

Sistema De Avaliação De Erros De Medição Em Medidores De Energia Elétrica Ativa Em Condições De Distorções Harmônicas

Carlos A. Canesin¹, Flávio A. S. Gonçalves¹, Luis C. Origa¹, José C. Rossi¹, Rodrigo A. N. Oliveira¹
Marcio Sciamana², Ernesto A. Mertens Junior² e Luiz C. E. da Silva²
UNESP – FEIS - Universidade Estadual Paulista¹ e ELEKTRO – Eletricidade e Serviços SA²

Resumo – Este trabalho propõe um novo sistema de avaliação de erros em medidores de watt-hora do tipo indução e eletrônico, capaz de impor nos testes experimentais condições distintas de distorções harmônicas para tensões e correntes, além de permitir ensaios com formas de onda de tensões equilibradas ou desequilibradas, provenientes de um banco de dados. Um medidor de energia elétrica com classe de exatidão 0,1%, Yokogawa WT230, foi adotado como padrão de referência na determinação dos erros medidos nos testes de avaliação experimental. As principais características do sistema incluem a capacidade de proporcionar perfis de formas de onda de tensões e correntes estáveis e pré-determinados, até a ordem harmônica de 3 kHz, com precisa programação de ângulos de defasagens e distorções harmônicas. O banco de dados empregado no sistema foi composto por um conjunto de formas de onda de correntes e tensões, obtidas através de medições em consumidores com diferentes características de carga (industrial, comercial, rural e residencial). Os percentuais de desequilíbrios admitidos nos ensaios foram de 3% e 5%. Adicionalmente, o sistema proposto é capaz de controlar todos os processos e hardwares envolvidos, registrando automaticamente todas as informações dos testes experimentais através de um aplicativo de gerenciamento com interface gráfica e amigável ao usuário. Com o objetivo de demonstrar a operação do sistema proposto, alguns resultados resumidos são apresentados, provenientes de uma extensa campanha de ensaios experimentais executados para a determinação dos efeitos das distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões sobre medidores watt-hora eletromecânicos do tipo indução e eletrônicos, bifásicos e trifásicos, de diferentes fabricantes.

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

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 [1-3].

As cargas anteriormente citadas apresentam elevado conteúdo harmônico nas correntes drenadas da rede de corrente alternada, resultando em: distorção na tensão de alimentação, redução do fator de potência, elevado nível de terceiro harmônico na corrente de neutro, deslocamento excessivo de correntes e tensões, interferências eletromagnéticas (EMI - electromagnetic interferences), operação indevida de equipamentos de proteção e erros de medição [2].

Atualmente, no Brasil, os medidores watt-hora do tipo indução são os dispositivos convencionais mais utilizados para a medição de energia 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 [3-4].

Contudo, nos sistemas reais de distribuição os medidores de energia não estão expostos a condições equilibradas e com formas de onda senoidais. Usualmente, estão expostos a formas de onda de correntes com elevadas distorções harmônicas, além de distorções harmônicas nas tensões e desequilíbrios de tensões. Assim, operando nestas condições de distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões, seu desempenho pode ser afetado, resultando em erros de medição e consequente 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 [5].

Neste contexto, 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, todos estes 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 [6-10].

Analogamente, os mesmos problemas surgem na determinação dos modelos teóricos para os medidores eletrônicos, uma vez que a parte mais crítica está relacionada com o software empregado nos cálculos, que nem sempre é disponibilizado pelos fabricantes para avaliação. Além disso, também existe a necessidade da modelação dos sistemas de

aquisição (incluindo sensores de tensões e correntes), circuitos de condicionamento de sinais, processadores de sinais, etc.

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.

Usualmente, as análises experimentais de teste e aferição do watt-hora registrado em medidores de energia elétrica ativa empregam geradores de formas de onda de referência em conjunto com fontes de potência trifásicas que amplificam os sinais de referência para reproduzir as características das formas de onda de tensão e corrente, desejadas para os ensaios de avaliação. Entretanto, o elevado custo financeiro relacionado com a utilização de dois arranjos experimentais (um para a tensão e outro para a corrente) para compor o sistema completo, incluindo-se a complexidade da implementação do sistema de sincronismo, requerido para impor o ângulo de deslocamento entre os dois arranjos independentes, representam aspectos negativos desta metodologia.

