

SISTEMA DE MEDIÇÃO E MODELAÇÃO DE ERROS EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA ATIVA

Carlos A. Canesin¹, Flávio A. S. Gonçalves¹, Luis C. Origa¹, José C. Rossi¹,
João O. P. Pinto², Luigi Galotto Junior², Ruben B. Godoy², Marcio Sciamana³ e Luiz C. E. da Silva³

¹UNESP – Campus Ilha Solteira
Av Brasil Centro, 56, Cx. Postal 31, CEP 15385-000, Ilha Solteira - SP – Brasil
Email: canesin@dee.feis.unesp.br, flavio@dee.feis.unesp.br, rossi@dee.feis.unesp.br e origa@dee.feis.unesp.br

²UFMS – Campus Campo Grande
Cidade Universitária, Cx. Postal 549, CEP 79070-900. Campo Grande – MS, Brasil
Email: jpinto@nin.ufms.br, luigi@batlab.ufms.br e ruben@batlab.ufms.br

³ELEKTRO – Eletricidade e Serviços SA
Departamento de Metrologia
13053-024 Campinas, SP – Brasil
Email: marcio.sciamana@elektro.com.br e luiz.evangelista@elektro.com.br

Resumo - Este trabalho propõe um sistema de medição e uma metodologia de modelação para a avaliação de erros de medição em medidores de energia elétrica ativa do tipo indução e eletrônico. O sistema de medição propicia condições distintas de distorções harmônicas para tensões e correntes nos testes experimentais, além de permitir o emprego de formas de onda de tensões equilibradas ou desequilibradas (3% e 5%). As formas de onda empregadas nos testes experimentais são provenientes de um banco de dados composto por medições em consumidores com diferentes características de carga (industrial, comercial, rural e residencial). A metodologia para modelação dos erros de medição é baseada na utilização de dados experimentais provenientes do sistema de medição proposto, evitando as incertezas de modelação relacionadas com a idealização e não modelação de parâmetros comportamentais, especialmente quando o modelo de erro de medição é determinado de maneira totalmente teórica, e consideradas condições não senoidais. Com o objetivo de demonstrar a metodologia de avaliação proposta, o sistema de medição é descrito e são apresentados alguns resultados de modelação dos efeitos das distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões sobre medidores watt-hora eletromecânicos do tipo indução e eletrônicos, bifásicos e trifásicos.

Palavras-Chave – sistema de avaliação de medidores watt-hora, modelação de erros de medição em medidores watt-hora, operação não senoidal, desequilíbrio de tensão, medidor watt-hora do tipo indução e eletrônico.

MEASUREMENT SYSTEM AND MODELING OF ACTIVE ENERGY METERS MEASUREMENT ERRORS

Artigo submetido em 20/08/2007. Revisões em 15/11/2007 e 13/02/2008.
Aceito por recomendação do Editor F. L. M. Antunes.

Abstract – This paper presents a new complete measurement system and modeling approach to investigate measurement errors in active energy meters, such as inductive and electronic types. The measurement system provides for experimental tests voltage and current waveforms with different harmonic content, also balanced and unbalanced voltage waveforms conditions (3% and 5%) are available. The current and voltage waveforms admitted for testing are provided by a database obtained through measurements in consumers with different load characteristics (industrial, commercial, agricultural, and residential). The measurement error modeling is based on experimental results provided by the proposed measurement system, avoiding the modeling uncertainties related with idealized and unmodeled behavior parameters, especially when derived measurement error model is totally theoretical and non-sinusoidal conditions are taking into account. In order to illustrate the proposed approach, measurement system is described and some experimental models are evaluated to determine the effect of harmonic distortions and unbalance of voltages on two-phase and three-phase active energy meters (induction and electronic types).

Keywords - watt-hour meter test system, watt-hour measurement errors, non-sinusoidal situations, unbalanced voltage waveform.

I. INTRODUÇÃO

A modernização dos processos industriais e a introdução de diversos processadores eletrônicos de energia elétrica (fontes chaveadas, controladores de velocidade de máquinas elétricas, equipamentos de solda e demais conversores estáticos de potência), apresentando-se como cargas não-lineares, em conjunto com uma grande quantidade de dispositivos presentes nos setores comercial e residencial (computadores pessoais, instrumentação eletrônica, dispositivos de entretenimento, reatores eletrônicos de

reduzido fator de potência para iluminação, etc.), têm resultado num aumento significativo do nível de distorção harmônica de correntes e tensões nas redes de distribuição de energia elétrica [1-2].

Atualmente, no Brasil, os medidores watt-hora do tipo indução são os dispositivos convencionais mais utilizados para a medição de energia elétrica ativa. Entretanto, são fabricados e calibrados para operação com formas de onda de tensões e correntes puramente senoidais, ou seja, isentas de distorções harmônicas, em sistemas equilibrados [3].

Operando em condições de distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões, os medidores de energia elétrica ativa podem ter seu desempenho afetado, resultando em erros de medição e conseqüente erro de faturamento de energia elétrica. Estes efeitos podem representar um impacto econômico relevante para as empresas de distribuição de energia elétrica e para o consumidor, especialmente quando grandes montantes de energia são processados em ambientes com elevadas distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões [4-7].

Diversos trabalhos foram realizados com o intuito de avaliar os erros de medição em medidores de energia elétrica ativa do tipo indução, propondo-se modelos teóricos tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, para justificar tais erros de medição. Entretanto, os trabalhos de modelação também apresentam uma susceptibilidade a "erros", devido às idealizações propostas nos modelos em virtude da grande dificuldade de se representar todos os parâmetros que afetam o desempenho dos medidores do tipo indução, frente à presença de correntes e/ou tensões não senoidais [8-13].

Analogamente, os mesmos problemas de modelação surgem na determinação dos modelos analíticos para os sistemas de medição de energia elétrica, baseados em dispositivos semicondutores (eletrônicos/digitais). Uma vez que estes tipos de medidores são equipamentos baseados em sistemas de aquisição que dependem das características dos transdutores de tensões e correntes, dos dispositivos de condicionamento de sinais, dos dispositivos de conversão analógico-digital dos sinais a serem processados, dos dispositivos processadores (microprocessador ou DSP-Digital Signal Processor), e, principalmente, da influência do algoritmo de cálculo implementado para calcular a grandeza da energia ativa.

Portanto, uma consistente e cuidadosa análise laboratorial é certamente a metodologia mais adequada para contornar os efeitos negativos da modelação teórica, minimizando os erros relativos às aproximações e efeitos não modelados, os quais normalmente impõem erros superiores à classe de exatidão dos próprios medidores investigados.

Neste contexto, este trabalho propõe um novo sistema de avaliação de erros em medidores de energia elétrica ativa do tipo indução e eletrônico, composto pela união de um sistema de medição e de uma metodologia de modelação de erros de medição. O novo sistema de medição é capaz de impor nos testes experimentais, a partir de um banco de dados pré-estabelecido, condições reais de distorções harmônicas distintas de tensões e correntes, além de desequilíbrios para

as tensões. A metodologia de modelação dos erros de medição em medidores de energia elétrica ativa (watt-hora) proposta é baseada na utilização de dados provenientes dos ensaios experimentais efetuados no sistema de medição proposto. Portanto, contorna os efeitos negativos da modelação totalmente teórica, minimizando os erros relativos às aproximações e efeitos não modelados. Adicionalmente, através dos modelos desenvolvidos para os medidores avaliados, é possível a predição do erro de medição esperado considerando condições de distorção harmônica e desequilíbrios de tensão dentro das regiões de validade da modelação comportamental proposta [14-15].

II. ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

O diagrama de blocos do sistema proposto para avaliação dos medidores eletrônicos, e a visão panorâmica dos arranjos experimentais empregados para a realização dos testes nos medidores watt-hora trifásicos do tipo indução e eletrônicos são ilustrados nas Figuras 1 e 2.

