



Expressão da Incerteza de Medição para a Grandeza Energia Elétrica

Eng. Carlos Alberto Monteiro Leitão
CEMIG Distribuição S.A
caleitao@cemig.com.br

Eng. Sérgio Antônio dos Santos Alves
CEMIG Distribuição S.A
sasa@cemig.com.br

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para cálculo e expressão de incertezas na calibração de medidores e padrões de energia elétrica de acordo com a publicação *EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração*. Essa metodologia é empregada pelo Laboratório de Eletrônica de Medição (LEM), responsável pela referência metrológica da Cemig Distribuição S/A nas calibrações realizadas no âmbito da Rede Brasileira de Calibração (RBC) do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. São apresentadas as fontes de incerteza de medição consideradas e a metodologia de cálculo do fator de abrangência “k” e das incertezas combinada e expandida.

PALAVRAS-CHAVE

Calibração, Energia Elétrica, Incerteza.

1. INTRODUÇÃO

A abordagem tradicional de medição de energia elétrica utilizada pelas concessionárias de energia inclui apenas o *erro* (geralmente apresentado em %) associado à condição elétrica empregada no ensaio. Esse valor é obtido geralmente pela comparação direta entre a energia medida pelo medidor que se deseja avaliar (ou UST – Unidade Sob Teste) e a energia medida por um medidor padrão (ou UR – Unidade de Referência). Com o desenvolvimento da eletrônica, foram desenvolvidos padrões e acessórios associados que dão a indicação direta desse valor, quando da execução de uma calibração.

Entretanto, a moderna abordagem para o tratamento de quaisquer medições determina que a apresentação dos resultados obtidos inclua a *incerteza de medição* associada à medida realizada. O assunto de incerteza de medição é tratado em publicações especializadas, como o *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – Segunda Edição Brasileira* e o *EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração*. Essas publicações, bem como outras congêneres, tratam do assunto de uma forma genérica, ficando a cargo do metrologista, que conhece o processo de medição específico em maior profundidade, a tarefa de identificar todas as fontes de incerteza envolvidas no processo, as contribuições de cada uma no resultado final e o fator de abrangência “k”.

Desde 1998 o Laboratório de Eletrônica de Medição (LEM), que detém a referência metrológica da CEMIG Distribuição S/A para a grandeza energia elétrica, vem desenvolvendo ações de garantia de qualidade nas calibrações que realiza, tendo sido certificado na norma ISO 9000 pelo *Bureau Veritas*

Quality International (BVQI) (em 1998) e homologado na *Rede Metrológica de Minas Gerais* (RMMG) segundo o ISO Guia 25 (em 2000) e posteriormente pela Norma NBR 17025:2001 (que substituiu o Guia 25).

Visando avançar nessas ações de aumento de qualidade e confiabilidade, o LEM buscou então sua acreditação (credenciamento) na Rede Brasileira de Calibração (RBC), tendo desenvolvido a presente metodologia. A mesma foi avaliada pelo INMETRO e considerada conforme, tendo o LEM passado a integrar a RBC a partir de outubro de 2004. Com isso, a Cemig Distribuição S/A tornou-se a primeira Distribuidora de Energia Elétrica a possuir um laboratório acreditado na RBC para a grandeza energia elétrica.

A metodologia aqui apresentada levou em conta a bibliografia disponível sobre o assunto e as especificidades de calibração da grandeza energia elétrica, e reflete, de forma sistematizada, a prática recomendada pelo INMETRO e pela European Accreditation, conforme a publicação EA-4/02.

Com a adoção dessa metodologia (implementada através de sistema computacional desenvolvido especificamente para essa aplicação), foi possível passar a expressar resultados de calibrações segundo critérios aceitos internacionalmente, aumentando-se, com isso, a confiabilidade e a qualidade percebida em relação às calibrações realizadas pelo LEM. Como reflexo da acreditação na RBC, a demanda de serviços do LEM aumentou, em 2005, em cerca de 300%.

2. DEFINIÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As fontes de incerteza das medições da grandeza energia elétrica realizadas pelo LEM são definidas considerando a existência de controles sobre as condições elétricas e ambientais do laboratório (temperatura, umidade relativa e tensão). As fontes de incerteza consideradas são as seguintes:

- a) repetitividade das diversas medições no ponto considerado;
- b) exatidão da Unidade de Referência (padrão) utilizada na calibração;
- c) estabilidade da Unidade de Referência (padrão) utilizada na calibração (alternativamente à sua exatidão);
- d) variação na UR devida a variações de temperatura;
- e) resolução do dispositivo (instrumento (UST) / padrão (UR) / acessório) onde é feita a leitura das medições;
- f) herdada da Unidade de Referência (UR) utilizada (conforme seu Certificado de Calibração);
- g) classe de exatidão dos acessórios eventualmente utilizados;
- h) outras possíveis influências sobre os padrões e instrumentos sob teste, quando conhecidas.

Todas as calibrações são realizadas em ambiente controlado no Laboratório de Eletrônica de Medição, que inclui o controle e monitoramento constante da temperatura, da umidade relativa do ar e da tensão de alimentação das bancadas de trabalho, bem como controle eletrônico de acesso às dependências do Laboratório.

Com base nessas informações, são elaboradas planilhas para cálculo de incerteza das medições realizadas pelo LEM, conforme metodologia descrita neste documento.

Utilizando-se as melhores condições metrológicas que o LEM é capaz de praticar, aliadas às informações acima citadas, são calculadas as melhores capacidades de medição do Laboratório, que servem de parâmetro para a definição do escopo de credenciamento do LEM junto aos organismos de acreditação e homologação (INMETRO e RMMG), e, também, fornecem informações que orientam os clientes do LEM.

3. COMPONENTES DE INCERTEZA CONSIDERADAS

No cálculo da incerteza de medição de energia elétrica, são consideradas as seguintes componentes:

Repetitividade das medições realizadas na Unidade Sob Teste - UST (I_{REP}):

- é baseada na realização de n medições em cada ponto a ser calibrado;
- é calculada utilizando-se a expressão:

$$I_{REP} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

onde:

s: desvio padrão amostral (n-1) através da função “DESVPAD” do Excel (Distribuição normal);
 \sqrt{n} : raiz quadrada do número de medições realizadas em cada ponto calibrado.

OBS: O LEM utiliza n = 3 para todas as calibrações realizadas, exceto quando especificado em contrário, pelo cliente ou pelo próprio Laboratório;

Exatidão da Unidade de Referência - UR (I_{EXAT})

- é baseada na exatidão da UR declarada pelo fabricante, para o ponto considerado;
- é calculada pela expressão

$$I_{EXAT} = \frac{EXAT}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

onde:

EXAT: Exatidão da UR para o ponto (condição elétrica) considerado (conforme declarado pelo fabricante);

$\sqrt{3}$: divisor utilizado para a distribuição retangular

- 1) a componente I_{EXAT} só é utilizada quando a estabilidade da UR é desconsiderada no cálculo da incerteza combinada (por não ser conhecida ou por opção do LEM);
- 2) normalmente a exatidão engloba diversos fatores que podem influenciar os resultados apresentados pela UR, como variação da temperatura (dentro de uma faixa), estabilidade, variação de grandezas elétricas de ensaio (tensão, corrente, fator de potência), etc.;
- 3) é utilizada a distribuição retangular, uma vez que existem limites bem definidos (exatidão declarada), e a probabilidade de ocorrer qualquer valor dentro desses limites é a mesma;
- 4) quando é definido mais de um valor de exatidão, como por exemplo, típico ou máximo, o LEM utiliza o valor máximo (pior caso) para a condição elétrica considerada.

Estabilidade da Unidade de Referência - UR (Deriva - I_{DER})

- é baseada no desempenho da UR ao longo do tempo e demonstra o quanto ela é estável, mantendo resultados de calibração, para um mesmo ponto (condições elétricas), próximos aos resultados obtidos em calibrações anteriores;
- é calculada pela expressão

$$I_{DER} = \frac{m \times t}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

onde:

m : é o coeficiente de inclinação da reta definida pela equação $Y = mx + b$. É traçada uma reta para cada ponto (condição elétrica) calibrado através dos resultados das calibrações realizadas ao longo do tempo. O valor do coeficiente “ m ” é dado em ppm/dia;

- $\sqrt{3}$: divisor utilizado para a distribuição retangular;
- t : tempo, em dias, decorrido desde a data da primeira calibração, considerada no cálculo da estabilidade de cada padrão (UR), o a data de execução do serviço de calibração realizado pelo LEM.

