

# Avaliação técnica e econômica da poluição no sistema elétrico com o emprego de equipamentos eficientes considerando os ganhos com a conservação de energia

Alexandre S. R. Reis

**Resumo:** Desenvolver trabalhos de campo e de laboratório para verificar os efeitos de cargas não lineares e comparar os ganhos (técnicos e econômicos) decorrentes da redução no consumo de energia com a perda da qualidade de energia elétrica, como as injeções de correntes harmônicas e a redução do fator de potência, entre outros problemas. Analisar os efeitos provocados principalmente pelas lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos de alto e baixo fator de potência, no transformador de distribuição, a possível influência no alimentador que atende estes transformadores, o impacto ambiental provocado por estas lâmpadas devido à presença do mercúrio em seu interior e finalmente propõe-se desenvolver ferramental de análise econômica utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy para as variáveis de incerteza ou de difícil quantificação. Concluímos que a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas contribui para a redução no consumo de energia e possuem viabilidade econômica para a realização da troca.

Palavras Chaves: cargas não-lineares, harmônicos, qualidade de energia, impactos ambientais e lógica fuzzy.

## I. APRESENTAÇÃO:

O sistema elétrico está deixando de ser um sistema eletromecânico e se transformando em eletro-eletrônico. Diante de um mercado globalizado, da desregulamentação do Setor Elétrico Brasileiro e de Programas de Conservação de Energia, diversas medidas visando à otimização no uso da energia elétrica têm contribuído para o aumento da produtividade industrial e para o emprego mais eficiente da mesma, tornando mais rígidos os requisitos de Qualidade para a Energia Elétrica.

Cargas industriais, comerciais e residenciais que utilizam tecnologia eletrônica contribuem para o aumento da

poluição do sistema elétrico. A aplicação de inversores de frequência para o controle da velocidade de motores, os controladores de intensidade luminosa (dimmers), a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos, controladores de potência para chuveiros, os eletrodomésticos que utilizam à eletrônica, entre outros, interferem na qualidade do sistema elétrico, de forma a aumentar as perdas e podendo até causar danos e prejuízos aos consumidores e concessionárias. No entanto, os problemas associados com a qualidade de energia elétrica ainda não são levados em consideração. Sempre foram tratados independentemente e sem considerar as interações econômicas entre concessionárias e consumidores.

Outro problema das lâmpadas está relacionado com o meio ambiente, pois geralmente estas lâmpadas, após o final de sua vida mediana, são descartadas junto com o lixo doméstico, que poderá contaminar o meio ambiente devido estas lâmpadas possuírem mercúrio em seus processos de fabricação. Com isso pretende-se estudar também o impacto destas lâmpadas no meio ambiente.

A maioria das lâmpadas existente no mercado utiliza mercúrio para a produção do fluxo luminoso, que é um elemento tóxico que pode provocar danos ao meio ambiente. Este relatório apresenta os impactos provocados pelo mercúrio, faz uma descrição das lâmpadas que contêm mercúrio, o processo de descontaminação de lâmpadas e a legislação existente. É apresentado ainda, material referente aos órgãos de controle ambiental existente no Brasil relacionado com a reciclagem de resíduos que são considerados perigosos ao meio ambiente.

Neste período foi realizada a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas de

baixo fator de potência e com alto índice de distorção harmônico, e posteriormente por fluorescentes compactas com baixo índice de distorção harmônico. São apresentados resultados das medições de grandezas elétricas realizadas no alimentador, no transformador e em alguns apartamentos do condomínio, antes e após a substituição das lâmpadas, acompanhados das análises dos resultados obtidos.

São apresentados um estudo da análise da atratividade de projetos de investimento e a Teoria dos Conjuntos Fuzzy, aplicados aos projetos de eficiência energética. É mostrada também a aplicação da lógica fuzzy na conservação de energia relacionada com a qualidade de energia, bem como o tratamento das variáveis para a Análise Fuzzy, que resultou na implementação computacional utilizando técnicas de lógica Fuzzy em ambiente Matlab.

São mostrados também, valores de consumos mensais dos apartamentos pertencentes no condomínio antes e após a substituição das lâmpadas incandescentes pelas lâmpadas fluorescentes compactas; os resultados obtidos no questionário de avaliação da troca das lâmpadas, que teve o objetivo de avaliar o grau de aceitação da troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas nos apartamentos do condomínio.

É apresentada, ainda, uma análise econômica envolvendo 4 alternativas de substituição de lâmpadas incandescentes (60 W e 100 W) por lâmpadas fluorescentes compactas (15 W e 23 W, sem e com filtro e 20 W e 30 W, sem e com filtro), utilizando o valor presente líquido para comparação destas alternativas.

## II. OBJETIVO:

Este projeto tem como objetivo analisar tecnicamente e economicamente a poluição causada na rede elétrica pelo emprego em escala crescente de cargas não lineares, tais como, lâmpadas fluorescentes compactas, fornos de microondas, aparelhos de vídeo e DVD, aparelhos de som, etc.

Desenvolver trabalhos de campo e de laboratório para verificar os efeitos destas cargas não lineares e comparar os ganhos (técnicos e econômicos) decorrentes da redução no consumo de energia com a perda da qualidade de energia

elétrica, como as injeções de correntes harmônicas e a redução do fator de potência, entre outros problemas.