Basicamente, os dispositivos que compõem o sistema proposto podem ser divididos em categorias, de acordo com a sua função: gerar perfil de corrente, gerar perfil de tensão, controle do sincronismo entre perfis de corrente e tensão, aquisição de dados e sensores, controle dos processos, medidores de energia (padrão e o medidor em teste), conforme diagrama de blocos da Figura 1.

Para a aplicação da metodologia proposta nos medidores de energia watt-hora do tipo indução, as interconexões internas das bobinas de tensão e corrente devem ser desconectadas, permitindo a alimentação do equipamento com formas de onda de correntes e tensões de fontes diferentes.

A. Geração do Perfil de Corrente

A metodologia empregada consiste em aplicar uma forma de onda de tensão pré-determinada a uma carga resistiva e injetar a corrente resultante nas bobinas/sensores de corrente dos medidores sob ensaio. Desta maneira, consegue-se impor um perfil de forma de onda de corrente para o medidor ensaiado, através da imposição de uma forma de onda de tensão programada e controlada.

Para a geração dos perfis de corrente, a serem submetidos às bobinas de corrente (ou sensores de corrente no caso dos medidores eletrônicos) dos medidores nos ensaios experimentais, utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica modelo 6000L de 6 kVA acoplada a um dispositivo gerador de formas de onda HGA (ambos da California Instruments) e uma carga resistiva trifásica com ponto comum. Sendo que, nas aplicações bifásicas, uma fase é suprimida do arranjo.

O dispositivo HGA é um dispositivo capaz de gerar formas de onda de referência para a fonte de alimentação a partir das informações das componentes harmônicas (amplitudes e fases) da forma de onda desejada. Considerando a componente fundamental com frequência de 60 Hz, o dispositivo é capaz de representar formas de onda com componentes harmônicas contemplando até a quinquagésima ordem (3 kHz).

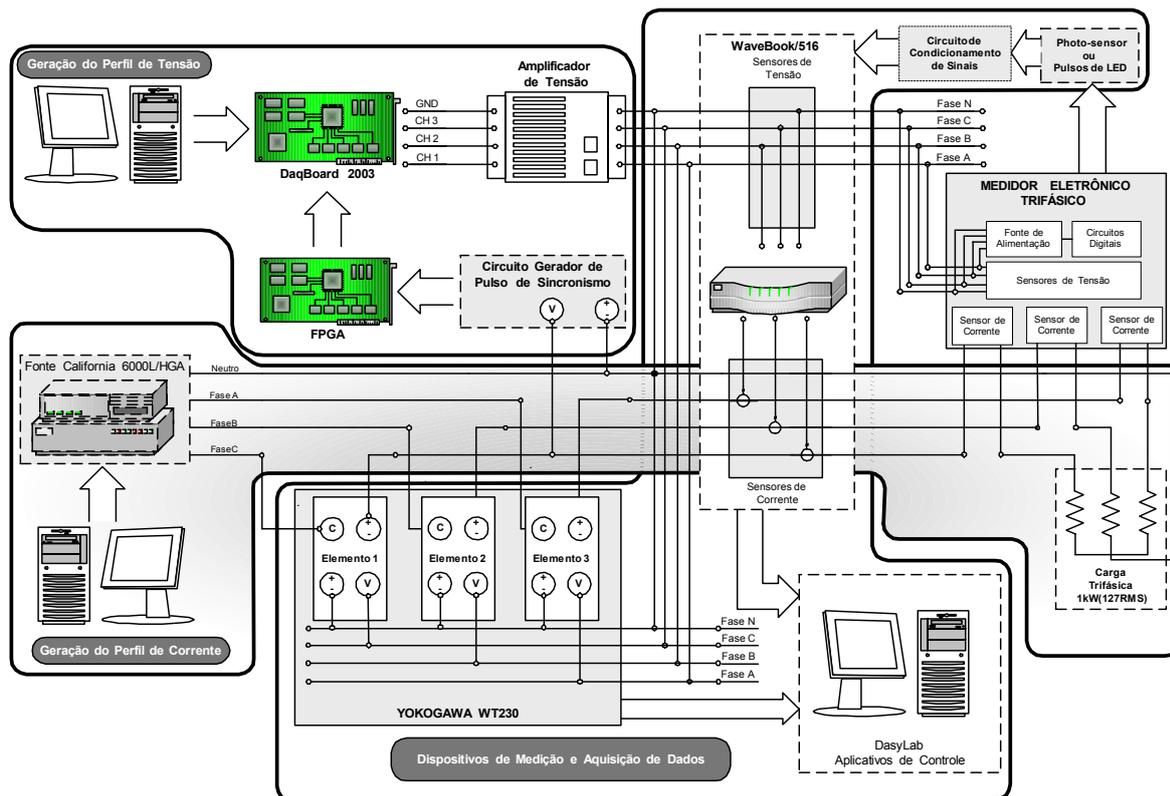


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema proposto, exemplo da configuração utilizada na avaliação dos medidores trifásicos eletrônicos.

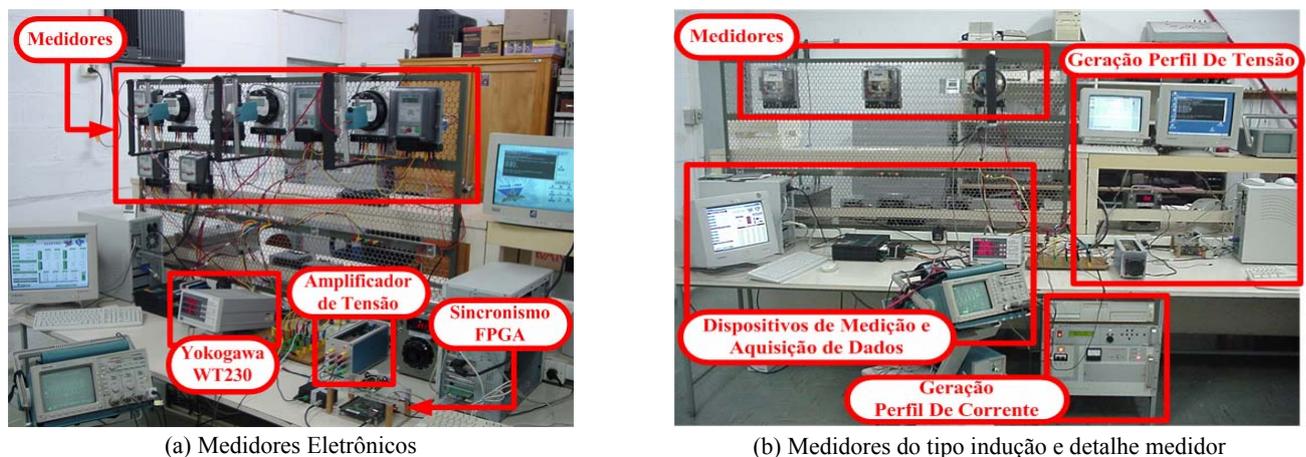


Fig. 2. Visão panorâmica do arranjo experimental do sistema para avaliação dos medidores: (a) eletrônicos e (b) do tipo indução.

B. Geração do Perfil de Tensão

A metodologia empregada consiste inicialmente na reconstrução da forma de onda desejada, a partir dos dados de amplitude e fase provenientes da decomposição harmônica da forma de onda de tensão desejada para os ensaios. As formas de onda de tensões são geradas inicialmente possuindo baixa amplitude de sinal, pelos conversores digital-analógicos (DaqBoard 2003), e depois são amplificadas para os níveis de amplitudes requeridas pelas bobinas de tensão (ou sensores de tensão) dos medidores sob testes, através de um amplificador de tensão trifásico especialmente desenvolvido para esta aplicação.

No plano discreto, considerando uma taxa de amostragem de 50 kHz, cada perfil de forma de onda de tensão possui 833 pontos de resolução durante um período (60 Hz). A

composição do sistema trifásico é obtida aplicando-se a transformada de deslocamento discreto no conjunto de pontos obtidos para um período da forma de onda, considerando-se deslocamentos de fase de 240° e 120° graus. Posteriormente, os pontos discretos com amplitudes em tensão são codificados utilizando a representação binária com palavras de 12 bits.

