos.

Sistema de Inferência Fuzzy: É um processo de formulação de cartografia a partir de uma determinada entrada para uma saída utilizando a lógica fuzzy. A inferência fuzzy tem sido aplicada com sucesso em domínios com ao controle automático de dados classificados, a análise de decisão, sistemas de peritos e visão computacional [8]. Devido sua natureza multidisciplinar, a inferência fuzzy dos sistemas está associada a umas séries de nomes, tais como a regra de sistemas base-fuzzy, fuzzy expert systems, fuzzy modelagem, fuzzy com memória associativa [9], [10].

O método Mandani de Inferência fuzzy é o mais comumente visto através da metodologia fuzzy. O método Mandani foi um dos primeiros sistemas de controle construídos usando teoria de conjunto fuzzy [11] como uma tentativa de controlar a combinação de síntese de um conjunto de regras lingüísticas com controles obtidos a partir de operadores com experiência humana. A técnica Mandani mede esforço baseado na teoria de Lotfi Zadeh através dos sistemas de algoritmos fuzzy complexos e processos na tomada de decisão [12].

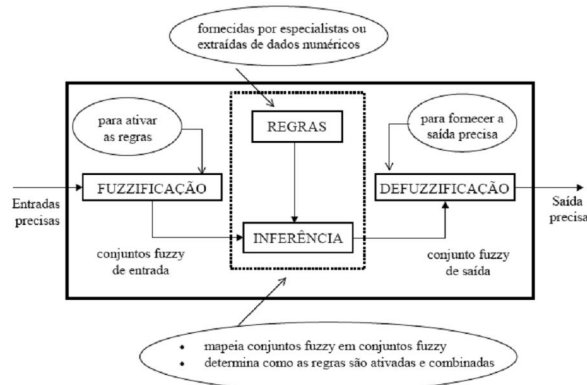


FIGURA 2: Estrutura de um sistema de inferência Fuzzy.

3 – ALGORITMO PROPOSTO

O Algoritmo proposta para auxiliar o diagnóstico das distorções harmônicas em sistema elétrico trifásico de baixa tensão está dividido nos seguintes passos:

PASSO 01: Realização da leitura.

O passo inicial para realizar o diagnóstico é efetuar o processo de leitura da corrente e tensão no sistema elétrico desejado através de um equipamento devidamente calibrado e seguindo as normas do IEC 61000-4-7 e 61000-4-30. O respectivo equipamento deverá gerar um arquivo de saída com os valores, para cada fase, da tensão, corrente, frequência, e principalmente os valores das componentes harmônicas da 2ª até a 50ª ordem de onde será calculado o THD de corrente e tensão.

PASSO 02: Formulação do Diagnóstico.

Nesta fase será realizada a formulação do diagnóstico, isto é, como o algoritmo proposto irá analisar e diagnosticar as distorções harmônicas. O primeiro passo é definir qual indicador representa de forma eficiente as distorções harmônicas, para isso será utilizado o indicador THD (total de distorção harmônica) que traduz através de uma só grandeza a deformação da onda em tensão ou em corrente.

A norma **IEEE 519-1992** (Harmonic in Power System) estabelece limites para distorção harmônica de corrente e tensão em circuito de distribuição e transmissão para sistema de baixa tensão. Como não existe consenso a respeito dos valores, será tomado como referência o limite indicado em SCHNEIDER (2005), onde para a tensão (THD_U) e corrente (THD_I) adota-se:

Para tensão THD_U:

- Tipo de diagnóstico: NORMAL
 - Ocorrência: valor de THD de tensão inferior a 5% classificado como valor baixo.
 - Característica do diagnóstico: algum disfuncionamento não é temido.
- Tipo de diagnóstico: SIGNIFICATIVO
 - Ocorrência: valor de THD de tensão compreendido entre 5 e 8% classificado como valor médio.
 - Característica do diagnóstico: quaisquer disfuncionamento são possíveis.
- Tipo de diagnóstico: CRÍTICO
 - Ocorrência: valor de THD de tensão superior a 8% classificado como valor alto.
 - Característica do diagnóstico: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Para corrente THD_I:

- Tipo de diagnóstico: NORMAL
 - Ocorrência: valor de THD de corrente inferior a 10% classificado como valor baixo.
 - Característica do diagnóstico: algum disfuncionamento não é temido.
- Tipo de diagnóstico: SIGNIFICATIVO
 - Ocorrência: valor de THD de corrente compreendido entre 10 e 50% classificado como valor médio.
 - Característica do diagnóstico: existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes.

