

## Caracterização harmônica com rastreabilidade metrológica de uma fonte de tensão CA

### Harmonic characterization with metrological traceability of an AC voltage source

**André Luis dos Santos Firmino, Patrícia Cals de O. Vitória, Leonardo A. Abreu de Souza, Rosane Moreira Debatin, Marcelo Brito Martins**

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro

E-mail: alfirmينو@inmetro.gov.br

**Resumo:** O presente artigo apresenta medições de conteúdo harmônico que foram realizadas na saída de uma fonte de tensão CA regulada, utilizando-se instrumento com rastreabilidade metrológica para cada harmônico medido. Essa fonte faz parte da infraestrutura do Laboratório de Metrologia em Alta Tensão do Inmetro (Lamat).

**Palavras-chave:** Caracterização harmônica, rastreabilidade metrológica, fonte de tensão CA.

**Abstract:** This article presents harmonic content measurements performed at the output of a regulated AC voltage source, using instrument with metrological traceability for each measured harmonic. This source is part of the infrastructure of the High Voltage Metrology Laboratory of Inmetro (Lamat).

**Keywords:** Harmonic characterization, metrological traceability, source of AC voltage.

## 1. INTRODUÇÃO

Faz parte da infraestrutura de um laboratório de metrologia em alta tensão (AT), na parte de equipamentos, uma fonte de AT em corrente alternada (CA) que pode chegar a níveis de centenas de quilovolts (kV) em sua saída. Tal fonte é usualmente composta por um regulador de baixa tensão que alimenta um transformador de potencial elevador. Esse regulador é conectado à rede de energia elétrica do laboratório e é acionado remotamente para fins de controle e operação da fonte.

Entre outras características técnicas da fonte de AT do laboratório, é importante conhecer a qualidade da sua tensão de saída em termos de distorção harmônica (DH). Como laboratórios de metrologia realizam calibrações utilizando sistemas de medição com baixas incertezas, essa caracterização deve ser feita por meio de procedimento que utilize instrumentos rastreados, o que não é tão comum para instrumentos que medem DH.

Nesse trabalho são apresentadas informações sobre medição de harmônicos em sinais de tensão

elétrica e um procedimento utilizado no Laboratório de Metrologia em Alta Tensão do Inmetro (Lamat) para quantificar o conteúdo harmônico da tensão que alimenta seus circuitos de calibração em AT.

## 2. INDICADORES DE CONTEÚDO HARMÔNICO

Um dos indicadores utilizados para quantificar a DH dos sinais de tensão e corrente é a Distorsão Harmônica Total (DHT) ou mais conhecido em inglês como THD - Total Harmonic Distortion. O espectro em frequência também é utilizado quando se deseja mais detalhes sobre cada harmônico.

### 2.1. Distorsão harmônica Total (THD)

A THD é muito utilizada para indicar o peso das componentes harmônicas do sinal em relação à sua componente fundamental, já que é definida em percentual pela seguinte equação, considerando um sinal de tensão  $v(t)$  em regime permanente [1]:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h_{min}=2}^{h_{max}} v_h^2}}{v_1} \times 100 \quad (1), \text{ onde:}$$

$v_1$  = Máximo da componente fundamental de  $v(t)$ ;

$v_h$  = Máximo da harmônica de ordem  $h$  de  $v(t)$ ;

$h_{min}$  = ordem harmônica mínima;

$h_{max}$  = ordem harmônica máxima.

