CONVENCION INTERNACIONAL DE LA INGENIERIA EN CUBA
CIIC 2010

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

Título: Lógica fuzzy aplicada ao estudo da qualidade de energia elétrica em um sistema com distorções harmônicas através do fator de potência

Autores:
Jorge de Almeida Brito Júnior[1]
Jandercy Cabral Leite[2]
Carlos Tavares da Costa Júnior[3]
Maria Emília de Lima Torres[4]
[1] Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia
e-mail: jorgebritojr@gmail.com
[2] Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia
e-mail: jandercy.cabral@itegam.org.br
[3] Universidade Federal do Pará
e-mail: cartav@ufpa.br
[4] Universidade Federal do Pará
e-mail: tostes@ufpa.br

Resumo

Este artigo tem o objetivo de apresentar o estudo de um sistema trifásico de baixa tensão com distorções harmônicas através do fator de potência com a aplicação da lógica *fuzzy* diminuindo assim conseqüências como perdas na instalação, quedas de tensão, subutilização da capacidade instalada, visando a otimização do uso da energia elétrica trazendo vantagens tanto para a empresa como para a concessionária.

Palavras-Chaves: *Energia Elétrica, Fator de Potência, Distorções Harmônicas, Lógica Fuzzy.*

Abstract

This paper aims to present the study of a three-phase system of low voltage with harmonic distortion through the power factor with application of fuzzy logic, reducing consequences as well as losses in the installation, voltage drops, under-utilized capacity, trying optimize the use of electricity, providing benefits for the company and for the concessionaire.

Key-Words: *Electric power, Power Factor, Harmonic Distortion, Fuzzy logic.*

CONVENCION INTERNACIONAL DE LA INGENIERIA EN CUBA
CIIC 2010

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

Título: Lógica fuzzy aplicada ao estudo da qualidade de energia elétrica em um sistema com distorções harmônicas através do fator de potência

Autores:
Jorge de Almeida Brito Júnior[1]
Jandercy Cabral Leite[2]
Carlos Tavares da Costa Júnior[3]
Maria Emília de Lima Torres[4]
[1] Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia
e-mail: jorgebritojr@gmail.com
[2] Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia
e-mail: jandercy.cabral@itegam.org.br
[3] Universidade Federal do Pará
e-mail: cartav@ufpa.br
[4] Universidade Federal do Pará
e-mail: tostes@ufpa.br

Resumo

Este artigo tem o objetivo de apresentar o estudo de um sistema trifásico de baixa tensão com distorções harmônicas através do fator de potência com a aplicação da lógica *fuzzy* diminuindo assim conseqüências como perdas na instalação, quedas de tensão, subutilização da capacidade instalada, visando a otimização do uso da energia elétrica trazendo vantagens tanto para a empresa como para a concessionária.

Palavras-Chaves: *Energia Elétrica, Fator de Potência, Distorções Harmônicas, Lógica Fuzzy.*

Abstract

This paper aims to present the study of a three-phase system of low voltage with harmonic distortion through the power factor with application of fuzzy logic, reducing consequences as well as losses in the installation, voltage drops, under-utilized capacity, trying optimize the use of electricity, providing benefits for the company and for the concessionaire.

Key-Words: *Electric power, Power Factor, Harmonic Distortion, Fuzzy logic.*

1 Introdução

Com o avanço da tecnologia que vem acontecendo nos últimos anos e a complexidade que produtos baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos vêm