A base utilizada na conversão está relacionada com os ganhos impostos pelo amplificador nas formas de onda geradas pelo dispositivo de conversão digital-analógica (DaqBoard 2003), de maneira que as formas de onda de tensões nas saídas do amplificador sempre apresentem um valor eficaz igual à 127 V, independente do perfil empregado (nos casos sem desequilíbrio de tensão), considerando-se que a tensão nominal de todos os medidores ensaiados é de 127 V.

O amplificador de tensão CA trifásico desenvolvido para este sistema, mostrado na Figura 3, possui uma potência de saída de 20 W para sinais de entrada com variação de amplitude de -5V a +5V, sendo capaz de amplificar com precisão sinais com frequências variando de 60 Hz até 5 kHz.

Este arranjo experimental minimizou os custos relacionados com a utilização de outro conjunto de fonte de alimentação trifásica de potência, mais sistema de geração de formas de onda com harmônicos, para alimentação das bobinas/sensores de tensão dos medidores sob ensaios.

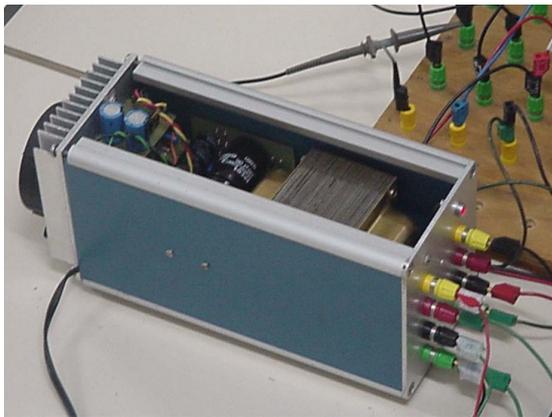


Fig. 3. Amplificador de tensão CA trifásico desenvolvido.

C. Sincronismo

Como as formas de onda de tensões e correntes injetadas nos dispositivos medidores sob ensaios são geradas de maneira independente, a existência de um mecanismo de sincronismo entre estas formas de onda se fez necessário, para compor o perfil tensão/corrente, com determinado deslocamento de fase.

A metodologia de sincronismo empregada consiste em monitorar os valores instantâneos das formas de onda de correntes impostas, e determinar o exato instante da passagem do semi-ciclo negativo para o semi-ciclo positivo em cada fase, ou seja, o cruzamento por zero, e, a partir deste instante, sincronizar o deslocamento de fase entre as formas de onda de correntes e tensões requerido pelo perfil de carga programado para testes.

Para efetuar esta tarefa empregaram-se comparadores de tensão e um dispositivo FPGA. Os comparadores detectam os cruzamentos por zero, enquanto o FPGA monitora tais instantes de transição e controla a placa de conversores D/A (DaqBoard 2003) fazendo com que a geração das formas de onda de referência de tensão ocorram com o deslocamento de fase requerido a cada período. A programação do dispositivo FPGA foi realizada com a utilização da linguagem de descrição de hardware VHDL.

D. Aquisição de Dados e Sensores

O sistema de aquisição é composto por um microcomputador do tipo PC executando aplicativos desenvolvidos no ambiente DasyLab, uma placa de comunicação do tipo GPIB, um sistema de aquisição de dados do tipo WaveBook/516 possuindo quatro sensores de tensão e três sensores de corrente, um sensor de voltas acoplado ao medidor ensaiado (photo-sensor), no caso dos ensaios de medidores do tipo indução, ou, um sensor de

pulsos (pulso Led energia ativa) no caso dos ensaios em medidores do tipo eletrônicos, e, um analisador de energia Yokogawa WT230, que fornece intensidade padrão dos dados aferidos (potência ativa, correntes e tensões eficazes em cada fase e o consumo total em watt-hora).

Com o objetivo de determinar os erros resultantes de medição nos medidores de energia elétrica em teste, é necessária a existência de um valor de referência dado por um medidor de energia possuindo uma exatidão elevada. Desta maneira, o medidor de classe de exatidão de 0,1% (potência/tensão/corrente) Yokogawa WT230, foi adotado como medidor padrão de referência para energia ativa (watt-hora).

A menos que seja requerido especialmente aos fabricantes, os medidores watt-hora do tipo indução não possuem um sinal analógico/digital específico, informando a energia ativa registrada pelo mesmo. Assim, um photo-sensor foi utilizado para capturar a informação de rotação inteira do disco, a qual é proporcional ao watt-hora medido, determinada pelo parâmetro K_d (Wh/rotação).

Portanto, quando o sensor detecta que o disco do medidor em teste efetuou uma volta, o dispositivo gera uma forma de onda no formato de um pulso no padrão de sinal TTL.

Assim, o sistema de controle monitora este sinal, e conta o número de bordas de subida do mesmo para determinar a informação relacionada com a energia ativa medida, de acordo com a constante de rotação de disco do medidor (K_d), no caso dos medidores do tipo indução.

A Figura 4 mostra o sensor de voltas de disco acoplado a um medidor de energia elétrica bifásico do tipo indução em teste.

Para o caso dos testes nos medidores eletrônicos a informação da energia ativa pode ser obtida utilizando-se o photo-sensor para detectar a operação pulsada de um "LED" informativo de energia ativa, presentes nos equipamentos por determinação de norma, ou ainda, podem ser utilizados sinais correspondentes coletados diretamente das portas óticas disponíveis.

O sistema de aquisição de dados (WaveBook/516) captura as formas de onda de correntes e tensões, para a determinação do fluxo de energia medido pelo equipamento em teste, e o sinal pulsado proveniente da saída do photo-sensor.

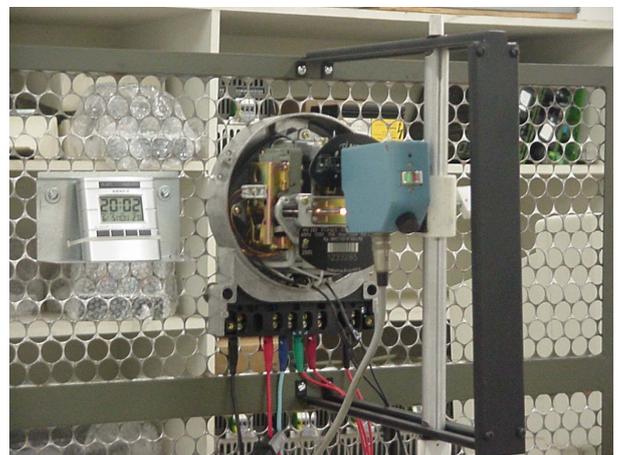


Fig. 4. Sensor de voltas de disco acoplado a medidor bifásico do tipo indução em teste.

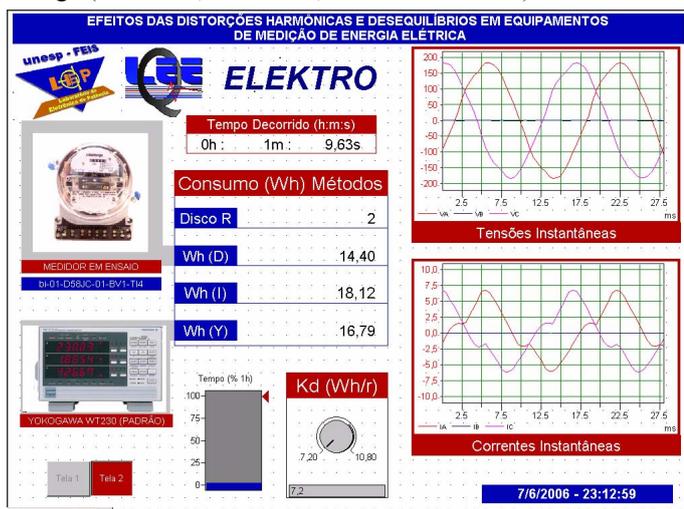
Neste contexto, foram desenvolvidos aplicativos de controle relacionando a comunicação dos dados entre os dispositivos e o microcomputador, e uma interface gráfica que permite acompanhar e controlar todos os procedimentos dos testes de uma forma amigável, como ilustra a Figura 5.

