

# Sistema Automático para Ensaios de Perdas em Núcleos de Transformadores Monofásicos

Thiago C. Batista<sup>1</sup>, José G. A. Lira<sup>1</sup>, Raimundo C. S. Freire<sup>1</sup>, Benedito A. Luciano<sup>1</sup>, Francisco C. F. Guerra<sup>1</sup>, Renato Cucatu<sup>2</sup>

1- Universidade Federal de Campina Grande UFCG, 2- Companhia Energética de Tocantins CELTINS

E-mails: thiago.batista@ee.ufcg.edu.br, liragutemberg@gmail.com, freire@dee.ufcg.edu.br, benedito@dee.ufcg.edu.br, chagas@dee.ufcg.edu.br, renato.inacio@redenergia.com

**Resumo** – Neste trabalho é apresentado um sistema de medição automática, de baixo custo, desenvolvido para obter as perdas no núcleo e a corrente de excitação de transformadores monofásicos. A validação do protótipo desenvolvido foi feita a partir de testes comparativos utilizando um wattímetro digital portátil. Devido às técnicas utilizadas na aquisição e cálculo das formas de onda envolvidas no cálculo das perdas, as perdas no núcleo e a corrente de excitação são obtidas com boa exatidão.

**Palavras-chave:** Núcleos magnéticos, perdas, sistema automático de medição, transformador.

**Abstract** - In this paper is presented a low cost automated measurement system developed to obtain the core losses and the excitation current of single-phase transformers. This system includes specific hardware and software that allows the accomplishment of this aim, as specified by the user. Due to the techniques used in the acquisition and computation of the waveforms involved in loss calculation, the core losses and excitation current are obtained with high accuracy.

**Keywords:** Automatic core loss system, magnetic cores, soft magnetic materials, transformer.

## I. INTRODUÇÃO

O conceito de eficiência energética está fundamentado na redução de perdas e na eliminação de desperdícios. Nos sistemas elétricos, as perdas estão presentes em todas as etapas: conversão, transmissão, distribuição e consumo. Como os transformadores são equipamentos fundamentais do sistema elétrico, os estudos por busca de novas tecnologias e materiais na sua fabricação vêm sendo aperfeiçoados ao longo do tempo, tendo como objetivo a redução de perdas e, por consequência, a eficiência energética [1].

Para a caracterização de transformadores, em termos de eficiência energética, ensaios de curto-circuito e de circuito aberto são realizados com vista à determinação dos parâmetros elétricos (resistências e reatâncias), da corrente de excitação e das perdas no núcleo e nos enrolamentos.

No Brasil, os ensaios citados são realizados seguindo a norma NBR-5356-1, da ABNT [2]. Nesses ensaios, ao se utilizar instrumentos analógicos, tais como: voltímetros (valor médio e valor *RMS*), amperímetros e wattímetros, o operador necessita fazer anotações dos valores exibidos pelos instrumentos, o que pode ser uma fonte de erros no processo de medição. Na linha de montagem de fábricas de transformadores, devido ao grande número de unidades em

produção, tais ensaios se tornam demorados e dispendiosos. Por isso, atualmente há uma busca por equipamentos que realizem esses ensaios com rapidez, portabilidade e redução de custos [3].

Adicionalmente, os requisitos de produtividade e qualidade têm levado as distribuidoras de energia elétrica a automatizarem seus processos, com a introdução de dispositivos de medição baseados em microprocessador. Em tais medições, o maior desafio é minimizar os erros de amplitude e de fase introduzidos pelos efeitos parasíticos dos circuitos, pelos atrasos de tempo introduzidos por cabos coaxiais e pelo próprio processo de digitalização [4].

Nesse trabalho é apresentado o processo de desenvolvimento de um sistema automático para a determinação das correntes de excitação e perdas em transformadores monofásicos. Esse sistema foi desenvolvido com o propósito de ser um equipamento de fácil manuseio e de baixo custo.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### A. Modelamento do Transformador

Para a análise e o levantamento de um modelo representativo de um transformador, todas as suas imperfeições devem ser levadas em conta. Desse modo, foi utilizado um modelo de circuito equivalente, baseado em princípios físicos.

Adotando como base o modelo do circuito equivalente para o transformador ideal e adicionando-se as representações das resistências dos enrolamentos, reatâncias de dispersão, reatância de magnetização e resistência representativa das perdas ativas no núcleo, o transformador real pode ser representado pelo circuito elétrico equivalente, conforme ilustrado na Figura 1.