adquirindo, torna-se preocupante o fator qualidade de energia elétrica, o qual em uma indústria é muito importante em virtude de equipamentos existentes dentro dela.
Dentro de uma rede elétrica existem cargas não lineares, geradas por vários equipamentos tais como motores, geradores, transformadores, cabos de alimentação, capacitores e equipamentos eletrônicos, os quais são responsáveis por distúrbios dentro da rede, tais distúrbios geram distorções harmônicas. Altos níveis de distorção harmônica na rede elétrica podem gerar problemas para a concessionária distribuidora de energia elétrica e para a própria unidade consumidora em relação aos próprios equipamentos instalados.
Um elemento de grande importância para a qualidade de energia elétrica é o fator de potência, pois ele indica a eficiência do uso da energia, ou seja, um alto fator de potência indica uma eficiência alta e um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética, no Brasil o padrão limite para o fator de potência é de no mínimo 0.92, logo um fator de potência menor que o limite estabelecido é taxado com multa pela concessionária.
Este trabalho apresenta uma forma de avaliar pelo fator de potência de uma rede elétrica o grau de eficiência energética de uma determinada unidade consumidora através de um sistema de inferências *fuzzy.*

2 Fator de potência

Dentre as cargas existentes dentro da rede elétrica, uma parte consome energia reativa indutiva, tais como motores, geradores, transformadores e outros equipamentos, essas unidades consumidoras utilizam dois tipos de potências, potência ativa e potência reativa.
A potência ativa medida em kWh é o que de fato gera trabalho e faz os motores e geradores funcionarem, a potência reativa medida em kVArh não realiza trabalho, no entanto é necessária para o funcionamento de motores e geradores através de campos magnéticos que circulam por esses elementos na rede, então essas duas formas de energia juntas resultam na potência aparente[7].
A relação entre as potências descritas pode ser representada pelo triângulo de potências.

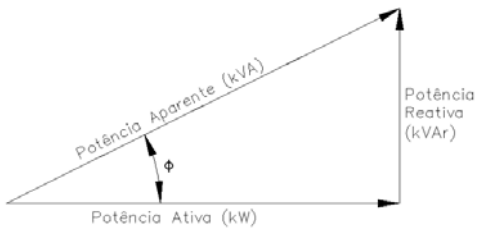

Figura 1: Triângulo de potências

O fator de potência pode ser expresso por:

$$FP = \frac{kW}{KVA} = \cos\varphi = \cos(arctg\,\frac{k\,\mathrm{var}}{kW}) \qquad (1)$$

Por definição o fator de potência sempre está entre 0 e 1.

O fator de potência é utilizado como parâmetro de medição da defasagem entre tensão e corrente que circulam pela rede elétrica, que é determinado pelos tipos de cargas dentro da rede elétrica:

- Cargas Resistivas – Em uma rede com cargas resistivas a tensão e corrente estão em fase, com defasagem 0, logo o fator de potência é 1.
- Cargas Indutivas – A carga indutiva provoca um atraso na corrente, e isso ocorre devido aos campos magnéticos criados por enrolamentos de fios existentes em cargas indutivas, então em uma rede puramente indutiva o ângulo é de 90^0, logo o fator de potência é igual a 0.
- Cargas Capacitivas – A carga capacitiva provoca um atraso de tensão e ocorre devido aos campos elétricos criados pelos capacitores existentes nessas cargas, então em uma rede puramente capacitiva o ângulo é de 90^0, logo o fator de potência é igual a 0.

Isso normalmente não acontece, o comum é uma rede elétrica mista de cargas, uma carga pode ter características resistivas e indutivas e resistivas e capacitivas, nunca capacitiva e indutiva, dependendo do grau dessas misturas o ângulo de defasagem varia no range de 0^o a 90^o.

2.1 Normas relativas aos fatores de potência

No Brasil, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão responsável de fiscalizar e regularizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no país, estabelece alguns aspectos os quais devem ser abordados relacionados ao fator de potência[4]:

- O limite mínimo do fator de potência é de 0.92;
- O faturamento da energia reativa excedente;
- O período de avaliação do fator de potência dever ser horário.
- O fator de potência deve de no mínimo de 0.92 capacitivo das 6h as 24h
- O fator de potência deve ser no mínimo de 0.92 indutivo das 24h as 6h

