



AValiação DAS INCERTEZAS DOS PADRÕES DO LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS DA ELETRONORTE S/A

Jacklyn Reis¹, João Claudio Carvalho², Marcelo Costa³, Rodolfo Alves⁴

¹Eletronorte S/A, Belém-PA, Brasil, jacklyn@ufpa.br

²Eletronorte S/A, Belém-PA, Brasil, jclaudio@eln.gov.br

³Eletronorte S/A, Belém-PA, Brasil, marceloc@eln.gov.br

⁴Eletronorte S/A, Belém-PA, Brasil, rodolfoalves@eln.gov.br

Resumo: O presente trabalho visa estabelecer uma comparação da performance, no que concerne à incerteza, dos padrões do Laboratório de Calibração de Grandezas Elétricas – CAEL vinculado ao Centro de Tecnologia da Eletronorte S/A, tomando-se como base a análise gráfica das incertezas declaradas pelos fabricantes dos mesmos. Essa comparação objetiva determinar para cada grandeza elétrica analisada, em que pontos e/ou faixas pode-se adotar esses instrumentos como padrão de referência ou de trabalho.

Palavras chave: incerteza, laboratório de calibração, padrão de referência.

1. INTRODUÇÃO

A dificuldade de se comparar as incertezas de um instrumento é um obstáculo quando da tomada de decisão tanto para a compra como para a definição de um padrão de referência e/ou de trabalho em laboratórios de calibração. Essa dificuldade se deve ao fato dos instrumentos pertencerem a fabricantes distintos, sendo que dessa forma, as unidades utilizadas nos manuais podem ser diferentes, bem como as expressões das incertezas, as probabilidades de abrangência, os intervalos de calibração, as condições ambientais etc. Essa dificuldade se torna ainda mais acentuada quando os padrões são instrumentos multifunção (multicalibradores, multímetros digitais, etc), o que é bastante comum nos modernos laboratórios de calibração elétrica.

A Eletronorte, através do seu Laboratório de Calibração de Grandezas Elétricas – CAEL, possui vários instrumentos multifunção que podem ser utilizados como padrões, entre multímetros digitais de 8 ½ dígitos, calibradores digitais e padrões digitais de potência e energia, monofásicos e trifásicos. A Eletronorte, membro da Rede Brasileira de Calibração – RBC desde 2003, pretende em 2005 iniciar o processo de extensão da acreditação na área elétrica junto ao Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial – INMETRO, inclusive com melhoria da

capacidade de medição. Para a realização desse processo, os padrões de referência devem ser definidos através de análises minuciosas das incertezas dos padrões existentes.

O presente trabalho visa descrever uma metodologia que considere as mesmas condições (probabilidade de abrangência, intervalo de calibração, condições ambientais, etc) para realizar a comparação da performance [3], no que concerne à incerteza, dos padrões pertencentes ao CAEL, baseado nas informações fornecidas pelos seus fabricantes.

2. PADRÕES DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Na metrologia elétrica, as menores incertezas podem ser obtidas através da realização de fenômenos físicos, através de artefatos ou através de métodos de razoável complexidade, todos com excelentes características metrológicas. Por exemplo, para a grandeza tensão contínua, as menores incertezas são obtidas através da realização do efeito Josephson. Essas incertezas podem ser repassadas a referências de tensão em estado sólido ou a pilhas químicas, que por sua vez podem repassar as incertezas aos padrões de trabalho, como multímetros e calibradores através de métodos potenciométricos. Já para a grandeza tensão alternada, as menores incertezas podem ser obtidas pela comparação dos sinais alternados com sinais de tensão contínua, com amplitudes iguais aos valores RMS dos sinais de tensão alternada, com a utilização de conversores térmicos.

Diante do exposto, pode-se observar que a operacionalização dos instrumentos necessários a obtenção das menores incertezas possíveis na calibração de grandezas elétricas é, por motivos técnicos e econômicos, mais adequada a laboratórios nacionais e laboratórios de referência. Para laboratórios que realizam calibrações de instrumentos utilizados na indústria e outros setores da economia, torna-se mais viável o emprego de instrumentos multifunção, como os modernos multímetros e calibradores multifunção digitais, como padrões de referência. Esses instrumentos são capazes de realizar medições com incertezas tão baixas quanto 5 partes por milhão (tensão

contínua), fazendo com que os mesmos possam ser utilizados como referência dos referidos laboratórios de forma satisfatória, considerando os seus escopos.