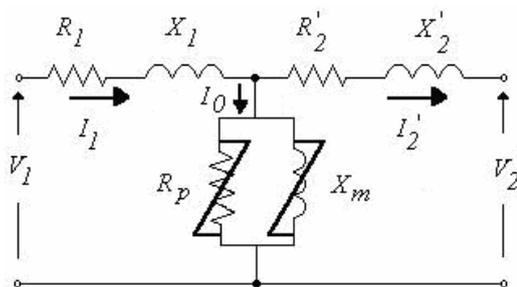


Figura. 1 Circuito elétrico equivalente do transformador com todos os parâmetros refletidos ao primário.

Na Figura 1,  $V_1$  é a tensão de alimentação do primário,  $I_1$  é a corrente no enrolamento primário,  $R_1$  é a resistência do enrolamento primário,  $X_1$  é a reatância de dispersão do primário,  $I_0$  é a corrente de excitação,  $R_p$  é a resistência representativa das perdas ativas no núcleo,  $X_m$  é a reatância de magnetização,  $R'_2$  é a resistência do enrolamento secundário, refletida ao primário,  $X'_2$  é a reatância de dispersão do secundário, refletida ao primário,  $V_2$  e  $I_2$  são, respectivamente, a tensão e a corrente elétrica do secundário, refletidas ao primário.

Neste modelo, os parâmetros resistências e reatâncias de dispersão são lineares, enquanto os parâmetros  $X_m$  e  $R_p$  são não-lineares e representam as perdas eletromagnéticas decorrentes do processo cíclico de magnetização e desmagnetização do núcleo.

Deve-se ressaltar que as impedâncias representadas no circuito equivalente estão relacionadas com as componentes de tensão e corrente na frequência fundamental e, por isso, a corrente  $I_1$  deve ser representativa desta componente. Adicionalmente, há de se considerar que a corrente de excitação possui duas componentes: uma em fase com a tensão e outra em quadratura que, em função da não linearidade magnética do núcleo, possui componentes harmônicas, sendo a de ordem três a mais significativa.

A inclusão da não-linearidade é importante, pois os transformadores funcionam com variações temporais de fluxo que colocam, às vezes, o ponto de operação um pouco acima do joelho da curva de saturação [5].

### B. Determinação das Potências Ativas e Aparentes e fator de potência

Mediante a realização do ensaio de circuito-aberto nos transformadores de distribuição, podem-se determinar as perdas ativas no núcleo magnético, a potência aparente e o fator de potência do transformador sob ensaio. No caso de transformadores monofásicos, a potência aparente  $S$  é determinada a partir da expressão (1).

$$S = I_{RMS} \cdot V_{RMS} \quad (1)$$

Nesta expressão,  $I_{RMS}$  é a corrente de excitação e  $V_{RMS}$  é a tensão da rede. A potência ativa  $P$  é definida no domínio discreto como sendo o somatório do produto da corrente pela tensão amostrada, onde  $N$  é número de pontos utilizados na amostragem, conforme indica a expressão (2).

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \cdot i[n] \quad (2)$$

O fator de potência é determinado pela relação (3).

$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (1)$$

O modo pelo qual o fator de potência foi definido é idêntico ao utilizado nos sistemas senoidais, diferenciando-se apenas no significado do ângulo  $\phi$ . Para sistemas senoidais, esse ângulo está relacionado à defasagem angular (temporal) entre os sinais de corrente e tensão. Em sistemas com excitação distorcida, o fator de potência não tem relação com a diferença de fase entre os sinais citados.

### C. Hardware do Equipamento

O hardware desenvolvido na realização do equipamento proposto compreende às fontes de alimentação, circuitos condicionadores de sinais para as tensões e correntes, seletor automático de escala de corrente, circuitos de conversão analógica-digital e circuitos de interface de comunicação de dados com isolamento óptica. O uso de opto-acopladores permite uma isolamento eficiente e simples.

No módulo de aquisição os sinais de tensão e corrente são inicialmente tratados por circuitos de condicionamento para adequá-los ao processo de amostragem e digitalização de forma que o processador possa executar as operações desejadas.

O módulo que contém o microprocessador está associado às funções de conversão, escolha de escala automática de corrente e envio dos dados para o microcomputador para a determinação dos valores RMS de tensão, corrente de excitação, potências ativas e reativas e fator de potência.

Para a determinação das perdas e da corrente de excitação de um transformador sob ensaio em vazio, é necessário obter as formas de ondas da corrente no primário e a tensão de alimentação do transformador (tensão da rede). Na Figura 2 é mostrado o circuito montado para a aquisição das grandezas de interesse.