Dessa maneira as concessionárias faturam a quantidade de energia ativa que poderia ser transportado no espaço ocupado pelo consumo de energia reativa.
O excedente reativo excedente é avaliado pela concessionária, que é calculado com base nos valores de energia ativa e de energia reativa medidos.
A ANEEL estabelece que o fator de potência de unidades consumidoras com sistema trifásico de baixa tensão deve ser verificado através de medição transitória, desde que por um período mínimo de 7 dias consecutivos

2.2 – Conseqüências e causas que geram um baixo fator de potência

As quantidades elevadas de energia reativa na rede são responsáveis pelo baixo fator de potência, o que resulta num aumento da corrente total que circula na rede de distribuição da concessionária e das unidades consumidoras, exigindo-se que as concessionárias possuíssem uma rede elétrica com capacidade muito grande para

suportar enormes correntes, por esse motivo é exigido que o fator de potência seja de no mínimo 0.92.
É possível listar algumas causas para o baixo fator de potência[7]:

- Transformadores trabalhando em vazio ou sobrecarregados;
- Motores trabalhando mais que o exigido no trabalho;
- Reatores de baixo fator de potência na iluminação;
- Máquinas de solda;
- Fornos de indução ou a arco.

O baixo fator de potência traz algumas conseqüências tais como:

- Perdas elétricas na instalação
- Quedas de tensão
- Redução do aproveitamento dos transformadores
- Condutores aquecidos

2.3 Fator de potência e harmônicas

Com a existência de distorções harmônicas na rede elétrica a avaliação do sistema é feita com mais uma variável, a qual pode ser vista na figura abaixo com uma terceira dimensão no triângulo de potências.

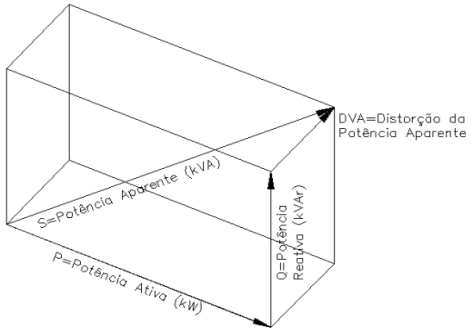

Figura 2: Paralelepípedo representando a relação entre as potências e a distorção harmônica

O fator de distorção é a outra parcela que entra na fórmula do fator de potência, quando é levando em consideração tanto a diferença de fase entre tensão e corrente como a distorção harmônica existente é dito fator de potência real.
Determinação da distorção harmônica total:

$$THD = [\frac{\sqrt{V_2^{\,2} + V_3^{\,2} + V_4^{\,2} + ... + V_n^{\,2}}}{V1}].100(Tensão) \qquad (2)$$

$$THD = [\frac{\sqrt{I_2^{\,2} + I_3^{\,2} + I_4^{\,2} + ... + I_n^{\,2}}}{I1}].100(Corrente) \qquad (3)$$

Cálculo do fator de potência real:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}}.\cos\varphi \qquad (4)$$

2.4 Sistema com Lógica fuzzy

A ferramenta de lógica *fuzzy* foi introduzida em 1965 por Loft Zadeh. A teoria *fuzzy* representa um mecanismo para trabalhar com construções liguísticas, tais como, “muito”, “baixo”, “médio” , “freqüente”. Ou seja, a lógica *fuzzy* fornece uma estrutura de inferência capaz de encontrar resultados como se fosse um humano. Do contrário da lógica binária, onde em sua estrutura só existem duas respostas, o “1 ou 0”, “certo ou errado”[3].

Bem a lógica *fuzzy* funciona da seguinte maneira, tendo um conjunto de entrada e um conjunto de saídas, as variáveis de entrada entram em um conjunto de regras que são avaliadas em paralelo para dar um determinado intervalo que se encontrada no conjunto da saída.[6].

Uma característica que existe nos conjuntos *fuzzy,* são as funções de pertinência. A função de pertinência define o quanto um elemento faz parte de outro conjunto. A função de pertinência é uma função que associa um ponto no conjunto X a um número real, normalmente compreendido entre o intervalo [0, 1] [9]. Um conjunto *fuzzy* pode ser definido por diversas funções de pertinência, não existindo uma única capaz de delimitar o conjunto *fuzzy* [8].