1) O coeficiente (m) de inclinação da reta é calculado através da função “INCLINAÇÃO” do Excel, devendo ser conhecidos pelo menos 3 resultados de calibrações para cada ponto da UR considerada, sem que ela tenha sofrido qualquer ajuste ou manutenção;

2) Neste caso é utilizada a distribuição retangular, por se tratar de um critério mais conservativo;

3) A cada nova calibração é recalculado o coeficiente de inclinação (m) da nova reta.

4) Esta componente (I_{DER}) só é considerada no cálculo final da incerteza combinada quando o coeficiente de temperatura do padrão é conhecido e utilizado nesse mesmo cálculo. Nesse caso a componente I_{EXAT} não será considerada no cálculo final da incerteza combinada.

Varição na UR devida à variação de temperatura (I_T):

- esta componente de incerteza é baseada no coeficiente de temperatura (ct) da UR, que é identificado através de informações providas pelo fabricante;
- é calculada utilizando-se a expressão

$$I_T = \frac{ct \times \Delta t}{\sqrt{6}} \quad (4)$$

onde:

ct : coeficiente de temperatura da UR;

Δt : variação máxima admitida para a temperatura do laboratório;

$\sqrt{6}$: divisor utilizado para a distribuição triangular.

1) Neste caso é utilizada a distribuição triangular, pois através de dados históricos é possível evidenciar que a temperatura efetiva do laboratório permanece dentro de limites bem definidos (faixa Δt considerada) com tendência ao valor central da faixa.

2) O LEM não leva em consideração o coeficiente de temperatura da UST, pois no caso da ocorrência de flutuações da temperatura que alterem seus resultados, esse fato se refletirá na componente de incerteza devido à repetitividade das medições.

Resolução do dispositivo (instrumento (UST) / padrão (UR) / acessório) onde é realizada a leitura das medições (I_R):

- é considerada a metade da resolução do instrumento (digital) onde está sendo realizada a leitura das medições efetuadas (UR ou UST);
- é calculada utilizando-se a expressão

$$I_R = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

onde:

a : resolução do dispositivo onde é;

$\sqrt{12}$: divisor utilizado para a distribuição retangular, considerando-se para instrumento digital a metade da resolução ($a / 2$), logo $a/2\sqrt{3} = a/\sqrt{12}$.

1) O processo de medição de energia elétrica é baseado na integração de uma quantidade de energia que irá determinar a atuação sobre dispositivos de partida e parada (integrados a um sistema de medição e/ou padrão ou a ele conectados) para a integração da quantidade de energia desejada. Ao se obter uma leitura em um padrão de energia elétrica com indicação digital, a resolução limita-se ao dígito menos significativo (a), que pode ser apresentado pelo instrumento, na medição considerada. Entretanto, valores adicionais que não tenham sido suficientes para incrementar o próximo dígito significativo (limite bem definido) têm a mesma probabilidade de ocorrência, caracterizando dessa forma, uma distribuição retangular.

Considerando o exposto, o LEM adota a expressão acima indicada para o cálculo da componente de incerteza devido à resolução em calibrações de energia elétrica.

2) Com o propósito de minimizar a componente de incerteza devido à resolução, nas calibrações da grandeza energia elétrica realizadas pelo LEM, são adotadas as seguintes práticas:

- a) tempo de integração mínimo de um minuto para cada condição de excitação elétrica da UST;
- b) métodos de calibração que utilizam em sua grande maioria a leitura dos resultados na UR;
- c) utilização, sempre que possível, de processos automatizados para a partida e a parada da integração de energia nas condições elétricas relativas à medição realizada.

3) Quando ocorrer a utilização de sistemática na qual obtenha-se diretamente o erro relativo (% ou ppm), como resultado de uma medição, deverá ser considerada a resolução do erro relativo da forma apresentada (por exemplo, numa medição que apresente como resultado erro = 0,017% a resolução é de 0,001% e numa medição que apresente como resultado erro = 235 ppm a resolução é de 1 ppm).