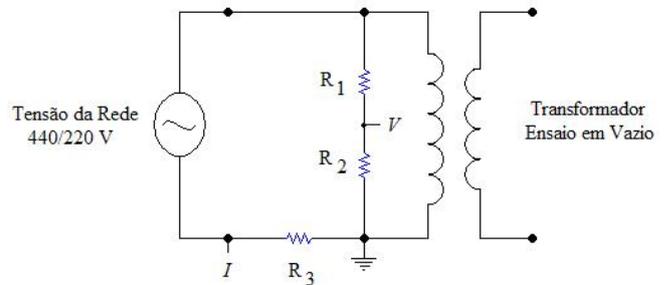


Figura 2 - Circuito para determinação das perdas em transformadores monofásicos.

O equipamento foi projetado para operar com uma tensão de alimentação de 220 V e 440 V em uma faixa de corrente de excitação compreendida entre 5 mA e 2 A. Para a digitalização dos sinais de corrente e tensão é utilizado o conversor AD interno ao microcontrolador PIC18F4520. A escolha de tal dispositivo deveu-se ao atendimento dos requisitos técnicos propostos, além do baixo custo, considerado como um dos parâmetros exigidos para o desenvolvimento do equipamento. Como os ensaios são realizados na frequência fundamental da rede, 60 Hz, o microcontrolador utilizado proporciona frequência de amostragem suficiente para a realização dos experimentos, 31,25 kHz. Os resistores  $R_1$  e  $R_2$  formam um divisor resistivo,

utilizado para atenuar a tensão da rede para um nível entre 0 e 5 V, condicionando os sinais para níveis adequados ao conversor do microcontrolador. A corrente  $I$  é obtida de forma indireta, a partir da tensão sobre o resistor  $R_3$ .

O resistor  $R_3$  é um *shunt* de impedância  $1 \Omega$ , portanto, uma corrente de 5 mA gera apenas uma tensão de 5 mV, o que se torna um módulo de tensão muito baixo para a digitalização do sinal de corrente, pois o microcontrolador em uso possui uma resolução de 10 *bits*. A solução foi projetar um amplificador com ganho variável automático com escala controlada pelo microcontrolador. O diagrama de blocos do amplificador com ganho variável automático é apresentado na Figura 3.

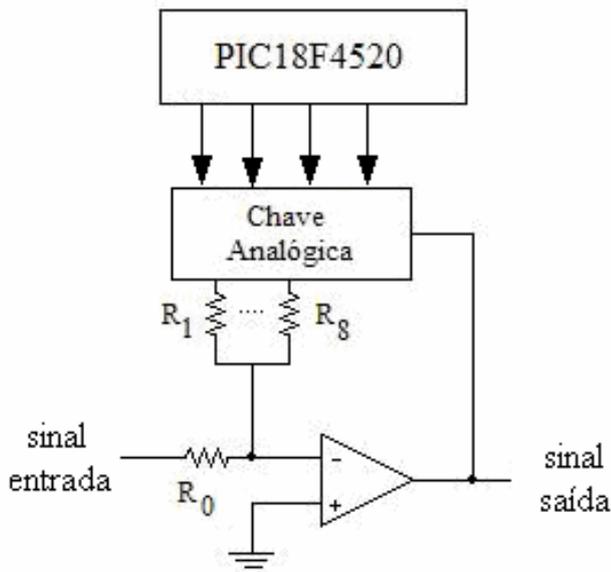


Figura 3 – Amplificador com ganho variável automático.

De início, a digitalização dos sinais de corrente e tensão realizado pelo PIC é feita com o amplificador automático funcionado com ganho unitário, desse modo verifica-se através de uma tabela pré-determinada em que faixa de tensão esse sinal proporcional a corrente se encontra. Em seguida, é enviado um comando através do microcontrolador definindo qual o ganho ideal para esse sinal. Os ganhos foram definidos de modo que praticamente toda a faixa do sinal proporcional à corrente esteja entre 2 V e 4 V.

Para aumentar a exatidão da digitalização dos sinais, ambos os sinais são retificados através de retificadores de precisão de onda completa.

O equipamento possui comunicação com o computador através da porta serial (RS-232). Para um isolamento entre o equipamento de medição e o computador foi utilizado um acoplamento óptico entre o pino Tx do microcontrolador e o MAX232. O diagrama funcional completo do equipamento é mostrado na Figura 4. Vale salientar que os sinais  $V$  e  $I$  são correspondentes aos apresentados na Figura 2.