Existem diversas operações elementares que podem ser realizadas nos conjuntos *fuzzy* que têm como base a teoria de conjuntos clássicos [2]. As mais utilizadas são a união, intersecção e complemento

As regras *fuzzy*, substituem um modelo matemático por um conjunto de regras, que definem os procedimentos necessários a serem tomados diante das situações apresentadas pelas entradas.

O modelo de Mamdani [1], o qual é utilizado no sistema *fuzzy* deste artigo utiliza conjuntos *fuzzy* também nos conseqüentes das regras *fuzzy*. A saída final é representada por um conjunto *fuzzy* resultante da agregação da saída inferida de cada regra. Para se obter a saída usa-se um dos métodos de defuzzificação, Média dos Máximos (MOM), Centro de Massa (COG) ou Centro de Área (COA).

3 Estrutura do algoritmo proposto

O modelo do sistema proposto visa avaliar um sistema de rede elétrica levando em consideração o fator de potência e as distorções harmônicas, os dados necessários para a análise é apenas o fator de potência, as distorções harmônicas de tensão e corrente e a hora em que foram feitas as medições

Como já foi explicado a forma de medição do fator de potência no Brasil, tem um momento que é medido fator de potência capacitivo e outro momento indutivo, levando isso em consideração foi divido as variáveis de entrada para o sistema *fuzzy* em 5, onde quando o fator de potência for indutivo no horário que de ser medido capacitivo ele é considerado “1”, e quando o fator de potência for capacitivo no horário que deve ser medido indutivo ele é considerado “1”, de tal forma que no sistema sempre entra o

valor do fator de potência capacitivo e indutivo, sendo que na verdade só existe um valor de fator de potência de fato.
O algoritmo pode ser aplicado em qualquer ponto de uma rede elétrica, que será feira uma avaliação do sistema no determinado ponto, e quanto menor for o tempo entre as medições é feita uma avaliação mas refinada da rede elétrica.

Metodologia empregada:

1 – Realização das medições.
2 – Análise dos dados pelo sistema *fuzzy*.
3 – Avaliação dos resultados obtidos do sistema *fuzzy.*

3.1 – Estrutura do sistema fuzzy

3.1.1Definição das variáveis de entrada
Para fator de potência capacitivo,
Variável lingüística: FPC, figura 4
Termo liguístico: Ruim: FP<=0.92, Bom: FP>092

Para fator de potência indutivo
Variável lingüística: FPL, figura 5
Termo liguístico:, Ruim: FP <=0.92, Bom: FP>092

Para THDV
Variável lingüística: THDV, figura 6
Termo lingüístico: Ruim: THDV>5%, Bom: THDV<=5%

Para THDI
Variável lingüística: THDI, figura 7
Termo lingüístico: Ruim: THDI>10%, Bom: THDI<=10%

Para horas
Variável lingüística: HORAS, figura 8
Termo lingüístico: HC:HORAS<=6, HL:HORAS>6

3.1.2 Definição das variáveis de saída
Variável lingüística: DIAG, figura 9
Termo lingüístico:
ADPCAFVI - ajuste, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência no espectro de tensão e corrente.
APC - análise da potência capacitiva
ADPCAFI - ajuste, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência espectro de corrente
ADPCAFV - ajuste, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência espectro de tensão
AFVI - análise da frequência no espectro de tensão e corrente
SECOK - sistema elétrico ok para o fator de potência capacitivo

AFV - análise da frequência no espectro de tensão
AFI - análise da frequência no espectro de corrente
IDPCAFVI - instalação, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência no espectro de tensão e corrente
IDPC - instalação e dimensionamento das potências capacitivas
IDPCAFI - instalação, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência no espectro de corrente
IDPCAFV - instalação, dimensionamento das potências capacitivas e análise da frequência no espectro de tensão
SELOK - sistema elétrico ok para o fator de potência indutivo