- Tipo de diagnóstico: CRÍTICO
 - Ocorrência: valor de THD de corrente superior a 50% classificado como valor alto
 - Característica do diagnóstico: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Para cada leitura de tensão e corrente realizada em um determinado período será gerada um conjunto de componentes harmônico da 2ª até a 50ª ordem para cada fase do sistema elétrico trifásico.

Os conjuntos de harmônicas geradas de uma leitura serão utilizados para calcular o THD de tensão e corrente respectivamente, conseqüentemente este procedimento irá criar um novo conjunto de THD de tensão e corrente referente ao período da leitura é desse novo conjunto que será determinado o THD **representativo** utilizado no procedimento de diagnóstico. Para realizar o cálculo do THD de cada leitura será utilizada a seguinte fórmula:

Para tensão:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

Onde:

THD_u = representa o THD de tensão de uma leitura;
 U₁ = harmônica de tensão fundamental;
 U_h = harmônica de tensão de ordem n;
 h = harmônica de tensão inicial de ordem 2;

Para corrente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

THD_i = representa o THD de corrente de uma leitura;
 I₁ = harmônica de corrente fundamental;
 I_h = harmônica de corrente de ordem n;
 h = harmônica de corrente inicial de ordem 2;

Para determinar o THD representativo deve-se calcular a média aritmética dos THD calculados retirando os valores dos THD que estão dentro do padrão definido na norma **IEEE 519-1992**.

PASSO 03: Elaboração do sistema de inferência Fuzzy para determinar o diagnóstico.

Como um sistema de inferência Fuzzy é constituído de um processo de fuzzificação (variáveis de entrada), defuzzificação (variáveis de saída), mecanismo de inferência apoiado por um especialista (norma regulamentadora IEEE 519-1992 e SCHNEIDER (2005)) temos a definição das variáveis de entrada e saída.

3.1 - Definição das variáveis de Entrada

Para tensão:

- Variável lingüística: THD_U
- Termo lingüístico:

- Baixo: THD de tensão inferior a 5%.
- Médio: THD de tensão entre 5 e 8%.
- Alto: THD de tensão acima de 8%.

Para corrente:

- Variável lingüística: THD_I
- Termo lingüístico:
 - Baixo: THD de corrente inferior a 10%.
 - Médio: THD de corrente entre 10 e 50%.
 - Alto: THD de corrente acima de 50%.

3.2 - Definição da variável de Saída

- Variável lingüística: DIAGNÓSTICO
- Termo lingüístico:
 - N (normal): THD de tensão e corrente normais.
 - IS&UN: THD de corrente significativo e THD de tensão normal.
 - IC&UN: THD de corrente crítico e THD de tensão normal.
 - IN&US: THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
 - S: THD de corrente e de tensão significativo.
 - IC&US: THD de corrente crítico e THD de tensão significativo.
 - IN&UC: THD de corrente normal e THD de tensão crítico.
 - IS&UC: THD de corrente significativo e THD de tensão crítico.
 - C: THD de corrente e de tensão crítico.

3.3 - Definição do método de inferência:

- Mamdani

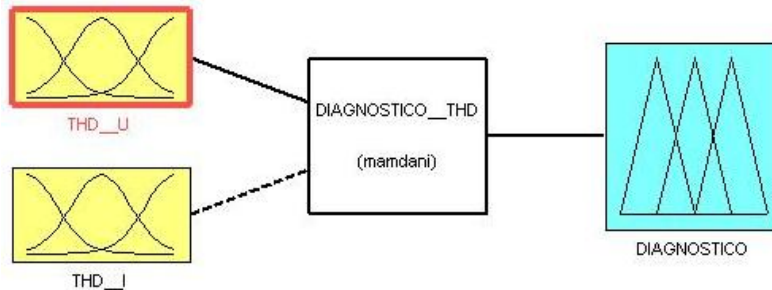


FIGURA 3: Sistema de inferência Fuzzy proposto.