Neste contexto, este trabalho propõe um novo sistema de avaliação de erros em medidores de energia elétrica ativa do tipo indução e eletrônico, 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. Adicionalmente, um aplicativo de gerenciamento com interface gráfica e amigável ao usuário proporciona o controle de todos os processos e hardwares envolvidos, registrando todas as informações relevantes dos testes experimentais de maneira automática. Resultando em um sistema de elevada eficácia para avaliação de medidores de energia elétrica ativa.

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 Figs. 1 e 2.

A arquitetura do sistema está baseada em um gerador trifásico de formas de onda com controle de componentes harmônicas, até a ordem harmônica de 3 kHz, uma fonte de potência trifásica, uma placa PCI de conversão digital-analógica com resolução de entrada de 16 bits e amplitudes de saída entre $\pm 5V$, um amplificador de tensão, um dispositivo lógico programável FPGA para efetuar o controle do sincronismo, um sistema de aquisição de dados (8 canais analógicos, 16 bits e 1Mhz de taxa máxima de aquisição permitida) com sensores de tensão e corrente, um photo-sensor, um medidor de energia elétrica com elevada exatidão (classe 0,1%), adotado como padrão para as medições efetuadas, e um computador para executar o aplicativo de controle do sistema.

Considerando-se que, nos medidores de energia watt-hora do tipo indução as bobinas de tensão e corrente são interconectadas internamente, para a aplicação da metodologia proposta, baseada na alimentação do medidor com formas de onda de correntes e tensões de fontes diferentes, estas interconexões devem ser desconectadas para permitir tal procedimento.

Basicamente, os dispositivos que compõe 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).

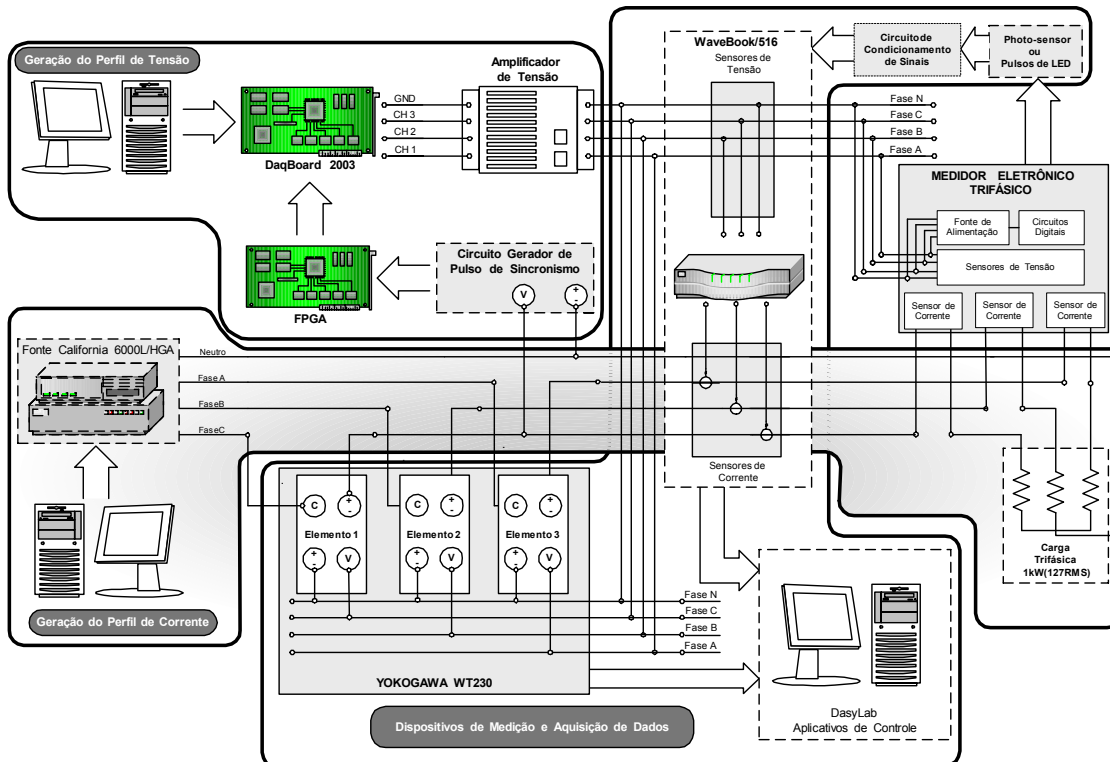
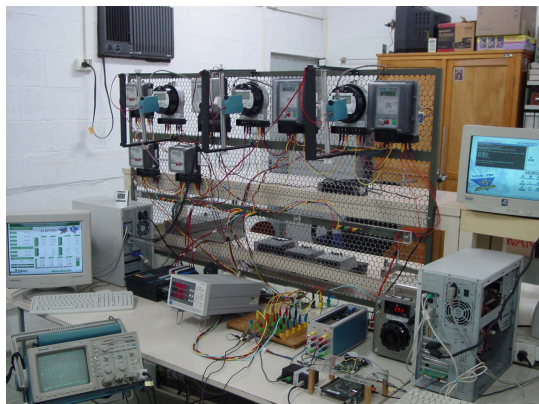