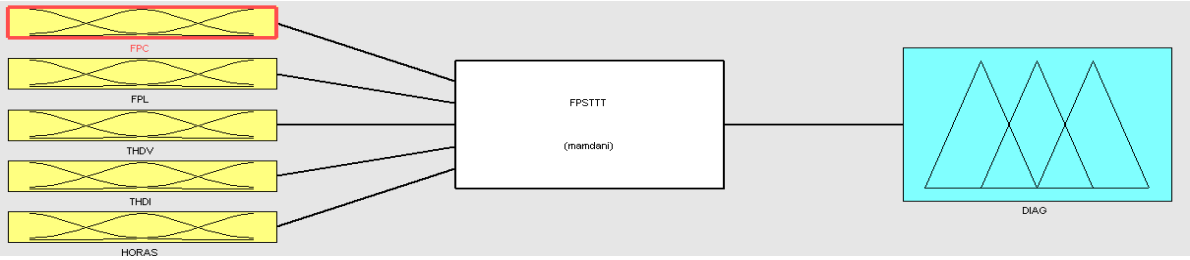

Figura 3
Sistema de inferência fuzzy para avaliação do sistema de rede elétrica

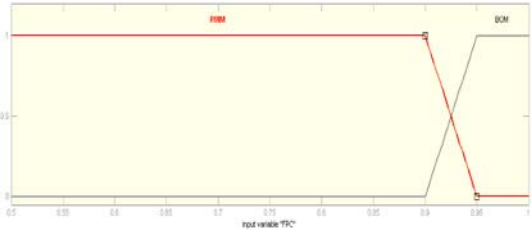

Figura 4:Variável de entrada do FPC

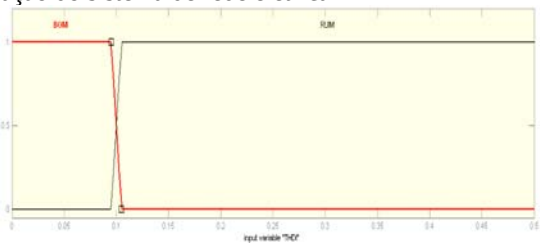

Figura 7: Variável de entrada do THDI

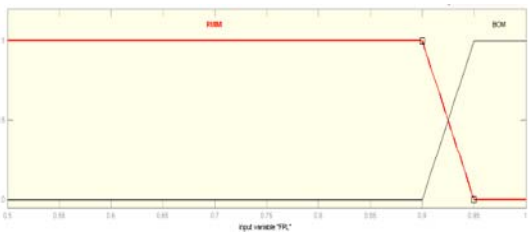

Figura 5:Variável de entrada do FPL

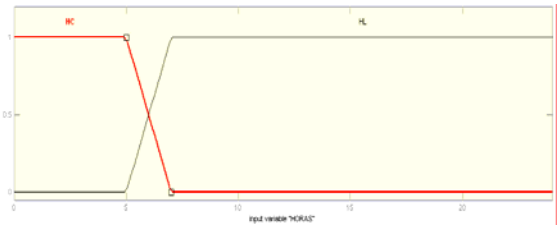

Figura 8: Variável de entrada HORAS

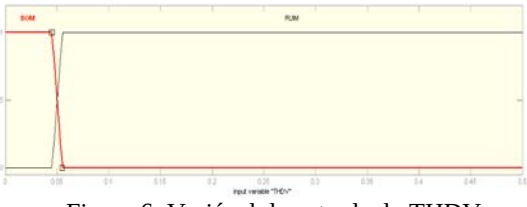

Figura 6: Variável de entrada do THDV

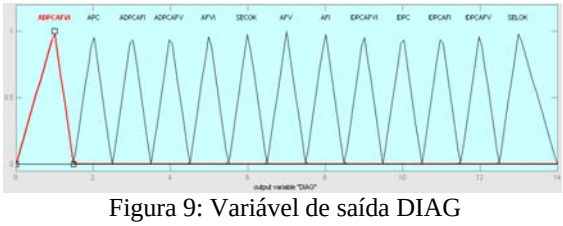

Figura 9: Variável de saída DIAG

3.1.2 Definição das regras fuzzy

Se FPC é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV é ruim então saída é ADPCAFVI
Se FPC é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is bom então saída APC