A figura 03 representa o sistema de inferência fuzzy proposto onde: [THD_U] – representa a variável de entrada de tensão. [THD_I] - representa a variável de entrada de corrente. [DIAGNÓSTICO_THD] – representa o sistema de inferência mamdani. [DIAGNÓSTICO] – representa a variável de saída do diagnóstico.

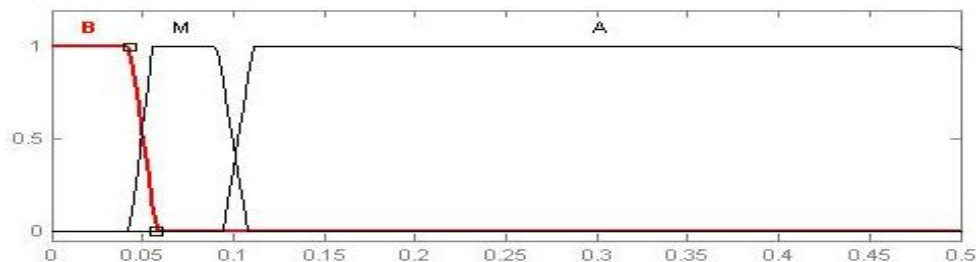


FIGURA 4: Função característica da variável THD_U.

A figura 04 representa a variável de entrada da tensão THD_U onde: [B] - representa o valor baixo (THD de tensão menor que 5%). [M] representa o valor médio (THD de tensão entre 5% e 8%). [A] - representa o valor alto (THD de tensão acima de 8%)

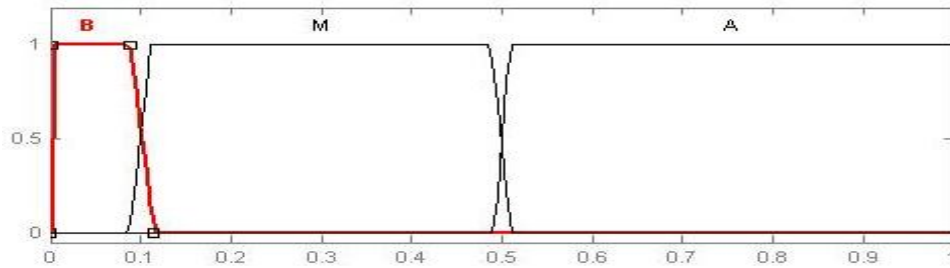


FIGURA 5: Função característica da variável THD_I.

A figura 05 representa a variável de entrada de corrente THD_I onde: [B] - representa o valor baixo (THD de corrente menor que 10%). [M] representa o valor médio (THD de corrente entre 10% e 50%). [A] - representa o valor alto (THD de corrente acima de 50%)

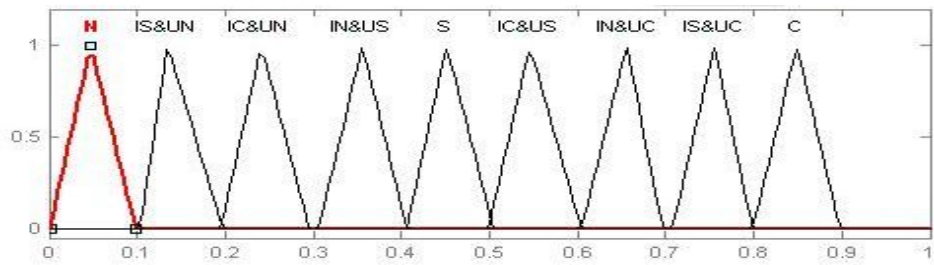


FIGURA 6: Função característica da variável de saída DIAGNÓSTICO.