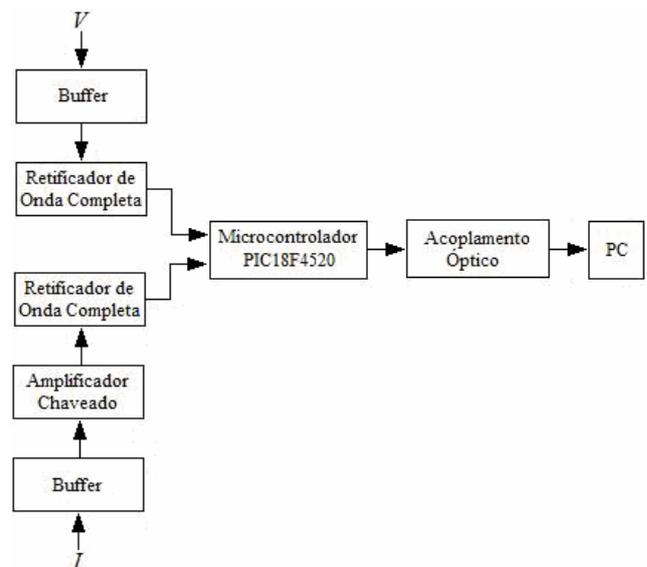


Figura 4 - Diagrama funcional do hardware

#### D. Software do Equipamento

O *software* é responsável pela execução das tarefas de aquisição dos dados, seleção de escalas, armazenamento em memória, processamento numérico, comunicação serial com a estação de trabalho e visualização de dados de forma gráfica e por tabela. Para o cálculo do valor *RMS* a integração é implementada com a discretização de 360 pontos, cujos valores estão armazenados no vetor correspondente.

O *software* para controle do sistema de medição de corrente e tensão possui uma interface de gerenciamento de dados entre o usuário e o sistema de medição. A configuração do *software* permite ao usuário uma visualização simples e funcional das informações coletadas. Após ser estabelecida a comunicação entre o equipamento de medição e o computador, através da comunicação com a porta serial RS-232, os sinais digitalizados são transmitidos do PIC para o microcomputador, onde os mesmos são processados, disponibilizando as variáveis de interesse, tais como a corrente de excitação e as perdas nos núcleos dos transformadores. A tensão da rede e a corrente de excitação são disponibilizadas tanto em valores absolutos de pico e *RMS*, quanto na forma de gráficos. Os gráficos da tensão da rede são importantes para a análise da qualidade da energia elétrica em que o transformador acha-se instalado.

### III. RESULTADOS

Na realização dos ensaios experimentais foi utilizada a bancada de testes mostrada na Figura 5, na qual podem ser vistos os seguintes elementos: em primeiro plano, o protótipo do sistema automático desenvolvido, à direita um transformador monofásico de baixa potência (100 VA, 220 V/110 V, 60 Hz) com núcleo de FeSi e no segundo plano a tela de um microcomputador. Adicionalmente, foram utilizados nos ensaios um transformador com núcleo de liga

amorfa (1 kVA, 220 V/110 V, 60 Hz) e uma lâmpada incandescente de 100 W.

o wattímetro, e também a faixa de erro de cada leitura realizada com o wattímetro.



Figura 5 – Transformador monofásico de 100 VA, com núcleo de FeSi, submetido a ensaio de circuito-aberto, com o equipamento desenvolvido mostrado em primeiro plano.

Na Figura 6 é mostrada a tela contendo os dados de saída. Vê-se que à direita estão os valores de pico e *RMS* da tensão e da corrente de excitação, além das perdas ativas, potência aparente e fator de potência. À esquerda, são apresentadas as formas de onda da tensão da rede (sinal 1) e da corrente de excitação (sinal 2). Como pode ser observada a tensão a qual o transformador sob ensaio é submetido não é uma senóide pura, apresentando algumas componentes harmônicas, principalmente de 3ª e 5ª ordem.