Analisar os efeitos provocados principalmente pelas lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos de alto e baixo fator de potência, no transformador de distribuição e também a possível influência no alimentador que atende estes transformadores.

Analisar o impacto ambiental provocado por estas lâmpadas devido à presença do mercúrio em seu processo de fabricação.

Como complemento a teoria tradicional de análise econômica, propõe-se desenvolver ferramental de análise econômica utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy para as variáveis de incerteza ou de difícil quantificação.

## III. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Neste projeto utilizaram-se uma metodologia de desenvolvimento envolvendo estudos teóricos, trabalhos de campo (pesquisas nos consumidores residenciais e medições) e realização de ensaios em laboratório, conforme relacionados a seguir:

- Identificação das principais marcas e modelos de lâmpadas compactas com reatores eletrônicos disponíveis no mercado;
- Ensaios experimentais dessas lâmpadas em laboratório, através de medições individuais e também medições em grupo, com várias lâmpadas de diversos tipos e modelos;
- Escolha de um alimentador com características predominantes de cargas residenciais, para a realização de medições antes e após a saturação de lâmpadas fluorescentes compactas;
- Seleção do transformador de distribuição que estarão alimentando os consumidores residenciais, onde serão distribuídas as lâmpadas fluorescentes compactas;
- Realização de um questionário de posse e hábitos de consumo dos equipamentos disponíveis nestas residências;
- Realização de medições no secundário dos transformadores antes e após a saturação de lâmpadas. Durante estas medições serão solicitados aos consumidores vários tipos de situações de funcionamento das lâmpadas e

equipamentos eletrônicos, como por exemplo, o acendimento de todas as lâmpadas, somente os aparelhos eletrônicos, todos os equipamentos ligados, etc.

- Realização de medições no ponto de entrega de energia de alguns consumidores residenciais, para verificação da influência destes consumidores no sistema elétrico.

#### IV. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Para o total cumprimento dos objetivos descritos anteriormente, foram realizadas as seguintes etapas:

- Etapa 1 – Levantamento das lâmpadas compactas comercializadas no Brasil e outros equipamentos que podem causar poluição na rede elétrica.

- Etapa 2 – Pesquisa e Seleção do alimentador, o transformador e os consumidores residenciais que participarão do projeto.

- Etapa 3 – Aplicação de um questionário de posse e hábitos de consumo dos equipamentos disponíveis nestas residências.

- Etapa 4 – Medições no alimentador, no secundário do transformador e nos consumidores antes da substituição das lâmpadas convencionais (incandescentes, fluorescentes) por outras mais eficientes. Realização de um estudo do impacto ambiental provocado pelo descarte de lâmpadas fluorescentes que contêm mercúrio em seu processo de fabricação.

- Etapa 5 – Aquisição de lâmpadas fluorescentes compactas e realização de ensaios individuais e em grupo destas lâmpadas.

- Etapa 6 – Substituição das lâmpadas nas residências selecionadas.

- Etapa 7 – Medições no alimentador, no secundário do transformador e nos consumidores antes e após a substituição das lâmpadas. Como complemento a teoria tradicional de análise econômica, foi desenvolvido ferramental de análise econômica utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy para as variáveis de incerteza. Este software trata os ganhos/perdas econômicas resultantes desta

eficiência energética, abordando a conservação de energia, qualidade de energia e impacto ambiental.

- Etapa 8 – Análise dos resultados obtidos nas medições e avaliação econômica dos custos de conservação de energia e os possíveis investimentos para compensar os danos causados na qualidade da energia.

#### V. QUALIDADE DE ENERGIA

O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De forma aproximada, pode-se definir o problema da qualidade de energia como: “Qualquer problema de energia manifestado 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.

- Estes problemas vêm se agravando rapidamente em todo o mundo por diversas razões, das quais se destacam:

- Instalação cada vez maior de cargas não-lineares. O crescente interesse pela eficientização e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas.

- Maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia.

O desenvolvimento da indústria eletroeletrônica, nas últimas décadas, está levando o consumidor residencial a adquirir equipamentos e dispositivos com características não lineares: eletrodomésticos, aparelhos eletrônicos e tipos diversificados de equipamentos de iluminação. Deste fato, vem aumentando o aparecimento de distorções nas formas de onda da corrente e tensão nas redes de distribuição de energia elétrica.

Sistemas de iluminação utilizando lâmpadas de descarga e reatores eletrônicos de elevada eficiência podem proporcionar uma substancial redução na potência absorvida da rede e conseqüentemente na energia elétrica, entretanto, apresentam uma característica tensão versus corrente não linear, o que provoca a presença de harmônicos. As fontes

chaveadas e outras estruturas eletrônicas usadas em equipamentos eletrônicos também são fontes de distorção, podendo ocasionar formas de ondas parecidas com a da figura abaixo:

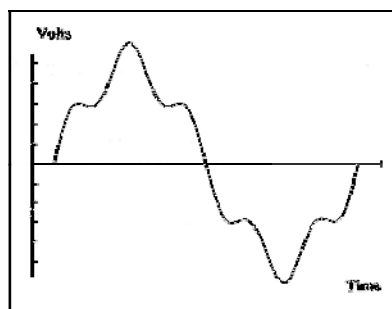


Figura 1. Distorção Harmônica em sinal senoidal

Desde 1990, “harmônico” tornou-se a palavra de ordem em qualidade de energia; pois distúrbios elétricos podem causar desligamentos e danos a equipamentos criando problemas a um número crescente de consumidores, e também, sobrecarga no condutor neutro, sobreaquecimento de transformadores, etc.