3.4 - Definição das Regras Fuzzy

Se THD_U é BAIXO E THD_I é BAIXO
Então DIAGNOSTICO é N;

Se THD_U é BAIXO E THD_I é MÉDIO
Então DIAGNOSTICO é IS&UN;

Se THD_U é BAIXO E THD_I é ALTO
Então DIAGNOSTICO é IC&UN;

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é BAIXO
Então DIAGNOSTICO é IN&US;

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é MÉDIO
Então DIAGNOSTICO é S;

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é ALTO
Então DIAGNOSTICO é IC&US;

Se THD_U é ALTO E THD_I é BAIXO
Então DIAGNOSTICO é IN&UC;

Se THD_U é ALTO E THD_I é MÉDIO
Então DIAGNOSTICO é IS&UC;

Se THD_U é ALTO E THD_I é ALTO
Então DIAGNOSTICO é C;

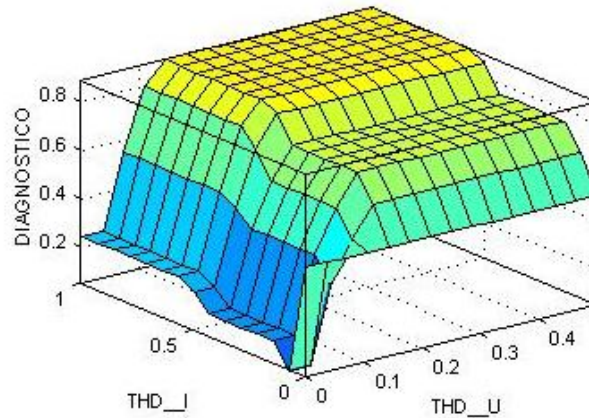


FIGURA 7 - Gráfico de superfície do diagnóstico em função do THD_I e THD_U.

3.5 – Classificação do valor da variável de saída DIAGNÓSTICO

Diagnóstico: Normal

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,1$ }

Diagnóstico: THD de corrente significativo e THD de tensão normal

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,1 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,2$ }

Diagnóstico: THD de corrente crítico e THD de tensão normal

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,2 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,3$ }

Diagnóstico: THD de corrente normal e THD de tensão significativo

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,3 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,4$ }

Diagnóstico: THD de corrente e de tensão significativo

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,4 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,5$ }

Diagnóstico: THD de corrente crítico e THD de tensão significativo

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,5 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,6$ }

Diagnóstico: THD de corrente normal e THD de tensão crítico

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,6 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,7$ }

Diagnóstico: THD de corrente significativo e THD de tensão crítico

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,7 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,8$ }

Diagnóstico: THD de corrente e de tensão crítico

$0,8 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,9$

{DIAGNÓSTICO | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,8 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,9$ }

4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO PROPOSTO



FIGURA 8 - Fluxograma do Algoritmo.

5 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Na execução de todos os passos do algoritmo pose-se aplicá-lo no seguinte contexto:

Para um período de leitura que gera um THD de tensão de 20% e THD de corrente de 50% representativo implica no seguinte diagnóstico:

DIAGNÓSTICO

Tendo como entrada no sistema de inferência fuzzy as variáveis $THD_U = 0,2$ (20%) e $THD_I = 0,5$ (50%) o valor gerado para variável de saída DIAGNÓSTICO é 0,857. Dessa forma executando o passo 3.5 (classificação do valor da variável de saída) temos:

Tipo do diagnóstico:

THD DA CORRENTE E TENSÃO CRÍTICO

Características:

- Disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

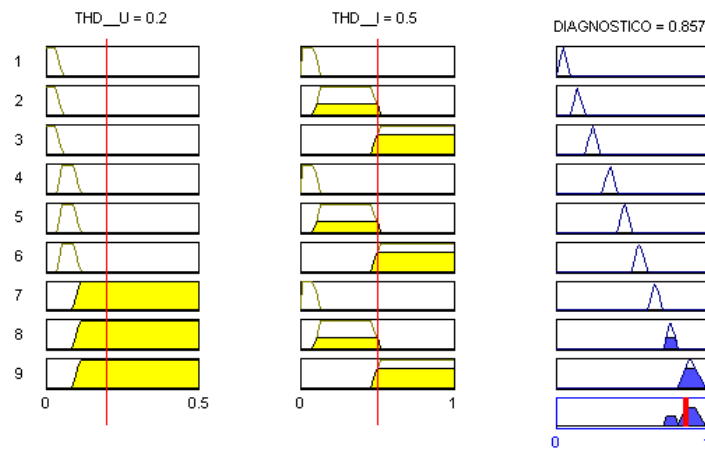


FIGURA 9 - Valor da variável DIAGNÓSTICO através da ativação das regras das variáveis de entrada THD_U e THD_I .

6 – CONCLUSÃO

O algoritmo proposta apresenta um conjunto de passos que permitem efetuar uma análise dos dados lidos do sistema elétrico e gerar um diagnóstico do indicador THD da tensão e da corrente em sistema trifásico de baixa tensão.

Dessa forma o referido trabalho pretende contribuir como uma ferramenta de apoio no processo de diagnóstico da qualidade de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS: A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – **FAPEAM** pelo apoio financeiro dado a está pesquisa através da Bolsa de Estudo ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pará (**UFPA**).

REFERÊNCIAS

- [1] ARRILLAGA, and WATSON, N.R. **Power Systems Harmonics**, 2a. Ed. John Wiley & Sons, Ltd U.S.A.2003.
- [2] IEEE/ANSI C57.110-1998, **IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents**. IEEE, New York.
- [3] CCITT Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines against Harmful Effects from Electricity Lines, International Telecommunications Union, Geneva, 1963.
- [4] IEEE 519-1992, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems** (ANSI). IEEE, New York.1992.
- [5] DUBOIS, D and H. Prade, **Fuzzy and Sets Systems: Theory and applications**. Academic Press, New York, 1980.
- [6] RUSS, Eberhart, SIMPSON,Pat, OBBINS, Roy. **Computational Intelligence PC tools**, London: ed. AP Professional, 1996.
- [7] KLIR, George, CLAIR, Ute H. St., YUAN, Bo. **Fuzzy Set Theory – Foundations and Applications**, Estados Unidos: ed. Prentice Hall, 1997.
- [8] MUKAIDONO, Masao. **Fuzzy Logic for beginners**, Singapore: ed. World Scientific, 2001.
- [9] JANG, J.S. and C. T. SUN. **Neuro-fuzzy modeling and control**, Proceedings of the IEEE, March, 1995.
- [10] MANDANI, E. H. and S. ASSILIAN. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. International Journal of Man-Machine Studies. Vol 7 n° 1, pp. 1-13, 1975.
- [11] SUGENO, M. **Industrial applications of fuzzy**. Elsevier Science Rub. Co., 1985.
- [12] ZADEH, L.A. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes**. IEEE transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol 3. n° 1, pp. 28-44, Jan, 1973.
- [13] OLIVEIRA, C. G. et al. **Estudo de caso de eficiência energética e qualidade de energia elétrica**. 6p. Anais do VIII Induscon Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas/MG, 2008.
- [14] L. A. Zadeh. **Fuzzy Sets, Information and Control**, 8:338 – 353, 1965.
- [15]SCHNEIDER (2005). **Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Qualidade de Energia – Harmônicas**. Apostila da Schneider Electric e Procobre, download disponível em www.schneider.com.br
- [16] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. **Fuzzy Sets, Information and Control**, 8:338 – 353., 1965.
- [17] **Fuzzy Open-Loop Attitude Control for the FAST Spacecraft**, San Diego - CA, Julho 1996. Proc. of the NASA AIAA, Guidance, Navigation and Control Conference.
- [18] G. J. Klir and T. A. Folger. **Fuzzy Sets, Uncertainty, and Informations**. Prentice Hall, Englewood Cliffs - New Jersey, 1988.