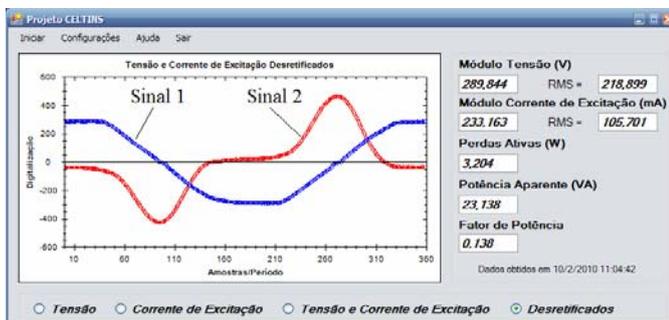


Figura 6 – Tela do *software* desenvolvido, ilustrado com o ensaio de circuito-aberto de um transformador monofásico de 1 kVA, com núcleo de liga amorfa.

Na Figura 7 são apresentadas os resultados correspondentes a uma lâmpada incandescente de 100 W. Pela análise dos gráficos de tensão e corrente, observa-se que ambos os sinais estão em fase, pois a lâmpada pode ser representada apenas como uma resistência elétrica, validando o processo de digitalização do equipamento proposto.

Para a validação do protótipo desenvolvido, foram feitos testes comparativos utilizando um wattímetro digital portátil modelo WD-950, marca *Instrutherm*.

Nas tabelas 1 e 2 são mostrados os resultados obtidos a partir do protótipo desenvolvido, das leituras efetivadas com

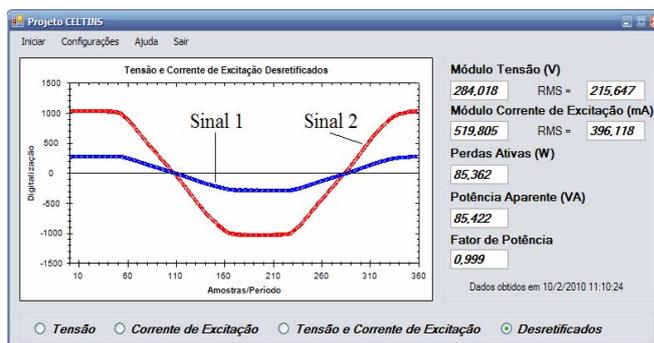


Figura 7 – Formas de ondas de tensão e corrente para uma lâmpada incandescente de 100 W.

TABELA I  
COMPARAÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO E TENSÃO DA REDE ENTRE O PROTÓTIPO E O WATTÍMETRO WD-950

	Corrente excitação (mA)	Tensão da rede (V)
Protótipo	47,106	215,192
Wattímetro	47,7 ± 0,736	214,1 ± 1,568

TABELA II  
COMPARAÇÃO DAS PERDAS, POTÊNCIA APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA ENTRE O PROTÓTIPO E O WATTÍMETROS WD-950

	Perdas ativas (W)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
Protótipo	3,488	9,989	0,359
Wattímetro	3,421 ± 0,094	10,210 ± 0,23	0,334 ± 0,04

Como são indicados nas Tabelas 1 e 2, os resultados obtidos a partir do sistema desenvolvido se enquadram na faixa de erro de cada leitura proposta pelo fabricante do wattímetro. A faixa de erro designada pelo fabricante garante que o valor exato de cada leitura obtida pelo seu instrumento de medição encontra-se entre essa faixa.

#### IV. CONCLUSÃO

O sistema automático de medição de perdas e da corrente de excitação em transformadores monofásicos desenvolvido reúne os recursos disponíveis em um microcontrolador com circuitos elétricos de fácil implementação. Além, de fornecer informações, tais como as formas de ondas da tensão da rede e da corrente de excitação, muito importantes na constatação da qualidade da energia elétrica e do estado em que se encontra o transformador sob ensaio, o produto final se apresenta de baixo custo. Os resultados obtidos com o equipamento proposto se mostraram satisfatórios, apresentando-se compatíveis com a faixa de erro de cada leitura realizada em testes comparativos utilizando o wattímetro de modelo WD-950, marca *Instrutherm*.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à CAPES, à FAPESQ-PB, à Fundação Parque Tecnológico e à CELTINS pelo suporte ao desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Hasegawa, and D. Azuma, “Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, p.2451- 2456, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-1 (2007). Transformadores de potência. Rio de Janeiro: ABNT.
- [3] J. M. E. Vicente, “Uma contribuição à automação de ensaios em transformadores de potência em média tensão”. Tese (Doutorado) – Coordenação de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2006.
- [4] A. J. Batista, J. C. S. Fagundes, and P. Viarouge, “An automated measurement system for core loss characterization”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 48, No. 2, p.663- 667, 1999.
- [5] T. D. Kefalas. and A. G. Kladas, “Harmonic Impact on Distribution Transformer No-Load Loss”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1, pp. 193-200, January 2010.