As perturbações harmônicas numa rede de alimentação são quantificadas pela relação de harmônicas individuais e a distorção harmônica total (THD). A relação de harmônica individual expressa à magnitude de cada harmônica em relação à fundamental e a distorção harmônica total quantifica o efeito térmico de todas as harmônicas, é a relação entre o valor eficaz de todas as harmônicas e a corrente não distorcida na frequência da rede.

O IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, propõe recomendações práticas e requisitos para o controle de harmônicas em sistemas elétricos de potência, tanto para o usuário como para o sistema. A tendência para o futuro é um maior rigor de parte das concessionárias de energia elétrica, com a sobre taxação relativa aos reativos de distorção, analogamente aos reativos de deslocamento nas cargas lineares indutivas.

As cargas não lineares, como dispositivos a semicondutores para alimentação e controle de equipamentos, têm contribuído significativamente para a degradação da qualidade de energia fornecida ao consumidor. As componentes harmônicas não realizam trabalho ou produzem potência na carga; entretanto, existem impactos negativos, tanto para o consumidor, quanto para a

concessionária: o valor total da corrente absorvida aumenta; possíveis ressonâncias entre cargas indutivas e capacitivas, provocando danos por sobretensões e, aumento das perdas do condutor neutro em sistemas trifásicos, resultantes da circulação de componentes com frequências da 3ª harmônica ou de seus múltiplos. Neste cenário, as cargas domésticas não lineares tem tido um aumento significativo nos últimos anos, contribuindo cada vez mais para as distorções harmônicas contidas na rede elétrica.

Tendo em vista este panorama, faz-se necessário um levantamento do conteúdo harmônico gerado por consumidores domésticos, de modo a quantificar os níveis de distorção gerados pelos equipamentos residenciais mais comuns.

Neste trabalho, propõe-se a verificação dos componentes harmônicos gerados por eletrodomésticos mais comuns que representam cargas não lineares ao sistema. Uma análise dos níveis de distorção harmônica total da corrente e tensão gerada por cargas residenciais de diversos tipos são realizadas. Serão verificadas também outras características pertinentes como a tensões e correntes de alimentação, potência consumida e fator de potência.

O instrumento medidor empregado para esta análise é o PM300 – Power Analyzer, da Voltech, que possibilita uma verificação fiel de alguns indicadores da qualidade de energia, como por exemplo, os níveis absolutos e percentuais dos componentes harmônicos de tensão, corrente e potência ativa bem como outros indicadores como distorção harmônica total (THD), potência aparente e reativa, fator de potência, etc.

## VI. INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A típica definição de harmônico é: “uma componente de um sinal periódico cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental”. Algumas referências descrevem o sinal “puro” ou “limpo” como sendo aquela que não possui nenhuma componente harmônica. Porém, sinais puros frequentemente só são obtidos sob condições especiais ou simulações.

A onda senoidal de tensão, produzida pelos geradores e disponibilizadas na rede elétrica, tem frequência fundamental de 60Hz no Brasil. Para a frequência da onda

senoidal estipulada em 60Hz, os componentes de segunda harmônica serão as que apresentarem frequência de  $2 \cdot 60 = 120\text{Hz}$ , e os terceiro serão os de  $3 \cdot 60 = 180\text{Hz}$ , assim sucessivamente.

De modo a se estabelecer os métodos de análise de sinais complexos com diferentes frequências, diversos métodos matemáticos foram desenvolvidos. O mais conhecido é a transformada de Fourier. Porém, a reprodução dos passos exatos deste processo em um equipamento de análise exige uma capacidade de processamento muito grande e de difícil obtenção. De modo a sanar este problema, métodos simplificados foram implementados, possibilitando assim a análise de sinais complexos. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) ou a Transformada Discreta de Fourier (DFT) são exemplos de métodos mais práticos de obtenção do espectro de frequências de um sinal complexo. Porém, estes métodos só são eficazes se, tanto a frequência fundamental quanto as demais harmônicas estiverem dentro de uma determinada faixa de frequência. Este limite de frequência é estabelecido pela frequência de amostragem utilizada na discretização do sinal a ser analisado. A frequência máxima da harmônica que pode estar contida no sinal deve ser igual ou menor que a metade da frequência utilizada para a amostragem deste sinal. Este limite é conhecido como “Frequência de Nyquist”. Caso esta regra não seja observada durante a execução da análise espectral, os conteúdos harmônicos podem passar a ser erroneamente representados, num fenômeno conhecido como “aliasing”.