Incerteza Herdada da Unidade de Referência utilizada (I_H):

- é considerada a incerteza de medição declarada no certificado da última calibração da unidade de referência (UR), utilizada na medição;
- é calculada através da expressão

$$I_H = \frac{u}{k} \quad (6)$$

onde:

u : incerteza expandida indicada no certificado de calibração;

k : fator de abrangência para o ponto considerado e também indicado no certificado de calibração.

Caso o ponto calibrado na UST não coincida com o ponto constante no certificado de calibração da UR, é considerado o maior valor de incerteza entre os dois pontos limítrofes ao ponto calibrado da UST, que conste no certificado de calibração da UR.

Incerteza da Classe de Exatidão de Acessórios (I_{ACES}):

- é considerada a Classe de Exatidão dos acessórios eventualmente utilizados (por exemplo, contadores/comparadores de pulsos) que possam agregar alguma incerteza aos resultados da calibração, levando-se em conta informações fornecidas pelo fabricante e o conhecimento do laboratório relativo ao processo de calibração utilizado. Deverá ser considerado o valor de

exatidão referente à saída do acessório que estiver sendo utilizada. Para essa componente de incerteza são utilizadas as referências de catálogo, fornecidas pelo fabricante, já que os acessórios normalmente não são passíveis de calibração;

- é calculada através da expressão

$$I_{ACES} = \frac{E_{ACES}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

onde:

E_{ACES} : classe de exatidão do acessório, considerando-se a saída utilizada;

$\sqrt{3}$: divisor utilizado para a distribuição retangular e aqui considerado por ser a que leva a valores mais conservativos.

Observações gerais:

1) Todas as componentes de incerteza podem ser expressas na forma de valor absoluto (Wh, varh, etc) ou relativo (% , ppm, etc). Entretanto, para o cálculo da incerteza combinada todos os termos considerados devem estar expressos da mesma forma para possibilitar resultados coerentes.

2) O LEM não considera no cálculo de incertezas das medições que realiza, as componentes de incerteza referentes à umidade relativa do ar e requisitos de alimentação (tensão das bancadas de trabalho) devido aos seguintes motivos:

- a) a faixa de operação (de alimentação elétrica e de umidade relativa) dos instrumentos envolvidos na calibração é ampla, sendo normalmente muito superior aos valores praticados pelo LEM;
- b) o Laboratório mantém sistemas de estabilização da tensão das bancadas de calibração e controle da umidade relativa do ar que são constantemente monitorados e apresentam historicamente, variações máximas de acordo com os limites especificados em relação aos valores ótimos desses parâmetros, definidos pelos fabricantes de instrumentos de medição;
- c) a umidade relativa não é considerada, na literatura conhecida, como um fator interferente na calibração de energia elétrica.

4. CÁLCULO DO FATOR DE ABRANGÊNCIA (k) E DAS INCERTEZAS

4.1 – Incerteza Combinada (uc)

A incerteza combinada é calculada através da expressão:

$$uc = \sqrt{I_{REP}^2 + I_{EXAT}^2 + I_{DER}^2 + I_T^2 + I_R^2 + I_H^2 + I_{ACES}^2} \quad (8)$$

(= Raiz quadrada da soma quadrática das componentes de incerteza)

1 - Quando se utilizar a componente de incerteza relativa à exatidão da UR, outras componentes que sejam por ela englobadas, conforme informado pelo fabricante (como, por exemplo, as relativas à estabilidade e à temperatura) devem ser igualadas a zero na expressão acima;

2 - Quando não se utilizar a componente de incerteza relativa à exatidão, essa componente deve ser igualada a zero na expressão acima e as componentes devido à estabilidade e à temperatura da UR devem ser utilizadas.