Fig. 1 – Diagrama de blocos do sistema proposto, exemplo da configuração utilizada na avaliação dos medidores trifásicos eletrônicos.



(a) Medidores Eletrônicos



(b) Medidores do tipo indução

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

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 6kVA acoplada a um dispositivo gerador de formas de onda HGA (ambos da Califórnia 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).

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.



Fig. 3 – Amplificador de tensão CA trifásico desenvolvido.

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 Fig. 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.

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 empregou-se um dispositivo FPGA que monitora o instante 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 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% (potencia/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 Kd (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.

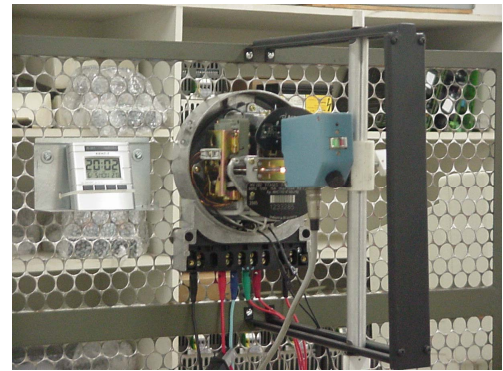


Fig. 4 – Sensor de voltas de disco acoplado a um medidor bifásico do tipo indução em teste.

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 (Kd), 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.

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 Fig. 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.