Os estudos realizados para compreender os efeitos dos componentes harmônicos são centrados no levantamento do espectro de frequência das cargas não-lineares mais usuais. O espectro de frequência é a representação gráfica da amplitude de cada uma das componentes harmônicas de uma dada forma de onda em relação percentual à fundamental. Assim, podemos observar que a corrente de uma carga de informática, como um computador alimentado por uma fonte chaveada, é rica em harmônicas ímpares de alta amplitude e nenhuma harmônica par de amplitude significativa.

O parâmetro que melhor resume esta distribuição é o THD, é calculado como sendo a porcentagem resultante da

divisão do valor RMS (eficaz) total das componentes harmônicas sobre o valor RMS (eficaz) da fundamental.

## VII. EFEITOS DA PRESENÇA DE HARMÔNICOS

Quando uma carga não-linear drena corrente do sistema de geração de energia, o fluxo de corrente passa por toda a impedância do sistema da rede elétrica. As correntes não-senoidais simétricas dos modernos dispositivos eletroeletrônicos produzem harmônicas ímpares que somadas à senóide original produzem distorções. Estas cargas, mesmo que menos freqüentemente, também são capazes de gerar harmônicos pares, encontrados nas formas de onda assimétricas, tendo como resultado possível a introdução de uma componente DC sobreposta à tensão alternada.

A magnitude das distorções depende da impedância da fonte e da grandeza das tensões harmônicas produzidas. Baixas impedâncias na rede elétrica produzem baixas distorções, mas aumentos significativos na não-linearidade ou impedância do sistema podem elevar significativamente esses valores.

A presença de harmônicos na rede de alimentação não significa necessariamente que os equipamentos a ela conectados ficarão inoperantes ou executando suas funções incorretamente. Como em outros fenômenos relacionados com a qualidade da energia elétrica, isto depende da “robustez” do sistema de distribuição e da susceptibilidade de cada equipamento em si.

Freqüentemente a poluição gerada por fontes de harmônicas retornam para a rede de distribuição. Como mostrado a seguir, existe equipamentos que podem ter um mau-funcionamento ou falha devido a altos níveis de tensão e corrente harmônica no sistema de distribuição.

Alguns típicos problemas relacionados a equipamentos susceptíveis a poluição harmônica são:

- Excessiva corrente de neutro, resultando em um superaquecimento do neutro. Isto ocorre porque as harmônicas triplas ímpares ( $3^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $15^\circ$ ,...) são freqüentemente adicionadas no neutro, pois estas componentes harmônicas em cada uma das fases do sistema trifásico entram “em fase” com as outras, como mostrado na figura seguinte:

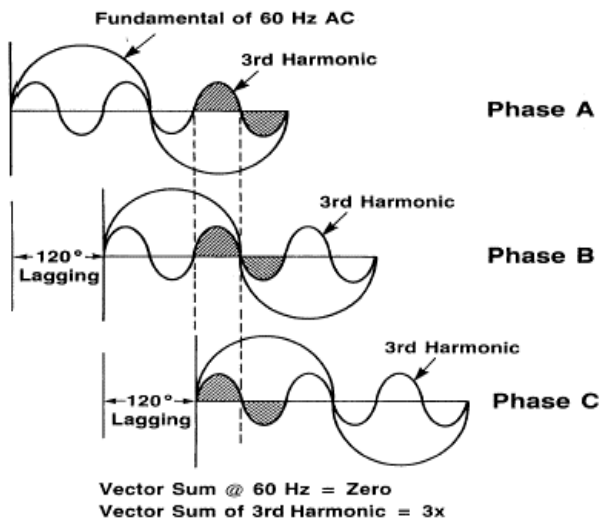


Figura 2. Adição das terceiras harmônicas

- Funcionamento incorreto de equipamentos de medição, incluindo medidores de potencia de indução a disco (Wh) e tipos diversos de medidores de corrente.
- Redução do fator de potencia real (PF<sub>TRUE</sub>), que é dado pela expressão:

$$PF_{TRUE} = PF_{\text{deslocamento}} * PF_{\text{distorção}}$$

Onde:

PF<sub>deslocamento</sub>: fator de potencia por deslocamento de fase entre V e I

$$PF_{\text{deslocamento}} = P_{\text{avg 1h}} / (V_{\text{rms 1h}} * I_{\text{rms 1h}})$$

PF<sub>distorção</sub>: fator de potencia por distorção harmônica de corrente

$$PF_{\text{distorção}} = 1 / \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}$$

Assim como o fator de potência por deslocamento, o fator de potencia por distorção tem valores entre 0 e 1, havendo desta forma a redução do fator de potencia real no caso de presença de harmônicos de corrente.

- Sobreaquecimento de transformadores, principalmente os ligados em delta onde os harmônicos de ordem tripla gerados pela carga circulam pelo primário do enrolamento. Alguns tipos de perdas elevam-se com o quadrado do valor do harmônico (como as perdas por efeito pelicular e de correntes parasitas).

- Aparecimento de seqüências zero e negativas em motores e geradores. Em um sistema balanceado, a tensão das harmônicas podem ser de seqüência positiva (fundamental, 4°, 7°,...), negativa (2°, 5°, 8°,...) e zero (3°, 6°, 9°,...).

Isto significa que a tensão de determinada harmônica tende a rotacionar o motor para frente, para trás ou nenhum lugar (apenas causando o aquecimento), respectivamente.