Os modernos instrumentos multifunção possuem como característica a dificuldade em se interpretar as declarações de incerteza fornecidas pelos seus respectivos fabricantes. Isso decorre, dentre outros motivos, do fato de que não há padronização alguma que norteie esses fabricantes acerca da declaração de incertezas, o que tem como consequência uma enorme diversidade de formas de realizar essas declarações.

As declarações de incerteza podem se diferenciar, dentre outros, nos seguintes aspectos:

- Condições ambientais: alguns instrumentos possuem incertezas de valor reduzido, mas que só podem ser aplicadas com limites estreitos de temperatura, como $\pm 1^\circ\text{C}$ em torno da temperatura de calibração. Enquanto isso, em outros instrumentos, os limites de temperatura para aplicação das incertezas são mais folgados, como por exemplo de $\pm 5^\circ\text{C}$ em torno da temperatura de calibração;
- Probabilidade de abrangência: existem instrumentos cujas incertezas possuem probabilidade de abrangência de 95,45%, 99%, 99,73% para distribuições normais ou que nem possuem tipo de distribuição e probabilidade de abrangência declarados. Muito cuidado deve ser tomado nesse ponto no momento de comparar instrumentos;
- Intervalo de calibração: os manuais de alguns instrumentos trazem declarações de incerteza para vários intervalos de calibração (90 dias, 6 meses, 1 ano, etc.), enquanto que outros declaram suas incertezas para apenas um intervalo ou nem definem um intervalo de calibração;
- Incertezas relativa e absoluta: muitos fabricantes declaram as incertezas de seus instrumentos de forma relativa, sem considerar a incerteza dos padrões utilizados para verificar a performance dos mesmos em fábrica. Outros fabricantes declaram nos manuais somente as incertezas absolutas, que incluem as incertezas dos padrões utilizados em fábrica. Outros fabricantes declaram ambas;
- Especificações modificantes: muitas declarações de incerteza, para serem corretamente aplicadas em certas situações, devem ser acrescidas de outros componentes, chamados de especificações modificantes. A adição desses componentes deve-se a incidência de efeitos como ruído, temperatura ambiente, flutuações na alimentação, entre outros.

Dessa forma, todos esses aspectos devem ser considerados, uniformizados e aproximados ao máximo do perfil de trabalho do laboratório quando da realização da atividade de comparação de incertezas entre instrumentos.

3. METODOLOGIA

A comparação foi aplicada aos padrões do CAEL para as seguintes grandezas: tensão contínua, tensão alternada (60 Hz), corrente contínua, corrente alternada (60 Hz) e

resistência. Na tabela 1, são mostrados os padrões e as grandezas analisadas.

Tabela 1. Grandezas elétricas e padrões do CAEL analisados

Pad. Gran.	Fluke 8508A	Fluke 5720A	Agilent 3458A	Fluke 5500A	EMH/MTE KOM 200.3	Radian RD-31
VDC	X	X	X	X		
VAC	X	X	X		X	X
IDC	X	X	X	X		
IAC	X	X	X		X	X
R	X	X	X	X		

As especificações foram obtidas dos manuais dos fabricantes, para as seguintes condições: incerteza na forma relativa (quando possível), probabilidade de abrangência de 95,45%, intervalo de calibração de 1 ano e temperatura de operação igual a temperatura de calibração com variação máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$ ($T=T_{\text{cal}} \pm 1^\circ\text{C}$).

A comparação entre as performances dos padrões foi obtida com a implementação de cinco algoritmos, um para cada grandeza elétrica, em ambiente *Matlab*. Esses algoritmos contêm as especificações técnicas dos padrões, sendo que as incertezas expandidas para 95,45% são expressas de acordo com a equação 1, onde, A_{ppm} é a parcela da incerteza em partes por milhão dependente da leitura ou do ajuste, B é a parte fixa da incerteza na unidade da grandeza, k representa o fator de abrangência da incerteza declarada e x representa a leitura ou o ajuste.

$$U_{ppm} = f_{ppm}(x) = 2 \cdot \left(\frac{(A_{ppm} \cdot x \cdot 10^{-6} + B) / k}{x} \right) \cdot 10^6 \quad (1)$$

Cada algoritmo é dividido em três módulos: *descrição dos padrões*, *cálculo de incerteza* e *geração de gráficos*.