O controle do medidor padrão (Yokogawa) foi realizado empregando o padrão de comunicação IEEE-488 (GPIB), enquanto o padrão RS-232 foi empregado para controlar o sistema de aquisição WaveBook/516.

Os ganhos dos transdutores de tensão e dos sensores de corrente (WaveBook), empregados nas rotinas de cálculos, são calibrados automaticamente por software sempre no começo de cada ensaio, considerando-se os valores de referência de tensão e corrente eficazes em cada uma das fases, disponibilizados pelo medidor padrão em função do conjunto de perfis escolhido para avaliação.

III. PERFIS DE CORRENTE E DE TENSÃO

Um banco de dados especial contendo um conjunto de perfis de corrente e de tensão foi construído. Cada perfil representa um caso real contendo a distorção harmônica medida em consumidores com diferentes características de carga (industrial, comercial, rural e residencial).



A Figura 6 ilustra exemplos de perfis de tensão e corrente utilizados nos ensaios experimentais. Nestes exemplos, os perfis selecionados proporcionam uma situação impondo o efeito somente das distorções harmônicas, e outro caso considerando também o efeito do desequilíbrio de tensão.

Para compor o banco de dados dos ensaios de teste para os medidores bifásicos, foram selecionados quatro perfis de forma de onda de corrente, cinco perfis de forma de onda de tensão, mais um perfil representando o caso puramente senoidal. Assim, considerando as combinações entre os perfis com distorção harmônica para compor os arranjos de pares de perfis e incorporando o caso ideal, totalizam-se vinte um pares de perfis disponíveis para utilização nos testes bifásicos. De maneira análoga ao caso bifásico, para os ensaios de medidores trifásicos foram selecionados cinco perfis de corrente e cinco perfis de tensão, totalizando vinte e seis pares de perfis disponíveis no banco de dados (considerando o caso senoidal).

Adicionalmente, os perfis de tensão podem ser selecionados para apresentarem desequilíbrio de tensão de 3% ou 5%, ou outro nível de desequilíbrio desejado através de programação. O sistema permite a inserção de casos adicionais no banco de dados de perfis, aumentando e melhorando o número de casos abrangidos.

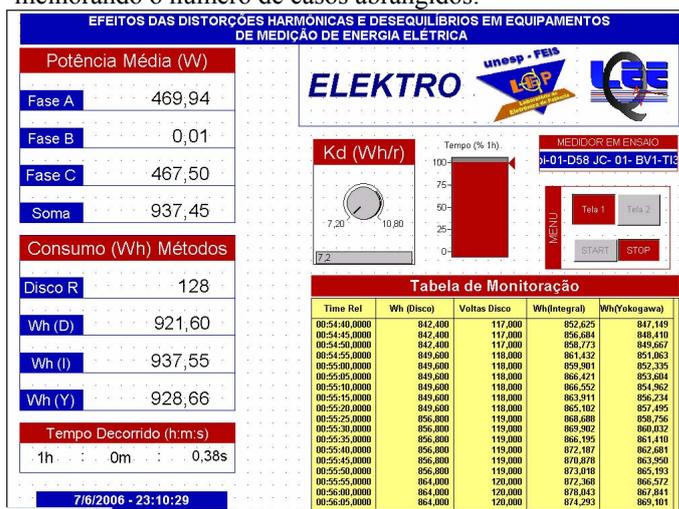
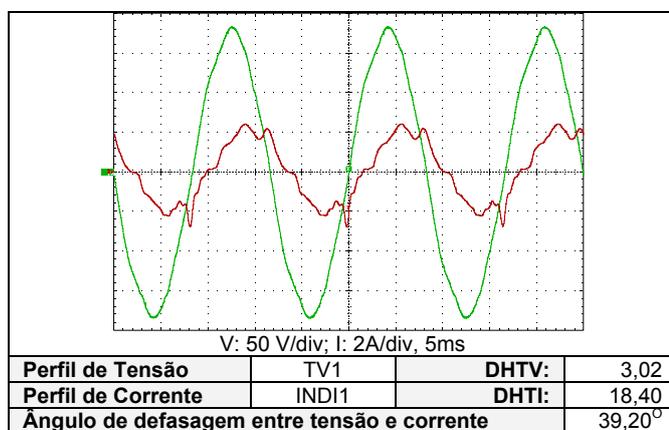
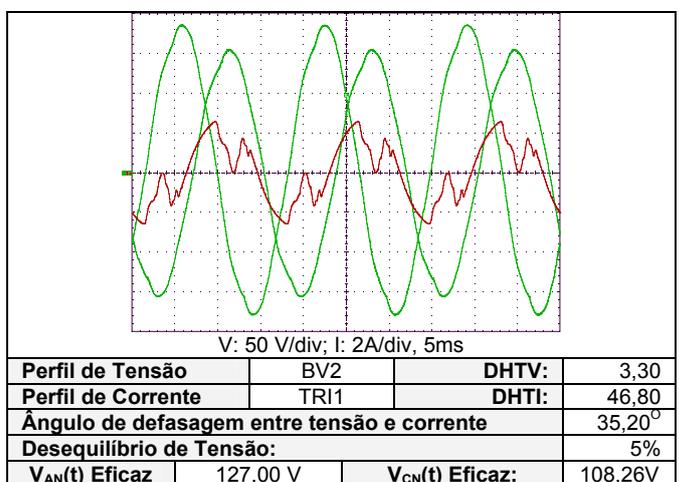


Fig. 5. Exemplos das interfaces gráficas desenvolvidas para controlar e monitorar o sistema de avaliação proposto.



(a)



(b)

Fig. 6. Exemplos dos perfis de tensão e corrente utilizados nos ensaios experimentais: (a) considerando somente distorção harmônica (b) considerando distorção harmônica e desequilíbrio de tensão.

A tabela I mostra informações referentes a distorção harmônica e o ângulo de defasagem instantâneo entre as formas de onda de tensão e corrente para alguns casos disponíveis no banco de dados do sistema proposto.

TABELA I

Dados Referentes A Alguns Pares De Perfis Utilizados Nos Ensaios De Avaliação

Perfil V	Perfil I	DHTV	DHTI	Ângulo de Deslocamento (θ)
v0	i0	0.80	0.25	0.00
bv2	tri1	3.30	46.80	35.20
tv1	tri1	3.02	46.80	34.99
tv1	indi1	3.02	18.40	39.20
tv1	indi2	3.02	4.46	34.99
indv1	tri1	4.76	46.80	18.40
indv1	indi1	4.76	18.40	18.40
indv1	rui3	4.76	7.54	18.40
indv2	tri1	1.89	46.80	53.56
ruv2	tri1	2.86	46.80	47.30
ruv3	tri1	2.49	46.80	23.54
ruv3	indi2	2.49	4.46	23.54

IV. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

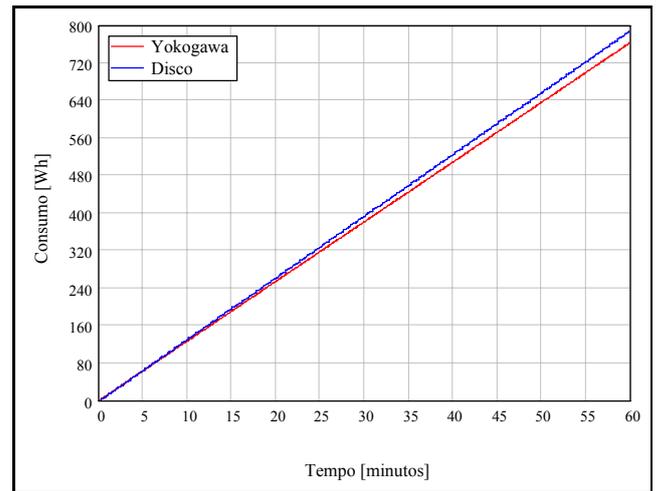
No processo de avaliação de um equipamento de medição selecionado, tipo indução ou eletrônico, o mesmo é submetido a todos os casos e situações disponíveis no banco de dados para a sua categoria (bifásico ou trifásico), resultando em um conjunto de ensaios experimentais.