### 2.2. Espectro em frequência

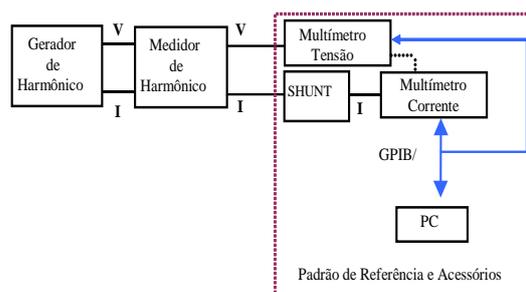
Representando discretamente a amplitude máxima de cada harmônico em função de sua frequência, obtém-se um histograma chamado de espectro em frequência [2]. Por meio do espectro em frequência é possível analisar qual ou quais harmônicos possuem as contribuições mais relevantes para a THD. A distorsão harmônica individual de tensão (DIT) é dada pela expressão:

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

## 3. RASTREABILIDADE DA MEDIÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO

Para quantificar o conteúdo harmônico com rastreabilidade metrológica é necessário que o instrumento utilizado seja calibrado em situação de excitação similar às formas de onda que se deseja medir.

O Laboratório de Metrologia em Energia Elétrica (Lamel) do Inmetro possui a infraestrutura necessária para essa calibração, com rastreabilidade metrológica a seus padrões de tensão e frequência, ilustrada na figura 1. Neste trabalho, somente o circuito de tensão é utilizado. A fonte de tensão é capaz de reproduzir cada componente harmônico individualmente, em termos de sua amplitude e fase [3].



**Figura 1** – Diagrama esquemático da calibração de medidor de harmônicos.

O processo de calibração de medidores em regime não senoidal consiste em se comparar o valor do sinal medido pelo padrão utilizado como referência com o valor do sinal indicado no equipamento sob calibração, submetendo ambos às mesmas condições [4].

### 3.1. Instrumento de medição de harmônicos

O instrumento utilizado para as medições foi um analisador de energia, que possui as características nominais conforme tabela 1.

### 3.2. Objeto de medição

Nesse primeiro momento, para fins de definição do procedimento, as medições foram realizadas no sinal de tensão de saída da fonte reguladora de

tensão CA do Lamat, que possui as especificações mostradas na tabela 2:

**Tabela 1.** Características nominais do analisador de energia.

Tensão máxima de entrada	600 V <sub>ef</sub>
Impedância de entrada	1 MΩ//20 pF
Faixa de harmônicas	h = 1 até h = 51
Largura de banda utilizável	10 Hz à 3,5 kHz
Tensão mínima de entrada	4 V <sub>pp</sub> ou 1,4 V <sub>ef</sub>

**Tabela 2.** Características nominais da fonte reguladora de tensão CA do Lamat.

Potência	42 kVA
Tensão de alimentação	220 V
Tensão de saída	0 à 240 V
Frequência	47 à 63 Hz

Para atingir os níveis de AT em calibrações realizadas no Lamat (até 200 kV em CA), utiliza-se um transformador elevador, com relação de 1100:1. Esse transformador é alimentado pelo regulador cuja tensão de saída, em vazio, foi caracterizada nesse trabalho.

### 3.2. Quantificação e incertezas

A THD foi quantificada por meio do seu valor convencional (VC) definido como:

$$VC THD (\%) = V_m + E \quad (3)$$

onde:

V<sub>m</sub> = valor médio de três medições de THD

E = erro percentual obtido na calibração do instrumento de medição de harmônicos

A incerteza expandida da medição (U) é declarada como a incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%. A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com o guia ISO GUM [5].

## 4. METODOLOGIA APLICADA

Na primeira etapa do trabalho, as medições foram realizadas no quadro de controle da tensão de saída da fonte reguladora, em 50 e 60 Hz, pelo analisador de energia.

A segunda etapa consistiu em reproduzir as formas de onda obtidas pelo analisador, no Sistema de Referência do Lamel, para calibração do instrumento analisador de energia. Para cada configuração obteve-se o valor de correção conforme equação (3) e a respectiva incerteza de medição.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