- **Descrição dos padrões:** é formado pelos padrões sob comparação e as faixas de medição de cada padrão. Os padrões são representados pelo vetor da equação 2, onde X é a grandeza elétrica (tensão, corrente, etc) e os índices i e j identificam o padrão e a faixa de medição do padrão respectivamente. X_i é o *vetor grandeza elétrica* formado pela composição dos *vetores faixas* x_{ij} . Os vetores *faixa* contêm os valores da grandeza elétrica pertencentes à faixa de medição dos padrões.

$$X_i = [x_{i1} x_{i2} x_{i3} \dots x_{ij}] \quad (2)$$

Os dados de entrada para execução desse módulo são os seguintes: (a) Resolução dos padrões - essa informação determina o incremento utilizado para gerar o vetor faixa; (b) Faixa dos padrões - essa informação determina o limite inferior e o limite superior do vetor faixa; e (c) Incerteza dos padrões - essa informação, em forma de equação matemática baseada nas especificações dos fabricantes dos padrões, determina a incerteza para uma dada faixa de uma dada grandeza. A composição das incertezas por faixa determina o perfil de incerteza total do padrão.

Por exemplo, considerando o vetor grandeza elétrica tensão V_1 para o padrão **A**, formado pela composição dos vetores faixa v_{11} , v_{12} , v_{13} e v_{14} . Dessa forma, o padrão **A** é identificado pelo índice **1** e é formado por quatro faixas de medição, cada vetor faixa contém os pontos de tensão aos quais a equação (1) foi aplicada para o cálculo das incertezas.

- **Cálculo de incerteza:** é formado pela incerteza relativa dos padrões a qual é calculada aplicando-se cada vetor faixa x_{ij} a equação (1); dessa forma obtém-se o vetor incerteza u_{ij} para todas as faixas de medição do padrão. A Incerteza total do padrão para a grandeza analisada é representada pelo vetor U_i , expresso na equação 3, que é formado pela composição dos vetores u_{ij} .

$$U_i = [u_{i1} u_{i2} u_{i3} \dots u_{ij}] \quad (3)$$

- **Geração de gráficos:** Plota os gráficos com o perfil de incertezas de todos os padrões do CAEL para a grandeza analisada.

A figura abaixo sintetiza os módulos dos algoritmos.

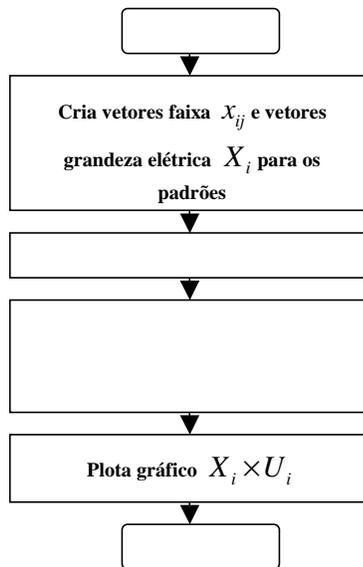


Fig. 1. Fluxograma

4. RESULTADOS

Os gráficos gerados mostram o desempenho dos padrões do CAEL para as grandezas tensão contínua, tensão alternada, corrente contínua, corrente alternada e resistência. As curvas foram obtidas através da relação dos vetores $X_i \times U_j$. Para melhor observação e análise dos gráficos, o eixo das abscissas encontra-se em escala logarítmica e os vetores faixa e incerteza são formados por 1001 elementos.

3.1. Tensão DC

Pode-se observar no gráfico da figura 2 que o padrão **A** apresentou a melhor performance (menor incerteza relativa) na maior parte da faixa de tensão de interesse (20 mV até 1000 V até

1000 V), já que a sua incerteza permaneceu abaixo de 10 ppm, sendo 2,9 ppm a melhor incerteza, referente aos pontos de 2 V e 20 V. Apenas em pequenas regiões após 2 V e 20 V o padrão **B** apresenta incertezas menores que aquelas apresentadas pelo padrão **A**. O padrão **D**, por ter apresentado, para valores reduzidos de tensão e para tensões acima de aproximadamente 300 V, incertezas muito maiores do que aquelas apresentadas pelos demais padrões, não aparece no gráfico para esses valores.