Cada ensaio experimental para os medidores de energia elétrica ativa do tipo indução, considerando um par de perfis selecionado, possui uma hora e trinta minutos de duração (1h:30min) divididos em duas etapas. Os primeiros trinta minutos são relacionados com o processo de estabilização mecânica e térmica, e os sessenta minutos restantes são utilizados na efetivação do ensaio. No segundo estágio, o sistema registra o consumo em watt-hora aferido pelo dispositivo em teste via leitura de revoluções do disco e o watt-hora informado pelo medidor padrão a cada cinco segundos.

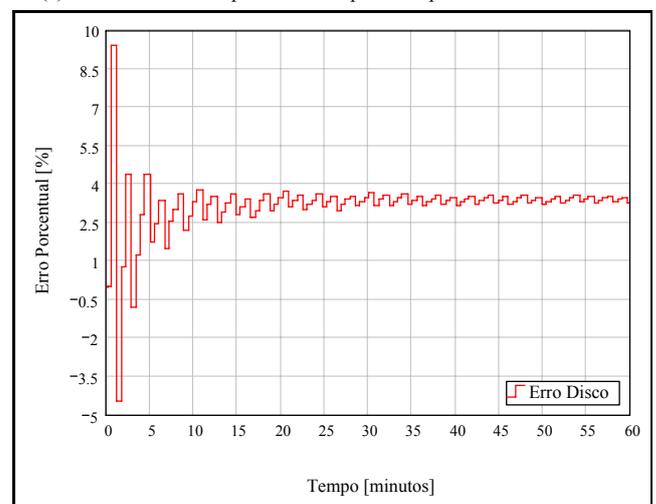
Para o caso dos ensaios dos medidores eletrônicos, o primeiro estágio é reduzido a cinco minutos referentes aos procedimentos de início de operação dos equipamentos, e no segundo estágio os dados são registrados a cada um segundo, durante uma hora (sessenta minutos).

A Figura 7 ilustra resultados experimentais, considerando um exemplo para o medidor watt-hora bifásico do tipo indução, submetido a distorções harmônicas de tensões e correntes. A Figura 7.(a) mostra o watt-hora registrado pelo medidor padrão e pelo medidor em avaliação, enquanto a Figura 7.(b) mostra o erro de medição instantâneo apresentado pelo medidor em avaliação.

Assim, considerando-se todos os ensaios experimentais, pode-se determinar um modelo genérico relativo ao erro de medição esperado pelo equipamento analisado, obtido através de análises estatísticas e métodos de regressão linear, considerando-se os limites de distorções harmônicas e desequilíbrios analisados.



(a) Watt-hora medido pelo medidor padrão e pelo medidor em teste.



(b) Erro de medição instantâneo apresentado pelo medidor em teste.

Fig. 7. Resultados experimentais, exemplo para medidor watt-hora bifásico do tipo indução, considerando distorções harmônicas.

V. MODELAÇÃO DO ERRO DE MEDIÇÃO

Considerando a grande dificuldade em se desenvolver um modelo analítico para os medidores de energia elétrica, que seja consistente e preciso, optou-se por obter um modelo empírico, que é obtido através de resultados experimentais. Essa metodologia foi escolhida devido à adequação desses modelos baseados em dados para a representação de sistemas de grande complexidade [16]. A princípio, através de análises estatísticas dos resultados dos ensaios laboratoriais dos medidores de energia determinaram-se os parâmetros mais relevantes para a estimação dos erros de medição dos medidores.

Com esses dados, pode-se estabelecer um modelo matemático que seja capaz de representar com um maior índice de confiabilidade tanto o equipamento adotado como padrão (Yokogawa WT230), quanto os medidores ensaiados.

No decorrer destas análises matemáticas constatou-se que a influência nos resultados do erro com relação à variável DHT de tensão, para os perfis de tensão utilizados nos ensaios experimentais, era muito pequena. Portanto, esta variável poderia ser desconsiderada, na análise dos dados

obtidos, uma vez que DHT de tensão não apresentava variações significativas em sua amplitude, variando em torno de 2,5% a 4,8%.

Adicionalmente, de acordo com as normas de distribuição, as DHT das tensões devem estar restritas a valores inferiores a 5%. Assim, mesmo que esta variável apresente seu máximo valor permitido, não representaria uma variação tão acentuada com relação às amplitudes utilizadas nos ensaios experimentais, resultando em pequena influência nos erros dos medidores, considerando-se o universo dos sinais (tensões e correntes e suas DHT) analisados. Entretanto, há de se destacar que os modelos obtidos podem ser utilizados com exatidão, dentro das limitações quantitativas desta variável (DHT tensões). As extrapolações dos modelos propostos para amplitudes maiores das DHT das tensões e das correntes, serão objeto de investigações futuras.

Por outro lado, verificou-se que o valor do erro calculado possui uma sensibilidade grande com relação ao parâmetro de amplitude da DHT de corrente, e, portanto, esta variável é de grande relevância para a determinação dos modelos.

Outra constatação foi a de que o ângulo de deslocamento referente à passagem por zero das formas de onda de correntes e tensões instantâneas, que influencia diretamente no valor da potência ativa transferida para a carga, também é uma variável de elevada significância nos resultados dos erros. Desta forma, com o objetivo de tornar linear o comportamento das funções relacionadas com estes valores de ângulos de deslocamentos entre as formas de ondas instantâneas de tensões e correntes, efetuou-se uma transformação nesta variável através da adoção de seu valor co-senoidal.

Portanto, em função dos resultados das análises de sensibilidade de parâmetros estipulou-se que os modelos requeridos deveriam estar relacionados com o valor da DHT do perfil de corrente utilizado e com o valor do co-seno do ângulo de deslocamento entre as formas de onda instantâneas de tensão e corrente, considerando-se as limitadas variações das DHTs de tensões analisadas.

Assim, a análise estatística realizada consistiu na realização de regressões polinomiais em todos os conjuntos de dados, considerando cada par de perfis corrente e tensão como um ponto discreto.

De maneira aleatória, setenta e cinco por cento (75%) dos pontos foram selecionados na determinação das funções nas execuções das regressões lineares, e, os pontos restantes, foram utilizados como pontos de teste para a validação das expressões determinadas.

Uma vez determinadas as funções matemáticas que representam os modelos dos medidores (padrão e equipamento ensaiado), foi realizada a composição da expressão matemática do erro para cada família de medidores, resultando em uma expressão matemática polinomial, onde o denominador representa o modelo matemático do equipamento adotado como padrão e o

numerador representa a diferença entre os modelos do medidor sob ensaio e do modelo do padrão.

O desenvolvimento e a obtenção do modelo matemático do erro, através dos resultados experimentais, são descritos a seguir.

A. Modelo Matemático do Erro

O primeiro passo consistiu em montar uma matriz, denominada de X , contendo os valores do operador co-senoidal dos ângulos de cada combinação dos perfis de tensões e correntes ensaiados, e, os valores das distorções harmônicas de cada perfil de corrente. O exemplo do formato para a matriz do modelo matemático para medidores trifásicos pode ser verificado em (1), em que n representa o número de perfis experimentais ensaiados (disponíveis no banco de dados).

A seguir, foram definidas outras duas matrizes, uma referente aos valores registrados pelo medidor submetido aos ensaios e outra referente aos valores registrados pelo medidor padrão Yokogawa, conforme (2) e (3).

$$Y_{\text{medidor}} = \begin{bmatrix} Wh_{\text{medidor}_1} \\ Wh_{\text{medidor}_2} \\ \vdots \\ Wh_{\text{medidor}_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y_{\text{yokogawa}} = \begin{bmatrix} Wh_{\text{yokogawa}_1} \\ Wh_{\text{yokogawa}_2} \\ \vdots \\ Wh_{\text{yokogawa}_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dessas n observações, foram separadas em torno de 75% para treinamento da função, e os 25% restantes foram destinados para testes aleatórios. Com os dados de treino, encontra-se a ponderação (pesos) utilizando o método de regressão conhecido como regressão *Ridge* [17], representado pela equação (4).

$$w = (X^T \cdot X + \alpha^2 \cdot I)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (4)$$

Sendo que α é um parâmetro de regularização a ser otimizado (ele proporciona uma resposta mais confiável e uma melhor generalização para a análise dos dados) [18].