Se FPC é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is bom então saída ADPCAFI
Se FPC é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is ruim então saída ADPCAFV
Se FPC é bom e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is ruim então saída AFVI
Se FPC é bom e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is bom então saída SECOK
Se FPC é bom e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is ruim então saída AFV
Se FPC é bom e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is bom então saída AFI
Se FPL é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV é ruim então saída é IDPCAFVI
Se FPL é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is bom então saída IDPC
Se FPL é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is bom então saída IDPCAFI
Se FPL é ruim e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is ruim então saída IDPCAFV
Se FPL é bom e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is ruim então saída AFVI
Se FPL é bom e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is bom então saída SELOK
Se FPL é bom e HORAS é capacitiva e THDI é bom e THDV is ruim então saída AFV
Se FPL é bom e HORAS é capacitiva e THDI é ruim e THDV is bom então saída AFI

3.1.3 Classificação das variáveis de saída

DIAG: ADPCAFVI, é um número entre os valores 0 e 1.49.
DIAG: APC, é um número entre os valores 1.5 e 2.49.
DIAG: ADPCAFI, é um número entre os valores 2.5 e 3.49.
DIAG: ADPCAFV, é um número entre os valores 3.5 e 4.49.
DIAG: AFV, é um número entre os valores 4.5 e 5.49.
DIAG: SECOK, é um número entre os valores 5.5 e 6.49.
DIAG: AFV, é um número entre os valores 6.5 e 7.49.
DIAG: AFI, é um número entre os valores 7.5 e 8.49.
DIAG: IDPCAFVI, é um número entre os valores 8.5 e 9.49.
DIAG: IDPC, é um número entre os valores 9.5 e 10.49.
DIAG: IDPCAFI, é um número entre os valores 10.5 e 11.49.
DIAG: IDPCAFV, é um número entre os valores 11.5 e 12.49.
DIAG: SELOK, é um número entre os valores 12.5 e 14.

4 Aplicação do algorítimo proposto com dados reais

Com os dados de uma rede elétrica onde foram feitas medições durante 1 dia inteiro com intervalos de 15 em 15 minutos foram e obtidos os seguintes dados de acordo com as figuras 10,11,12.
Com os dados obtidos é necessário somente entrar com eles no sistema de inferência *fuzzy,* para uma avaliação do sistema de rede elétrica durante aquele período de tempo, e nas figuras 13 é possível notar através de um gráfico as diversas oscilações da análise dada pelo sistema durante o período de 24 horas.