- Operação incorreta de dispositivos de proteção, como acionamentos falsos de relés, e falhas de UPS, especialmente se os circuitos utilizam sensores de cruzamento de zero.
- Queima de fusíveis, principalmente em bancos de capacitores de correção de fator de potência, devido alta tensão e corrente da ressonância com a impedância da linha.
- Má operação ou falha de equipamentos eletrônicos susceptíveis a interferências eletromagnéticas geradas pelas harmônicas.
- Se existir tensão de sub-harmônicas na faixa de 1 a 30Hz, ocorrem efeitos de instabilidade na iluminação, conhecidos como “flicker’s”, que podem ser percebidos pela visão humana.

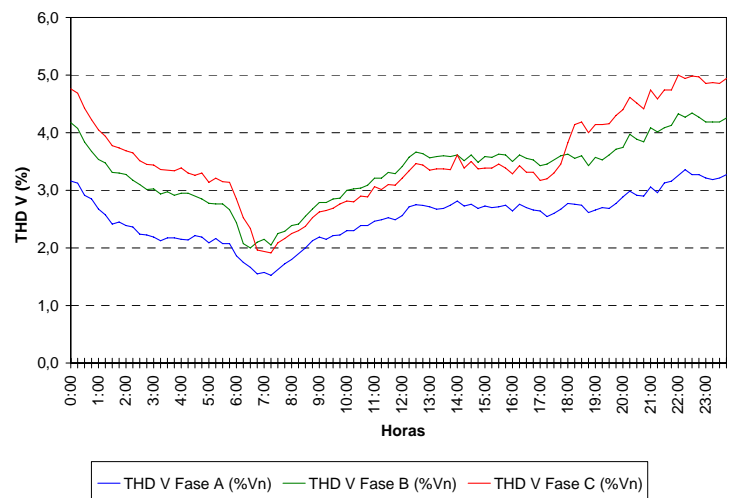


Figura 3. Medição de Harmônicos de Tensão

## VIII. IMPACTOS AMBIENTAIS DO MERCÚRIO

O Mercúrio (Hg) é o único metal encontrado na forma líquida em condições de temperatura e pressão normais, além disso, o mercúrio ocorre no meio ambiente associado à formação de vapores incolores e inodoros que se combina com outros elementos químicos, formando compostos inorgânicos ou sais. Dentre estes elementos, o mais comum é o enxofre, com o qual forma o sulfeto de mercúrio insolúvel (ocorrendo na forma de cinábrio - HgS) que não é considerado tóxico. Este metal pode, também, ser

encontrado na forma de compostos organometálicos. Muitos destes compostos têm importância no uso diário tanto na indústria como na agricultura. A preocupação a respeito da poluição do mercúrio surge dos efeitos à saúde decorrentes da exposição por mercúrio metilado (que é extremamente tóxico) encontrado na água e alimentos aquáticos. De acordo com estudos recentes estima-se que exista de 6.000 a 10.800 toneladas de mercúrio na troposfera e nas massas de água, respectivamente. Na forma natural, o mercúrio surge da degradação da crosta terrestre a partir de vulcões e, provavelmente, pela evaporação dos oceanos. No entanto, as fontes artificiais de mercúrio são mais diversificadas do que as naturais (Cardoso, 2002).

O Mercúrio pode estar presente, em algum grau, em plantas, animais e tecidos humanos. Quando as concentrações de Mercúrio excedem os valores normalmente presentes na natureza, surge o risco de contaminação do meio ambiente e dos seres vivos, inclusive o ser humano.

“O mercúrio inorgânico pode ser convertido em metilmercúrio edimetilmercúrio pela ação de microorganismos (bactérias metanogênicas), particularmente nos sedimentos. A biotransformação do mercúrio inorgânico em metilmercúrio representa um sério risco ambiental visto que ele se acumula na cadeia alimentar aquática por um fenômeno chamado bioamplificação, ou biocumulação, isto é, a concentração do metal aumenta à medida que ele avança nos níveis tróficos. Portanto, por ter a capacidade de permanecer por longos períodos nos tecidos do organismo, este elemento poderá ser encontrado nos peixes predadores da extremidade da cadeia em concentrações elevadas, culminando, finalmente, no regime alimentar dos humanos” (Cardoso, 2002).

## IX. ANÁLISE DA ATRATIVIDADE DE PROJETOS DE INVESTIMENTO E A TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

As decisões de investimento em alternativas e projetos de economia e uso eficiente da energia passam, necessariamente, por uma análise de viabilidade econômica. Tais questões podem se apresentar geralmente de duas

formas: ou deseja-se decidir sobre a escolha entre duas alternativas mutuamente excludentes, ou deseja-se conhecer a economicidade de uma dada alternativa.

Estas análises, em geral, utilizam-se de índices econômicos que permitem traduzir a atratividade de um investimento. Dentre estes índices pode-se destacar o valor presente líquido (VPL), o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno de capital. Para a execução de tais análises procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite utilizar-se de certas equações previamente concebidas e, assim, avaliar economicamente o projeto. Pode-se, de forma alternativa a clássica, empregar-se, por exemplo, uma interpretação para a Taxa Interna de Retorno ou para o VPL utilizando-se a teoria dos Conjuntos Fuzzy. Nesse caso consideram-se as possíveis variações dos parâmetros de entrada na análise de viabilidade econômica de investimentos.