O valor de α foi otimizado utilizando o método de validação cruzada. O valor de w é encontrado com os dados de treino para diversos valores de α utilizando (4). Os dados de teste são utilizados para avaliar o erro de teste para cada α . O melhor valor será aquele que apresentar o menor erro de teste.

Definindo a variável w através de (5), é possível montar a equação do polinômio obtido pelo método de regressão empregado, dado por (6).

$$w = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T \quad (5)$$

$$y = a \cdot \cos(\hat{\text{angulo}}) + b \cdot \cos(\hat{\text{angulo}})^2 + c \cdot \cos(\hat{\text{angulo}})^3 + d \cdot DHTI^2 + e \cdot DHTI \cdot \cos(\hat{\text{angulo}}) + f \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\text{angulo}}_1) & (\cos(\hat{\text{angulo}}_1))^2 & (\cos(\hat{\text{angulo}}_1))^3 & (DHTI_1)^2 & DHTI_1 \times \cos(\hat{\text{angulo}}_1) & 1 \\ \cos(\hat{\text{angulo}}_2) & (\cos(\hat{\text{angulo}}_2))^2 & (\cos(\hat{\text{angulo}}_2))^3 & (DHTI_2)^2 & DHTI_2 \times \cos(\hat{\text{angulo}}_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\hat{\text{angulo}}_n) & (\cos(\hat{\text{angulo}}_n))^2 & (\cos(\hat{\text{angulo}}_n))^3 & (DHTI_n)^2 & DHTI_n \times \cos(\hat{\text{angulo}}_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Assim, (6) representa o modelo analítico de um medidor genérico. Note que as parcelas quadráticas, cúbicas e lineares são escolhidas a partir da especificação da matriz X, em (1). Esta configuração de parâmetros foi escolhida por ser a que melhor conseguiu representar o comportamento dos medidores dentre as analisadas, e pode ser entendida como sendo os graus de liberdade para a realização da regressão linear. Quanto maior o número de graus de liberdade, melhor o modelo se ajustará aos dados.

Por outro lado, também há o aumento da complexidade do modelo, que é indesejável. Portanto, existe um compromisso entre a fidelidade aos dados e a baixa complexidade dos modelos.

Em seguida, são determinadas as ponderações referentes aos dados do medidor de energia elétrica ativa sob ensaio e também do medidor padrão Yokogawa, ou seja, o vetor w .

Com a obtenção dos modelos do medidor ensaiado e do medidor padrão, torna-se possível encontrar o modelo do erro relativo de medição. Assim, os erros estimados dos medidores podem ser expressos por (7).

$$\hat{E} = \frac{W_{\text{medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} \cdot X + \text{bias} \pm \text{desvio} \quad (7)$$

Onde:

$$\text{bias} = \text{média} \left(\text{Erro} - \frac{W_{\text{medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} \cdot X \right) \quad (8)$$

$$\text{desvio} = 1,96 \times \text{std} \left(\text{Erro} - \frac{W_{\text{medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} \cdot X \right) \quad (9)$$

De maneira análoga, foi realizada a análise dos erros dos medidores bifásicos, diferenciando-se apenas pela matriz X, onde foi excluída uma coluna, como ilustra (10). A coluna excluída corresponde à parcela quadrática da DHT de corrente, que se mostrou desnecessária para o modelo desses medidores. Consequentemente, a equação (6) para o caso

bifásico não possui o coeficiente “d”, pois seu valor seria omitido na sua posição do vetor coluna w .

VI. RESULTADOS

Um conjunto de medidores de energia elétrica ativa de diferentes fabricantes, incluindo medidores do tipo indução e eletrônicos, foi selecionado para compor a população de avaliação, de acordo com a Tabela II. Cada amostra de medidor possuía três repetições disponíveis para ensaios experimentais. Assim, na determinação da modelação todos os ensaios foram repetidos três vezes, considerando-se as três repetições para cada amostra (tipo de medidor).

TABELA II

População de Medidores Utilizados Nos Testes		
Medidor	Amostras	Repetições por Amostra
Indução Bifásico	5	3
Indução Trifásico	6	3
Eletrônico Trifásico	5	3

Com os resultados experimentais e com o estabelecimento dos modelos de erros através da metodologia de modelação de erros, torna-se possível a análise comportamental do erro de medição de cada amostra (tipo de medidor).

A Figura 8 ilustra o exemplo de resultado obtido para o caso de um medidor de energia bifásico do tipo indução. Os modelos são apresentados na forma de gráficos de superfície tridimensional, mostrando os pontos obtidos através dos ensaios experimentais (+), e a expressão matemática que descreve o erro esperado de medição.

Adicionalmente, na apresentação da superfície relacionada com o erro percentual são apresentados três planos, que representam as regiões do intervalo de confiança (IC_95%) adotado para o desenvolvimento dos modelos. Desta maneira, a região compreendida entre os planos limites inferior e superior, foi capaz de representar no mínimo 95% do conjunto dos pontos testados, ou seja, os resultados experimentais obtidos.

$$X = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\text{ângulo}}_1) & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_1))^2 & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_1))^3 & DHTi_1 \times \cos(\hat{\text{ângulo}}_1) & 1 \\ \cos(\hat{\text{ângulo}}_2) & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_2))^2 & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_2))^3 & DHTi_2 \times \cos(\hat{\text{ângulo}}_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\hat{\text{ângulo}}_n) & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_n))^2 & (\cos(\hat{\text{ângulo}}_n))^3 & DHTi_n \times \cos(\hat{\text{ângulo}}_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

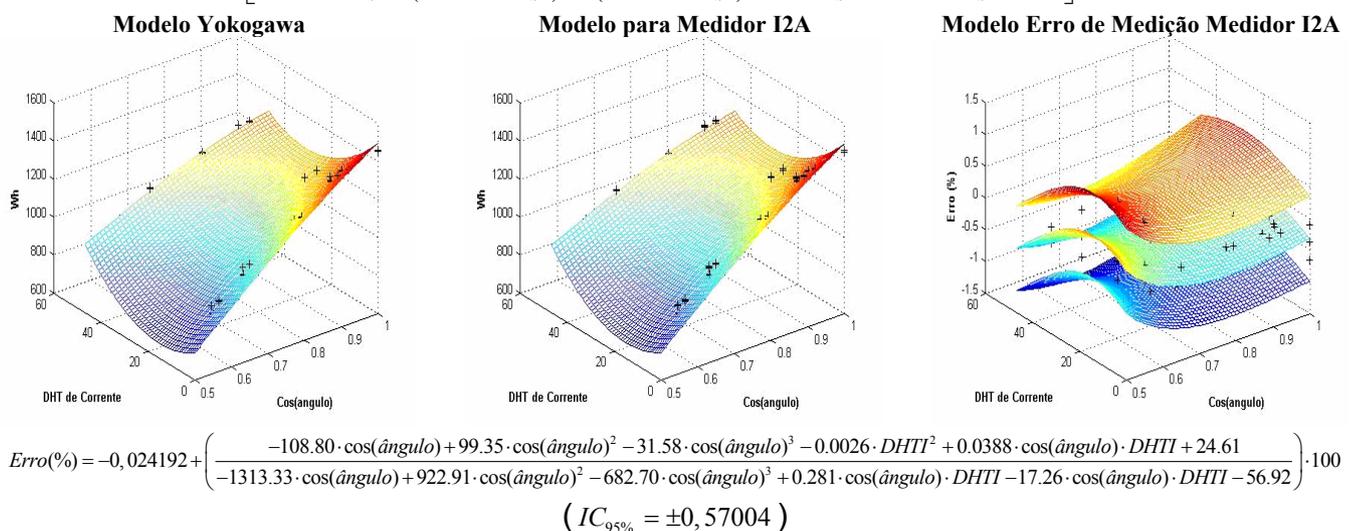
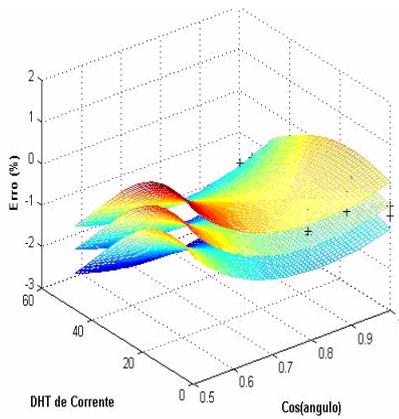
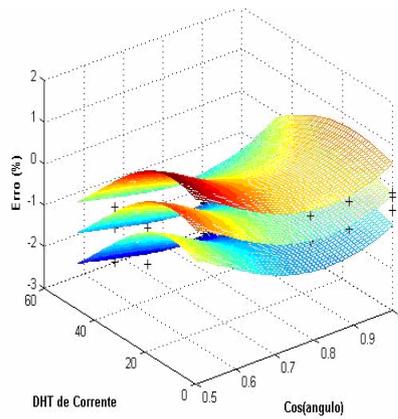