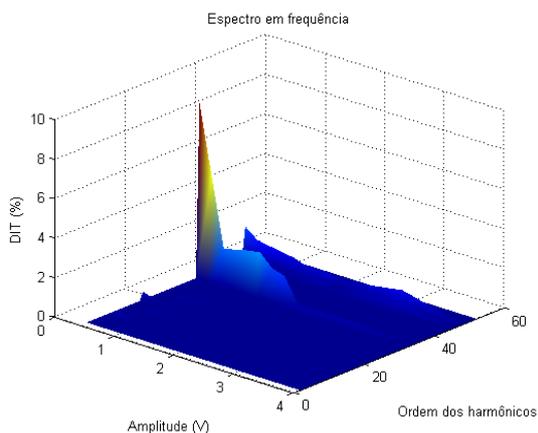
Os resultados mais relevantes das medições realizadas encontram-se na tabela 3. As medições acima de 6 V em 60 Hz e acima de 0,6 V em 50 Hz apresentaram valores de THD da mesma ordem de grandeza da incerteza do instrumento.

**Tabela 3.** Resultados de THD

Freq. (Hz)	V <sub>1</sub> (V)	Prospectivo AT (V)	VC THD (%)	U (%)
60	0,42	466	10,8	0,3
	0,62	689	6,5	0,3
	0,83	910	4,4	0,3
	1,23	1355	2,6	0,3
	1,43	1576	2,6	0,3
	1,64	1799	2,7	0,3
	1,84	2021	1,3	0,3
	2,04	2236	1,1	0,3
	3,05	3354	1,3	0,3
	4,05	4458	0,7	0,3
50	5,06	5563	0,5	0,3
	6,06	6655	0,4	0,3
50	0,42	466	1,3	0,3
	0,62	689	0,8	0,3

Os resultados da tabela 3 mostram que a THD varia consideravelmente conforme o nível da amplitude no começo da faixa da tensão de saída da fonte. A figura 2 mostra a superfície 3D “DIT

x Amplitude x Ordem dos harmônicos”, em que se percebe a redução da distorção, conforme o aumento da amplitude. Observou-se também que os harmônicos com contribuição mais relevante para a THD foram os de ordem 34, 47 e 48 respectivamente.



**Figura 2** – Representação 3D do espectro em frequência das amplitudes com  $V_I$  em 60 Hz.

Além disso, vale ressaltar que cada amplitude possui espectros em frequência distintos, fato este que ressalta a importância da caracterização espectral. Observa-se também que o espectro em frequência com a fundamental em 50 Hz é consideravelmente diferente do espectro em 60 Hz, apresentando distorções menores para as mesmas amplitudes, no caso considerado.

## 6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi apresentada uma metodologia para medição rastreada de harmônicos de tensão.

A calibração plena e com rastreabilidade metrológica de um instrumento de medição de DH envolveria um número elevado de pontos, já que se teria que cobrir plenamente as faixas de amplitude e frequência, sendo que para cada amplitude seria necessário cobrir toda a faixa de harmônicos, para cada fundamental (50 e 60 Hz).

Pelo procedimento apresentado nesse trabalho, primeiro são realizadas as medições que servem para definir condições de contorno e possibilitar a calibração do instrumento apenas para as faixas encontradas de amplitudes e harmônicos. Com isso, os resultados obtidos podem ser pontualmente rastreados caso a caso.

Especificamente no caso do sinal de tensão caracterizado, os resultados obtidos mostraram presença de harmônicos consideráveis para amplitudes abaixo de 4 V em 60 Hz, o que corresponde a uma tensão de aproximadamente 4,5 kV na saída da alta tensão. Essa conclusão, no entanto, deve ser validada medindo-se a DH diretamente na alta tensão, utilizando-se o mesmo procedimento. As condições de carga na saída do transformador também devem ser levadas em consideração, já que as características da carga podem influenciar o conteúdo harmônico da corrente e, conseqüentemente, da tensão.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Módulo 8– PRODIST, 2010.
- [2] IEC, IEC 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques, 2008.
- [3] Franco A M, Toth E, Debatin R M, Analysis of Harmonics in the Power Measurements, Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2004.
- [4] NORMA INTERNA INMETRO, NIT-LAMEL-015, Calibração de medidores em regime não senoidal. Revisão n° 01, Maio 2015.
- [5] Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 3ª Edição Brasileira, 2008.