4.2 – Fator de Abrangência (k)

O fator de abrangência **k** é calculado pela expressão $k = \text{INVT} [(100\% - p(\%)); v_{\text{eff}}]$ onde:

INVT = é uma função do Excel que retorna valores de **k** baseados na tabela de distribuição de “Student”;

p (%) = é o grau de confiança desejado;

v_{eff} = é o grau de liberdade efetivo, calculado pela expressão:

$$v_{\text{eff}} = \frac{uc^4}{\frac{I_{REP}^4}{v_i} + \frac{I_{EXAT}^4}{v_i} + \frac{I_{DER}^4}{v_i} + \frac{I_T^4}{v_i} + \frac{I_R^4}{v_i} + \frac{I_H^4}{v_i} + \frac{I_{ACES}^4}{v_i}} \quad (9)$$

onde **v_i** é o grau de liberdade de cada componente, assumindo os seguintes valores:

- igual a (n-1) para as componentes de incerteza cujo a distribuição de probabilidade é do tipo normal;
- tende a infinito (∞) para os demais tipos de distribuição (triangular e retangular) pois nestes casos os limites são conhecidos e bem definidos, tornando extremamente pequena a probabilidade da grandeza em questão ficar fora destes limites;
- tende a infinito (∞) para a componente de incerteza herdada (**I_H**), quando o fator de abrangência **k**, declarado no Certificado de Calibração da UR, for igual a 2.

Dessa forma a expressão para o cálculo do grau de liberdade efetivo passa a ser:

$$v_{\text{eff}} = \frac{uc^4}{I_{REP}^4} = \left(\frac{uc}{I_{REP}} \right)^4 \times v_i \quad (10)$$

Quando o fator de abrangência **k**, declarado no Certificado de Calibração da UR, for diferente de 2, deve ser identificado o número de graus de liberdade efetivos adotado para a componente incerteza herdada (**I_H**) e o termo correspondente deve ser incorporado na expressão acima.

Para identificação do grau de liberdade adotado, conforme nota acima, quando este não for informado no Certificado de Calibração da Unidade de Referência (UR), será usada a função do Excel **INVT [(100% - p(%)); v_i]** com os seguintes parâmetros:

- usar grau de confiança (**p%**) conforme o declarado no certificado de calibração;
- usar valores estimados para **v_i** de forma a obter-se como resposta o valor de **k** citado no certificado de calibração.

Uma vez encontrado o valor de **k**, utilizar o valor de **v_i** (estimado acima) como denominador da componente de incerteza **I_H** e completar a expressão acima para cálculo de **v_{eff}** e do fator de abrangência **k** a ser declarado no certificado do LEM.

4.3 – Incerteza Expandida (U)

A incerteza expandida é calculada pelo LEM para um nível de confiança de 95,45% através da expressão:

$$U = uc \times k \quad (11)$$

Observação:

Os Certificados de Calibração emitidos pelo LEM apresentam as seguintes informações por ponto calibrado da grandeza energia elétrica: definição do ponto calibrado (tensão, corrente e fator de potência), erro da UST no ponto calibrado (em % ou ppm), incerteza expandida (em % ou ppm), fator de abrangência (k) e número de graus de liberdade efetivos (v_{eff}).

5. CONCLUSÕES

A evolução dos conceitos de metrologia aplicados ao ambiente das concessionárias de energia elétrica, bem como a regulação técnico-metrológica aplicada pelo INMETRO, com a exigência da implementação da norma NBR ISO/IEC 17025 em laboratórios, implica na necessidade de aprimoramento dos processos de tratamento de dados provenientes de calibrações atualmente em uso. O presente trabalho apresenta uma metodologia prática aplicada pela CEMIG Distribuição na busca desse aprimoramento, respaldada pela acreditação de seu laboratório de referência metrológica na Rede Brasileira de Calibração.

Essa acreditação levou a um aumento da confiabilidade e da qualidade percebida em relação aos serviços prestados pela CEMIG, com significativos ganhos para a melhoria de sua imagem perante seus clientes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - INMETRO, ABNT, SBM – Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02 – Expressão da Incerteza de Medição na Calibração – 1999;
- 2 - INMETRO, ABNT, SBM – Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02-S1 – Suplemento 1 ao EA-4/02 Expressão da Incerteza de Medição na Calibração – 1999;
- 3 - INMETRO, ABNT, SBM – Guia para a Expressão da Incerteza de Medição – 1998;
- 4 - INMETRO – NIT- DICLA- 021 - Expressão da Incerteza de Medição – Maio/2003;
- 5 - ABNT – ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração – Outubro/2005.