Para implantação do modelo proposto e a fim de se obter uma ferramenta de suporte à tomada de decisão consistente e amigável, será utilizada a Toolbox de Lógica Fuzzy, que roda no ambiente computacional do MatLab. Este ambiente permite a edição e criação de sistemas de inferência e simuladores Fuzzy. Outra vantagem deste ambiente é a existência de interface gráfica e amigável, além de possuir poderosos recursos matemáticos e computacionais. A figura a seguir apresenta a estrutura do ambiente de implementação:

- Editor do Sistema de Inferência Fuzzy (FIS Editor)
- Editor de Regras (Rule Editor)
- Editor de Funções de Petinência (Membership Function Editor) Visualizador de Regras (Rule Viewer)
- Visualizador de Superfícies (Surface Viewer)

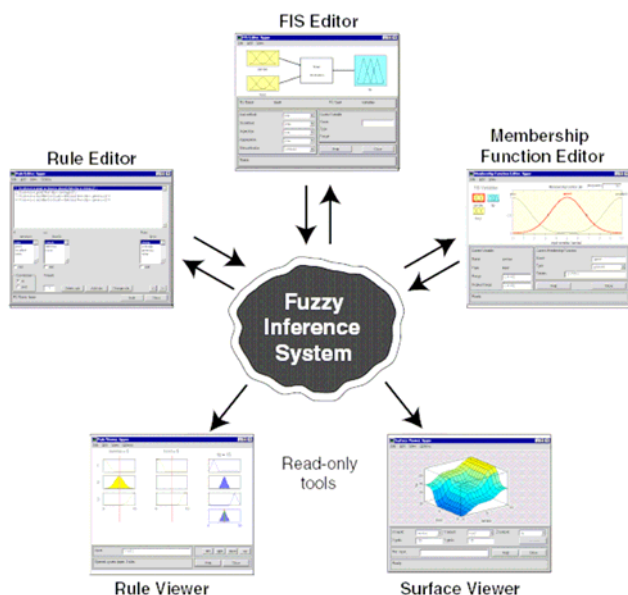


FIGURA 4. Estrutura do ambiente de implementação

## X. APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA RELACIONADA COM A QUALIDADE DE ENERGIA

### [1]. INTRODUÇÃO

Um relatório do Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica dos Estados Unidos, de 2001, indicava que a perda financeira anual causada por problemas relacionados à falta de qualidade de energia elétrica, era de US\$ 24 bilhões, sem considerar as perdas com a interrupção no fornecimento. Caso este fator seja considerado o valor salta para US\$ 120 bilhões.

No Brasil, segundo alguns especialistas, o valor deve estar situado entre US\$ 2 bilhões e US\$ 2,5 bilhões. Segundo esses mesmos especialistas, o alvo principal da sociedade é o setor industrial, altamente sensível aos fenômenos que podem resultar em prejuízos ao maquinário, como o afundamento da tensão, que ocorre em décimos de segundo, mas causa paralisação da produção. Assim, por exemplo, no caso da indústria de plásticos, a perda do sinal causa a solidificação do plástico nos bicos injetores e para recuperar a máquina, a empresa pode demandar de cinco a seis horas. Indústrias sensíveis à variação do sinal, como a de chips e placas de circuito eletrônico também estão no rol de vítimas potenciais da falta da qualidade. Cada vez mais a qualidade da energia será um fator a mais na decisão de grandes consumidores.

A Conservação de Energia também deve considerar os eventuais danos provocados ao sinal de energia quando são empregados equipamentos de baixa qualidade. No entanto os ganhos e perdas muitas vezes não são claramente identificáveis ou até mesmo quantificáveis. Para tanto, podemos empregar uma metodologia que utiliza a Lógica Fuzzy que se trata de um recurso matemático de auxílio à tomada de decisão, quando as variáveis de entrada são subjetivas e envolvem interesses contraditórios e até necessidades sociais. A Lógica Fuzzy provém à base para geração de técnicas para a solução de problemas e auxílio à tomada de decisão. A grande vantagem da Lógica Fuzzy provém de sua capacidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativas a partir de informações incompletas e imprecisas.

Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos lingüísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto).

Utilizando tal ferramenta para determinar os impactos do emprego de lâmpadas compactas fluorescentes de baixa qualidade, torna-se possível gerar uma resposta da “melhor opção” que atenda os interesses tanto do setor elétrico, quanto dos usuários ou consumidores. O relatório seguinte irá apresentar algumas considerações técnicas sobre os parâmetros que serão empregados nessas avaliações, sejam relacionadas ao sinal elétrico (como os harmônicos) ou aos próprios equipamentos (lâmpadas LFC) e suas conseqüências sobre o consumidor.

### [2]. EFEITOS DOS HARMÔNICOS

Alguns dos problemas originados pelos harmônicos podem ser listados a seguir:

#### **Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores;**

- Aumento das perdas no ferro devido às correntes parasitas induzidas;
- Torques parasitas a baixas velocidades.