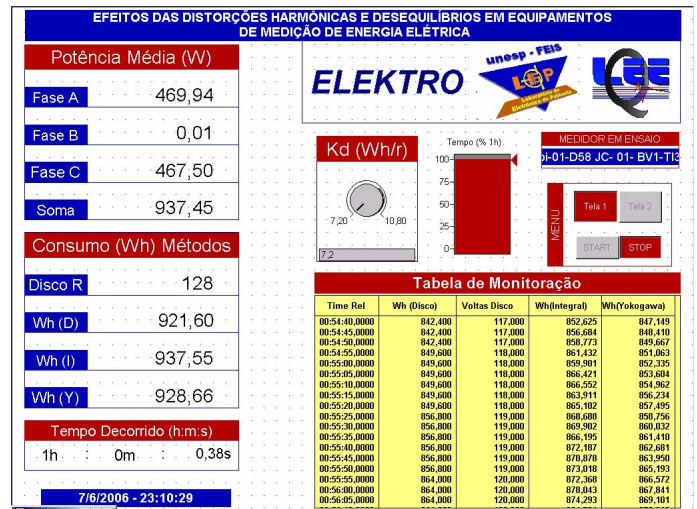
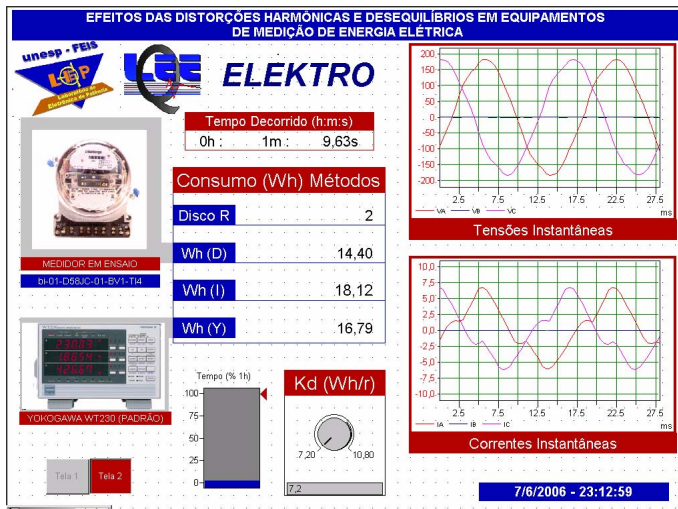
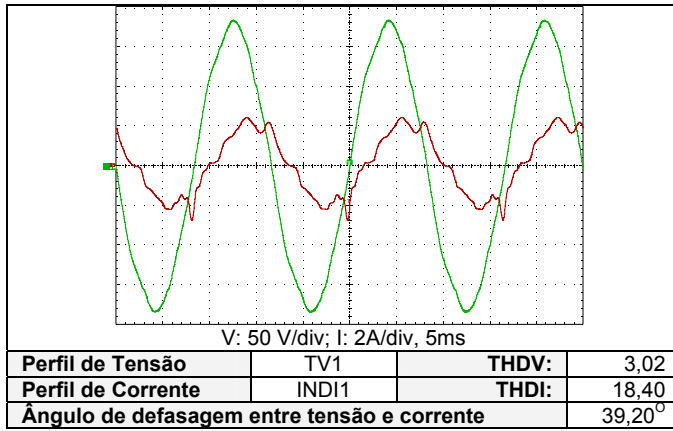
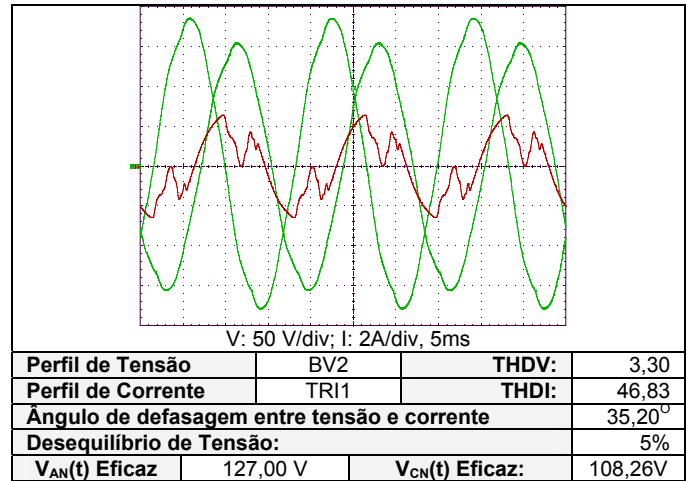


Fig. 5 – Exemplos das interfaces gráficas desenvolvidas para controlar e monitorar o sistema de avaliação proposto.



(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

Os transdutores de tensão e sensores de corrente (WaveBook) 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 fig. 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 outra 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.

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.

IV. 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.

Tabela I - Dados referentes a alguns pares de perfis utilizados nos ensaios de avaliação.

Perfil V	Perfil I	THDV	THDI	Ângulo de Deslocamento (θ)
v0	i0	0.80	0.25	0.00
tv1	tri1	3.02	46.80	34.99
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

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 fig. 7.(b) mostra o erro de medição instantâneo apresentado pelo medidor em avaliação.

Um grande número de ensaios experimentais foi realizado para o estudo de cada equipamento selecionado, tipos indução e eletrônicos. O medidor avaliado é submetido a todos os casos e situações disponíveis no banco de dados para a sua categoria (bifásico ou trifásico). Finalmente, 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. 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.

A figura 8 mostra o erro de medição em função da distorção harmônica da corrente e do cosseno do ângulo (θ), de defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente, dado pelo modelo genérico obtido a partir dos resultados experimentais de um equipamento exemplo avaliado. Este resultado é apresentado na forma de gráficos de superfície tridimensional, onde são mostrados os pontos obtidos através dos ensaios experimentais. Adicionalmente, são apresentados três planos, que representam as regiões do intervalo de confiança (IC_95%) adotado para o desenvolvimento dos modelos. Assim, a região compreendida entre os planos limites inferior e superior, é capaz de representar no mínimo 95% do conjunto dos resultados experimentais obtidos.

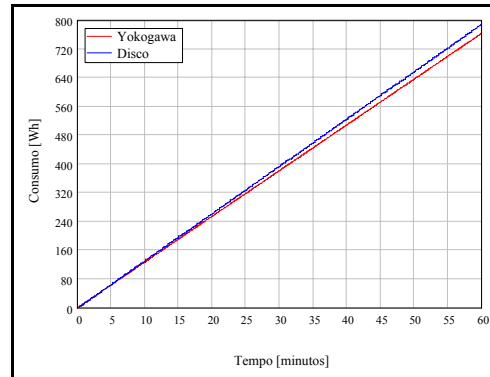
V. CONCLUSÕES

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. A análise do erro de medição está baseada na adoção de um medidor de energia elétrica padrão com classe de exatidão de 0,1%.