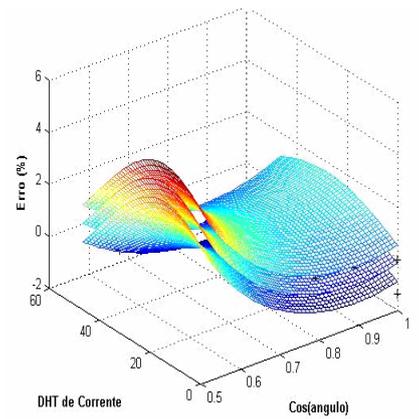
Fig. 8. Superfícies dos modelos encontrados para a amostra I2A dos medidores de energia do tipo indução bifásico, e a expressão do erro de medição sem considerar condições de desequilíbrio de tensão.



Modelo de Erro Medidor I3A

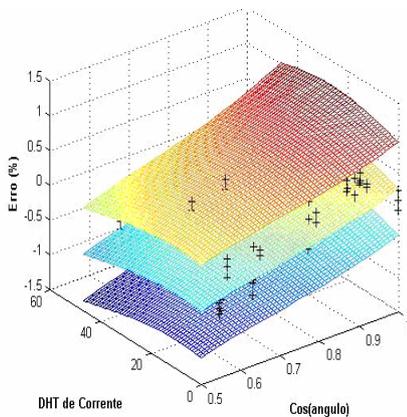


Modelo de Erro Medidor I3B

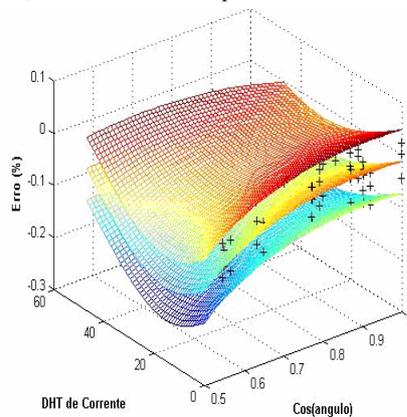


Modelo de Erro Medidor I3C

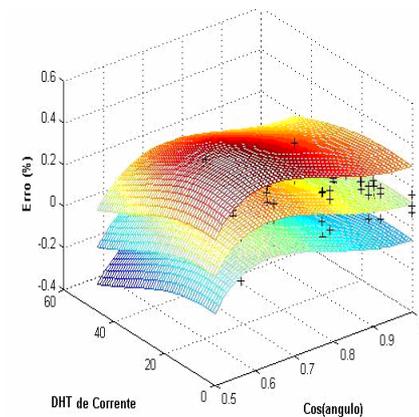
Fig. 9. Superfícies dos Modelos de erro de medição encontradas para três amostras de diferentes medidores de energia do tipo indução trifásicos, considerando desequilíbrio de tensão de 3%.



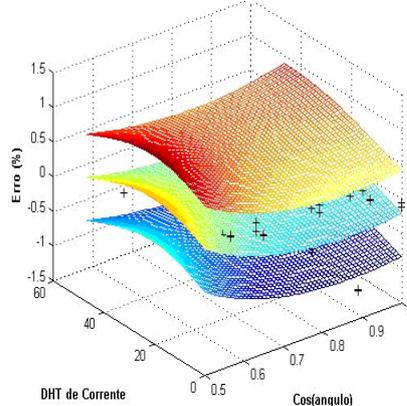
Modelo de Erro Medidor E3A



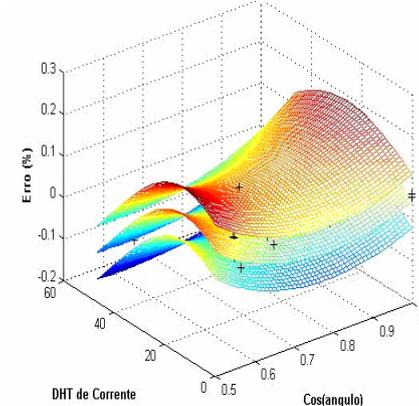
Modelo de Erro Medidor E3B



Modelo de Erro Medidor E3C



Modelo de Erro Medidor E3D



Modelo de Erro Medidor E3E

Fig. 10. Superfícies dos Modelos de erro de medição encontradas para as cinco amostras de medidores de energia do tipo eletrônicos trifásicos, sem considerar desequilíbrio de tensão.

A Figura 9 apresenta os modelos obtidos para o erro de medição, na forma de superfícies, para algumas das amostras de medidores do tipo indução trifásicos avaliados, considerando condições de desequilíbrio de tensão de 3%. Analogamente, a Figura 10 apresenta as superfícies referentes aos erros esperados de medição para todas as cinco amostras de medidores eletrônicos avaliadas, sem considerar desequilíbrio de tensão. Assim, através da utilização dos modelos determinados para cada equipamento analisado, consegue-se prever o erro de medição esperado pelo equipamento quando submetido a condições de distorções

harmônicas não disponíveis nos resultados experimentais, considerando-se os limites dos sinais ensaiados.

VII. CONCLUSÕES

Um sistema completo para avaliar erros de medição em medidores de energia elétrica ativa (do tipo indução e eletrônicos) considerando a operação em condições de distorções harmônicas e desequilíbrio das formas de onda de tensões foi apresentado neste trabalho.

As principais características do sistema de medição proposto incluem a programação de perfis de formas de onda

de tensões e correntes estáveis, possuindo controle do ângulo de deslocamento e das distorções harmônicas, banco de dados das formas de onda de tensões e correntes com o conteúdo harmônico representando casos reais registrados em diferentes tipos de consumidores (industrial, comercial, rural e residencial), permitindo o controle de todos os processos através de um software de gerenciamento interativo com interface gráfica de usuário amigável. A análise do erro de medição está baseada na adoção de um medidor de energia elétrica padrão com classe de exatidão de 0,1%.

Adicionalmente, o sistema de medição é uma ferramenta importante para a derivação de modelos representativos dos erros de medição dos equipamentos de medição de energia elétrica baseados em resultados experimentais.

Uma metodologia para modelação dos erros de medição em medidores de energia ativa (watt-hora), baseada na utilização de dados provenientes de ensaios experimentais também foi apresentada. A metodologia contorna os efeitos negativos da modelação totalmente analítica, minimizando os erros relativos às aproximações e efeitos não modelados.

Além disso, a metodologia de modelação é genérica e pode ser aplicada na obtenção de modelos de erro de medição em medidores de energia do tipo indução e em medidores eletrônicos.