Alguns trabalhos realizados verificaram que o aquecimento de um motor de indução está relacionado não



só com a Distorção Harmônica Total de Tensão como também está diretamente relacionado com a intensidade de determinadas harmônicas.

Em outros estudos, comprova-se que o aquecimento do motor devido ao 2º harmônico é 3 vezes maior do que aquele com o 5º ou outros harmônicos.

#### **Aumento da Corrente de Neutro**

Em instalações contendo muitas cargas monofásicas não lineares, caso típico de edifícios comerciais e análogos contendo grande quantidade de aparelhos de iluminação fluorescente e de microcomputadores, a corrente de neutro nos circuitos de distribuição trifásicos a 4 condutores, mesmo havendo um equilíbrio razoável entre as cargas, é superior à “corrente de desequilíbrio”, podendo mesmo superar a corrente de fase. Isso se deve às correntes harmônicas de ordem 3 e múltiplos que se somam ao neutro. Na prática destacam-se as correntes de 3º harmônico e as de frequência ímpar e múltipla de 3 (9a, 15a, 21a, etc.), conhecidas como harmônicas homopolares.

Uma corrente excessiva no neutro causa sobreaquecimento do condutor, de suas conexões e da barra de neutro, e também uma queda de tensão no circuito, que pode superar os limites fixados.

#### **Aumento de Perdas em Condutores**

Existem duas formas através das quais as correntes harmônicas podem causar aquecimento em condutores acima do esperado para os valores de corrente fundamental.

A primeira delas é a redistribuição da corrente dentro do condutor que inclui o efeito pelicular (skin) e o efeito de proximidade. A segunda forma se dá através da corrente de neutro em circuitos trifásicos a 4 fios nos sistemas de distribuição com cargas monofásicas, já comentado anteriormente.

O efeito pelicular é a concentração da corrente na camada externa do condutor. Com ele a resistência do condutor aumenta. Este efeito aumenta com a frequência e com o diâmetro do condutor. O efeito de proximidade é devido à distorção que o campo magnético de outros condutores adjacentes causam sobre a corrente do condutor em questão.

#### **Redução da Vida Útil de Lâmpadas Incandescentes**

As lâmpadas incandescentes têm uma perda de vida útil diminuída quando operam com tensões distorcidas. Isto

porque elas são sensíveis às variações de tensão. Se a tensão rms de operação da lâmpada está acima da sua nominal, devido aos harmônicos (por exemplo), a elevação da temperatura do seu filamento reduzirá a sua vida útil. Demonstra-se que uma operação contínua com 105% da tensão nominal implica numa redução de 47% da vida útil da lâmpada.

#### **Necessidade de Sobredimensionamento de Transformadores e suas Perdas**

As características nominais dos transformadores e geradores baseiam-se no aquecimento provocado por correntes de carga senoidais de frequência 60 Hz. Quando as correntes são senóides distorcidas, com forte conteúdo de harmônicos, o aquecimento provocado é consideravelmente maior do que o esperado para correntes senoidais do mesmo valor. As principais razões desse superaquecimento são a histerese, as correntes parasitas de Foucault, sem se esquecer dos efeitos pelicular e de proximidade nos enrolamentos (bobinas).

O primeiro efeito causado pelos harmônicos em transformadores é o seu aquecimento adicional. Outros podem ser definidos como sendo a ressonância causada entre a indutância do transformador e a capacitância do sistema, stress mecânico da isolamento (fios e lâminas) devido ao ciclo de temperatura e a uma pequena vibração mecânica dos fios.

## **XI. CONCLUSÃO**

Este projeto foi realizado conforme o cronograma previsto, sendo realizadas todas as etapas previstas.

Ao final deste projeto concluímos que a utilização de lâmpadas fluorescentes compactas contribui para a redução no consumo de energia e possuem viabilidade econômica para a realização da troca.

Levando em consideração os problemas de qualidade de energia e ambientais, estes números serão alterados e, dependendo dos custos de mitigação, poderão inviabilizar a substituição, conforme apresentado no software.

Com o desenvolvimento deste projeto foi possível apresentar um artigo técnico no XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia, intitulado “Os avanços tecnológicos em sistemas de iluminação e o

correspondente impacto na eficiência energética das instalações”, que foi realizado em Curitiba, Paraná, durante o período de 16 a 21 de outubro de 2005.

Partes das informações também estão sendo utilizadas no desenvolvimento de uma dissertação de mestrado na universidade.

Com o término do projeto, poderão ser desenvolvidos novos artigos técnicos, agora consolidados, apresentando os resultados obtidos neste Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento.