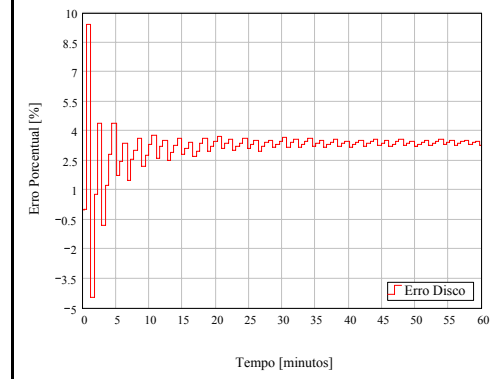
As principais características do sistema proposto incluem a programação de perfis de formas de onda de tensões e correntes estáveis, possuindo controle do ângulo de deslocamento e das distorções harmônicas, banco de dados das formas de onda de tensões e correntes com o conteúdo harmônico representando 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. Adicionalmente, o sistema é uma ferramenta importante na derivação de modelos representativos dos erros de medição dos equipamentos de medição de energia elétrica baseados em resultados experimentais, possibilitando a predição do erro de medição esperado pelo equipamento, quando submetido a condições de distorções harmônicas dentro dos limites impostos pelo modelo, especialmente em casos onde a informação do ensaio experimental não está disponível para consulta.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Cavallini, G. Mazzanti, G.C Motanari " The Effect of Nonsinusoidal Supply on Life Performance of Electrical Insulating Systems" - International Conference on Harmonics and Quality of Power - IEEE - ICHQP96, Las Vegas USA, 1996;
- [2] K. Sangsun " Harmonic reference current generation for unbalanced nonlinear loads" - IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 773-778, 2003;
- [3] E. M. Makram e K. P. Thornton "Study of power system harmonics in an unbalanced system using the three-phase bus impedance matrix" - Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 30-34, 1998;



(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.

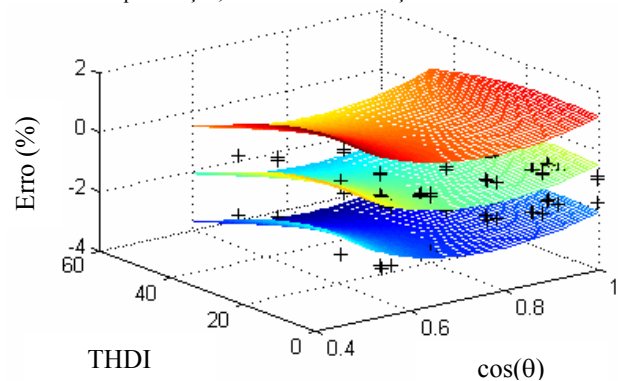


Fig. 8 – Exemplo do modelo do erro do medidor, determinado a partir dos ensaios experimentais, como função da THDI e do $\cos(\theta)$.

- [4] A. A. Girgs et all "Testing the performance of three-phase induction wathour meters in the presence of harmonic distortion" - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, N. 4, pp. 689-695, 1990;
- [5] M. M. Saied " On the accuracy of watt-hour meters in nonsinusoidal environment" - IEEE Transaction on Industry Applications , pp. 2219-2225, 1995;
- [6] E. Makram, C. Wright e A. Girgis " A harmonic analysis of the induction wathour meter's registration error" - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, N.3, pp.1080-1088, Jul, 1992;
- [7] P. S. Filipski e R. Arseneau "Behavior of wattmeters and wathourmeters under distorted waveform condicions" IEEE Tutorial: Nonsinusoidal situations: effects on the performance of meters and definitions of power, IEEE Publications, 1990;
- [8] R. Sasdelli et all "Revenue metering in the presence of distortion and unbalance: Myths and Reality" - International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 42-47, 1998;
- [9] C. W. Williams "Wathour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions" - IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N. 1, pp. 64-72, 1996;
- [10] IEEE Task Force, -"Effects of Harmonics on Equipments" - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.8, N.2, pp. 672-680, April, 1993.