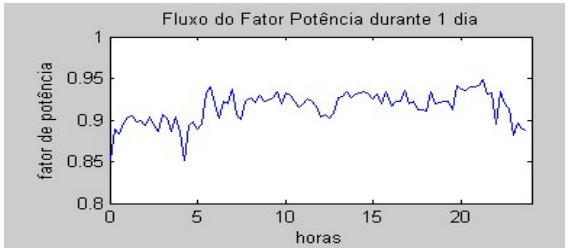

Figura 10: Fluxo do fator de potência

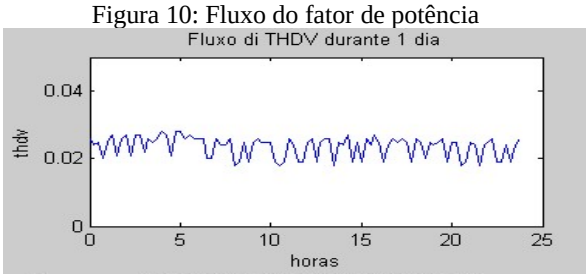

Figura 11: Fluxo do thdv

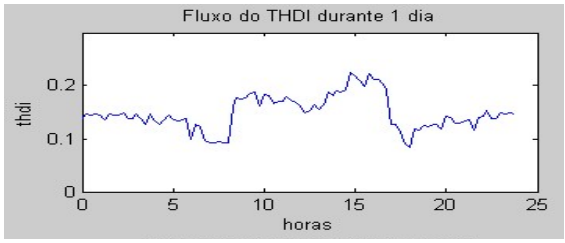

Figura 12: Fluxo do thdi

Figura 13: Fluxo da avaliação do sistema fuzzy

Pode ser feita uma demonstração melhor se for dividido em 2 gráficos um da análise na hora capacitiva e outra da análise na hora indutiva,e pode ser acrescentado também com uma linha vermelha o ponto que seria ideal a rede elétrica. Na figura 14 e 15 é feita está demonstração.

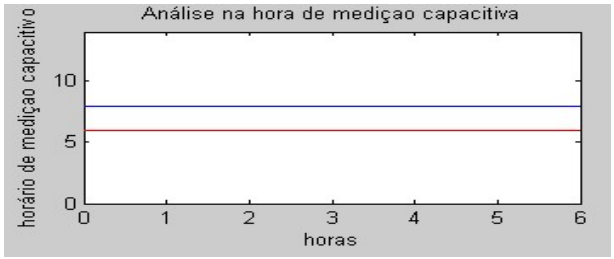

Figura 13: Fluxo de avaliação durante a hora capacitiva

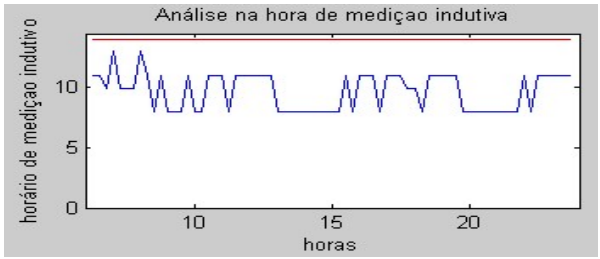

Figura 14: Fluxo da avaliação durante a hora indutiva

5 Conclusão

Este artigo tem o objetivo de avaliar uma rede elétrica onde o sistema está com sua eficiência energética baxia em função do fator de potência e das distorções harmônicas, utilizando para isso a lógica *fuzzy* para identificar os pontos na rede elétrica onde o sistema está deficiente com uma avaliação simples e rápida. E com base nos dados obtidos da avaliação da rede elétrica é possível corrigir o sistema com mais facilidade e levando em consideração problemas com distorções harmônicas, onde no Brasil a legislação manda a concessionária fiscalizar a rede elétrica apenas com base no fator de potência pois ainda não existem normas no Brasil.

AGRADECIMENTOS: Ao ITEGAM - Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia pela oportunidade do convênio com a Universidade Federal do Pará - UFPA através do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pará (UFPA).

6 Referência

[1] Mandani, E.H. e Assilian, S.: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, N. 1.1975, pp. 1-13.

[2] Fernandes, Rafael T.(2005) Supervisão de um sistema híbrido
Eólico/diesel usando lógica fuzzy. UFMS. Dissertação de Mestrado. Campo Grande, MS, 2005, 118p.

[3] S. N. Sivanandam, S. Sumathi and S. N. Deepa. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB, Ed. Springer, BerlinHeidelberg2007.

[4] Resolução N°456, de 26 de Novembro de 2000, ANEEL.

[5] Shaffer, Randall Alan, Fundamentals of Power Electronics with MATLAB, Ed Charles River Media, Boston Massachusetts 2007.

[6] Math works, Fuzzy logic toolbox for user with MATLAB® User's Guide – version 2, 2001.

[7] Weg, Manual para correção do fator de potência, http://www.weg.net (Consultado em Janeiro de 2010).

[8] Gomide, Fernando e Pedrycz, Witold (1998) "An introduction to fuzzy sets", The MIT Press.

[9] Zadeh, Lofti A. (1965) "Fuzzy sets", Information and control, 8.