Finalmente, através dos modelos desenvolvidos para cada equipamento analisado, é possível efetuar a predição do erro de medição, considerando condições de distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão, dentro das regiões de validade da modelação (5% de DHT de tensão e 50% de DHT de corrente), em casos em que o ensaio experimental não está disponível para consulta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Rodrigo A. N. de Oliveira, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Task Force, "Effects of Harmonics on Equipments", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, April 1993.
- [2] K. D. A. Munasinghe, S. G. Abeyratne, "Power Quality And Harmonic Loads", in *Proc. Of First International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 52-57, August 2006.
- [3] M. M. Réche, S. C. P. Valle, "Controle Metrológico de Medidores De Energia Elétrica", disponível em INMETRO, http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/comites/ctem/docs/controlometrologico_r06_dider-divel.ppt, Acesso em: 18 de novembro de 2007.
- [4] M. Z. EL-Sadek, E.-N. A. Ibrahim, R. M. Kamel, "Watt-Hour Meters Readings Errors in Presence of Harmonics And Active Filters", in *Proc. Of IEEE - International Conference on Electronics and Computer Engineering*, pp. 759-762, 2004.
- [5] M. M. Saied, "On the Accuracy Of Watt-Hour Meters In Nonsinusoidal Environment", in *Proc. Of IEEE Industry Applications Conference*, vol.3, pp. 2219-2225, October 1995.
- [6] C. W. Williams, A. Domijan, E. Embriz-Santander, A. Gilani, G. Lamer, C. Stiles, "Watt-Hour Meter Accuracy Under Controlled Unbalanced Harmonic Voltage And Current Conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 64-72, January 1996.
- [7] E. Makram, C. Wright, A. Girgis, "A Harmonic Analysis Of The Induction Watt-Hour Meter's Registration Error", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.7, no.3, pp. 1080-1088, July 1992.
- [8] J. Driesen, T. Van Craenenbroeck, D. Van Dommelen, "The Registration Of Harmonic Power By Analog And Digital Power Meters", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.47, no.1, pp. 195-198, February 1998.
- [9] D. Pejic, V. Vujicic, "Accuracy Limit Of High-Precision Stochastic Watt-Hour Meter", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.49, no.3, pp.617-620, June 2000.
- [10] P. S. Filipiski, R. Arseneau, "Behavior Of Watt Meters And Watt-Hour Meters Under Distorted Waveform Conditions", in *IEEE Tutorial: Nonsinusoidal situations: effects on the performance of meters and definitions of power*, IEEE Publications, 1990.
- [11] M. Mañana, L. I. Eguiluz, J. C. Lavandero, A. Ortiz, C. Renedo, "Impact Of The Use Of Active Filters In Conventional Energy Meters", in *Proc. Of 8th Spanish-Portuguese International Conference on Electrical Engineering*, CD-ROM, July 2003.
- [12] F. Wang, M.H.J. Bollen, "Frequency-Response Characteristics and Error Estimation in RMS Measurement", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1569-1578, October 2004.
- [13] D. Gallo, C. Landi, N. Pasquino, N. Polese, "A New Methodological Approach to Quality Assurance of Energy Meters Under Non-Sinusoidal Conditions", in *Proc. of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1626-1631, April 2006.
- [14] F. A. S. Gonçalves, C. A. Canesin, M. Sciamana, L. N. Velasco, L. C. Silva, "Complete System To Test Measurement Errors In Active Electrical Energy Meters Under Harmonic Distortion Conditions", in *Proc. of Brazilian Power Electronics Conference*, CD-ROM, September 2007.
- [15] F. A. S. Gonçalves, C. A. Canesin, J. O. P. Pinto, L. Galoto Junior, R. B. Godoy, M. Sciamana, L. C. Evangelista, E. A. Martins Junior, "Modelação de Erros de Mediçao Em Medidores de Energia Elétrica Ativa Baseada Em Ensaio Experimentais", in *Proc. of Brazilian Conference on Electric Energy Quality*, CD-ROM, Agosto 2007.
- [16] V. Cherkassky, F. Mulier, *Learning from Data*, John Wiley & Sons, 1998.
- [17] A. E. Hoerl, R. W. Kennard, "Ridge Regression: Based Estimation for Non-orthogonal Problems" *Technometrics*, vol. 12, No. 1, 55-67, 1970.
- [18] A. N. Tikhonov, "Regularization of Incorrectly Posed Problems", *Soviet Mathematics. Doklady*, vol. 4, pp. 1624-1627, 1963.

DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Alberto Canesin, nascido em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), Florianópolis (SC). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FEIS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). É editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics. Suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção ativa do fator de potência.

Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, nascido em Porto Velho (RO) em 1975, é engenheiro eletricitista (1998), mestre (2001) e doutor (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente trabalha como pesquisador associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), na UNESP-FEIS. Suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, técnicas de associação para conversores, técnicas de comutação não dissipativa, conversores CC-CC e CA-CC, sistemas de controle digital (FPGA, DSP, Microcontroladores, J2ME), síntese de sistemas eletrônicos empregando linguagem de descrição de hardware (VHDL/Verilog), e plataformas distribuídas para E-Learning em eletrônica de potência.

Luis Carlos Origa Oliveira, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1983) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1990). Atualmente é professor titular da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: harmônicas, transformadores, qualidade de energia, compensação de cargas, filtros harmônicos.

José Carlos Rossi, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos Usp (1987) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1996). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente nos seguintes temas: corrente de excitação e dupla excitação.

João Onofre Pereira Pinto, nasceu em 1966 em Valparaíso (SP), Brasil. Engenheiro Eletricista pela Universidade

Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, em 1990. Mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, em 1993, e Ph.D. pela The University of Tennessee, Knoxville, TN, EUA em 2001. Atualmente é professor da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil, onde ocupa o cargo de coordenador do programa pós-graduação em engenharia elétrica. Pesquisador do CNPq, suas áreas de interesse incluem mineração de dados, sistema de suporte a decisão, processamento de sinais, aplicações de redes neurais artificiais, lógica nebulosa, algoritmos genéticos e wavelets em eletrônica de potência, técnicas PWM, controle e acionamento de máquinas elétricas.

Luigi Galotto Junior, nascido em 1981 em São Paulo (SP), é engenheiro eletricitista (2003) e mestre em aplicações de inteligência artificial (2006) pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Tem trabalhado como pesquisador desde 2003 e, atualmente, é professor colaborador na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Me. Galotto tem a maior parte das publicações em congressos de eletrônica de potência do IEEE e publicações em monitoramento e diagnóstico.

Ruben Barros Godoy, nascido em 1982 em Campo Grande (MS), recebeu o título de Engenheiro Eletricista e mestre pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande (MS) – Brasil em 2004 e 2006. Atualmente é aluno do curso de doutorado da Universidade Estadual Paulista, campus de Ilha Solteira, SP. Integrou o time finalista da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no desafio internacional “The Future Energy Challenge 2005”, patrocinado pelo IEEE. Suas áreas de interesse incluem eletrônica de potência, eletromagnetismo e qualidade de energia. Atua em pesquisas nas áreas de conversores de potência, processamento de sinais e controle digital.

Marcio Sciamana, nascido em Rio Claro (SP) em 1973, é engenheiro eletricitista (1997) pelo Centro Universitário Salesiano - UNISAL, em Americana (SP). Atualmente trabalha como engenheiro sênior na área de Medição de Energia Elétrica da concessionária de energia ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A., em Campinas (SP), onde vem trabalhando no desenvolvimento de projetos de sistemas de telemetria (automação da medição) e de sistemas de gestão e controle de perdas não-técnicas. Suas áreas de interesse incluem medição e qualidade de energia elétrica, automação de redes e subestações e projetos de inovação tecnológica (*Smart Metering, Smart Grid*).

Luiz Carlos Evangelista da Silva, nascido em Mirandópolis (SP) em 1962, é engenheiro industrial (1994) e mestrando em Engenharia Elétrica, na área de Automação, pela Universidade Estadual Paulista - UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente trabalha como engenheiro na área de Medição de Energia Elétrica na concessionária ELEKTRO - Eletricidade e Serviços SA, em Campinas (SP). Suas áreas de interesse incluem medição e qualidade da energia elétrica, medidas elétricas, prospecção de novas tecnologias de sistemas de medição e regulamentação do setor elétrico.