## XII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABILUX. Site oficial da Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. <http://www.abilux.com.br/>.
  - Apliquim Equipamentos e Produtos Químicos Ltda. Site da empresa: [www.apliquim.com.br](http://www.apliquim.com.br)
  - ARSENEAU R.; HEYDT G. T.; KEMPKER M.J. - Application of IEEE Standard 519-1992 Harmonics Limits for Revenue Billing Meters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Nº 1, January 1997. 346-353p
- [1]. ATIYEL, Said Oliveira. Gestão de Resíduos Sólidos: o caso das lâmpadas fluorescentes. Dissertação (Mestrado em Administração) - Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- [2]. Brasil Recicle: Site da empresa: [www.brasilrecicle.com.br](http://www.brasilrecicle.com.br)
- [3]. Buckley, J.J.; The Fuzzy Mathematics of Finance, Fuzzy Sets and Systems, 1985.
- [4]. CARDOSO, Plínio C. dos Santos; LIMA, Patrícia; BAHIA, Marcelo de Oliveira; AMORIM, Marília I. M. de; BURBANO, Rommel R. e FARIAS, Rômulo A. Feio. Efeitos biológicos do mercúrio e sus derivados em seres humanos- uma revisão bibliográfica. Trabalho realizado no Laboratório de Citogenética Humana do Departamento de Biologia do Centro de Ciências Biológicas - Universidade Federal do Pará. Apoio: UFPA, CNPq.). Pará, 2002
- [5]. CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. Ficha Técnica 10. CEMPRE, São Paulo, 1997b.
- [6]. Chongfu, Huang; Peijun, Shi; Fuzzy Risk and Calculation, Institute of Resource Sciences, Beijing Normal University (1999), China.
- [7]. Chiu, C.Y.;Park, C. S.; Fuzzy cash flow analysis using present worth criterion; The Engineering Economist 1994 – volume 39, no 2 (113-137).
- [8]. Franco, Edgar. Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções - Engecomp Tecnologia em Automação E Controle Ltda. Disponível em: [http://www.engecomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engecomp.com.br/pow_qual.htm). Acesso em 23 Maio de 2005
- [9]. FIGUEIREDO, Paulo J. M. A Sociedade do Lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental. São Paulo, 2a. ed., Ed. UNIMEP, 1995.
- [10]. FUNDAÇÃO VANZOLINI. Site oficial da Fundação Vanzolini. <http://www.vanzolini.org.br/>
- [11]. GREENPEACE. Site da entidade protetora do meio ambiente Greenpeace. <http://www.greenpeace.com.br>
- [12]. HG-Descontaminação Ltda. Site da empresa: [www.hgmg.com.br](http://www.hgmg.com.br)
- [13]. IEEE - 519 .Guide for applying harmonic limits on power systems. Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Inc. New York. 1996. 79p
- [14]. Jannuzzi, Gilberto de Martino & Swisher, Joel N.P. Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis – Campinas,SP: editora: Autores Associados, 1997
- [15]. Kahraman, Cengiz; Ruan, Da; Tolga, Ethem; Capital Budgeting Techniques Using Discounted Fuzzy Versus Probabilistic Cash Flows, Information Sciences, Ed. Elsevier, 2002.
- [16]. Karsak, E. Ertugrul; Tolga Ethem; Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Procedure for Evaluating Advanced Manufacturing System Investments, J. Production Economics 69 (2001) 49-64.

- [17]. KASSICK E. V. - Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. INEP. Instituto de Eletrônica de Potência. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. SC. 1998. 126p
- [18]. Mega Reciclagem de Materiais Ltda. Site da empresa: [www.megareciclagem.com.br](http://www.megareciclagem.com.br)
- [19]. MICARONI, Regina Clélia da Costa Mesquita, BUENO, Maria Izabel Maretti Silveira e JARDIM, Wilson de Figueiredo. Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. Química Nova. Julho/Agosto. 2000, n.º4
- [20]. Mikhailov, L.; Deriving Priorities From Fuzzy Pairwise Comparison Judgements, Fuzzy Sets and Systems 134 (2003) 365-385.
- [21]. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Site do Ministério do Meio Ambiente. <http://www.mme.gov.br>
- [22]. MOTTA, Ronaldo S. Manual para valoração econômica de recursos ambientais. Ministério do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Brasília, 1998.
- [23]. MURPHY H.G. Power quality and the AFD overview. Disponível em: <http://www.execpc.com/~hgmurphy/PWRQUAL.HTM>, Acesso em 23 Maio de 2005.
- [24]. RAPOSO, Cláudio. Contaminação ambiental provocada pelo descarte não-controlado de lâmpadas de Mercúrio no Brasil. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2001
- [25]. RECITEC - Reciclagem Técnica do Brasil Ltda. Site da empresa: [www.recitecmg.com.br](http://www.recitecmg.com.br)
- [26]. SOUZA, Jurandir R. de & BARBOSA, Antônio C. Contaminação por Mercúrio e o caso da Amazônia. Química Nova (on-line). Novembro. 2000, n.º12.
- [27]. VALLE, Cyro E. do. Um passo à frente dos regulamentos ambientais – uma mudança cultural (um programa desenvolvido em um país em desenvolvimento). São Paulo, 98.
- [28]. VALLE, Cyro E do . Qualidade Ambiental, Pioneira, São Paulo, 2a. edição, 1995, p 16.
- [29]. WIENS, Carlos H. Gestão de resíduos tóxicos: o caso das lâmpadas fluorescentes descartadas em quatro empresas do setor automotivo da região metropolitana de Curitiba, Paraná. Dissertação (Mestrado em Administração) - Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- [30]. YAMACHITA, Roberto; HADDAD, Jamil; MARTINS, André R. S.; GAMA, Paulo H. R. P.; GUARDIA, Eduardo C. A conservação de energia em sistemas de iluminação e suas conseqüências sobre o meio ambiente. Grupo de Estudos Energéticos – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, 2000.