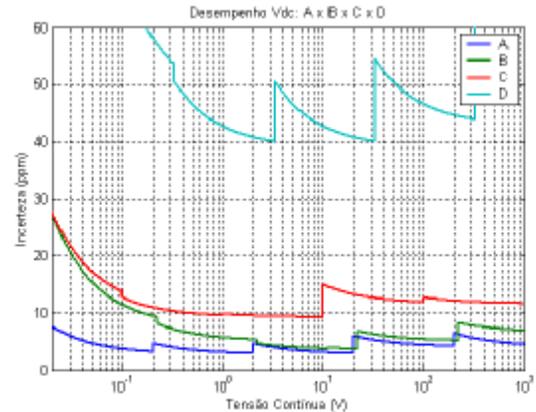


Fig. 2. Incertezas dos padrões do CAEL: Tensão Contínua

3.2. Tensão AC (60 Hz)

Pela análise gráfica do perfil de incertezas mostrado na figura 3, observa-se que o padrão **B** apresentou melhor performance (menor incerteza relativa) na maior parte da faixa de tensão de interesse (20 mV até 1000 V), sendo 0,0047 % a sua melhor incerteza, referente ao ponto de 20 V. Entretanto, de um modo geral, a grandeza tensão alternada apresentou o perfil de incertezas mais heterogêneo. Na faixa até 100 mV, o padrão **C** apresentou a menor incerteza. Isso se deve ao fato de que o referido padrão, diferentemente dos demais, possui uma faixa de medição da ordem de uma dezena de mV e outra da ordem de 100 mV. Já entre aproximadamente 200 V e 600 V, o padrão **F** apresenta as menores incertezas, sendo essa faixa igual a quase toda a faixa de medição do referido padrão.

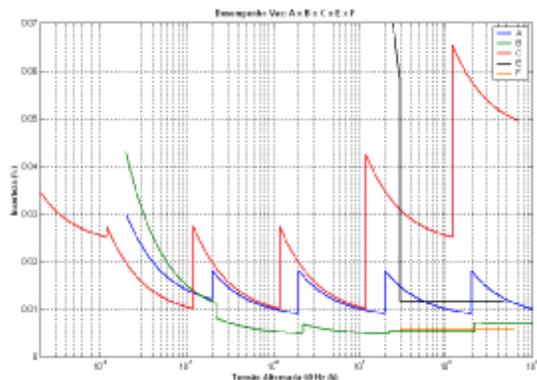


Fig. 3. Incertezas dos padrões do CAEL: Tensão Alternada

3.3. Corrente DC

Como mostrado no gráfico da figura 4, os padrões **A** e **B** apresentaram as melhores incertezas na faixa de corrente contínua de interesse de 1 μA até 20 A, sendo o padrão **A** melhor nas faixas de 10 μA até 20 mA, de aproximadamente 80 mA até 200 mA e de 11 A até 20 A e o padrão **B** melhor na faixa de 20 mA até 11 A. Na pequena faixa até 10 μA , o padrão **C** apresentou as menores incertezas. Vale ressaltar, no entanto, que o padrão **A** é o único a cobrir toda a faixa de corrente de interesse, uma vez que os padrões **B** e **D** operam até 11 A e o padrão **C** somente até 1 A. A menor incerteza apresentada pelo padrão **A** foi de 8,5 ppm, nos pontos de 200 μA e 2 mA.

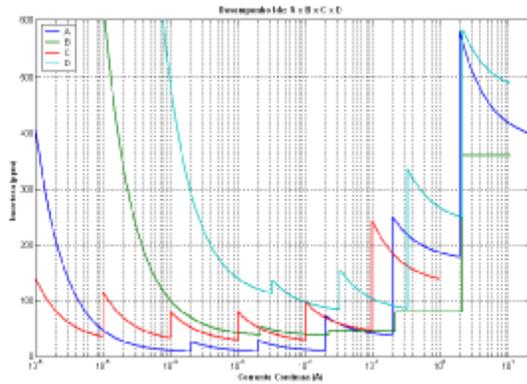


Fig. 4. Incertezas dos padrões do CAEL: Corrente Contínua

3.4. Corrente AC (60 Hz)

Considerando a faixa de interesse como sendo de 10 μA até 20A, o padrão **B** apresentou as menores incertezas na faixa até aproximadamente 10 mA, como mostra a figura 5. Já o padrão **F** apresentou as menores incertezas da grandeza para a faixa de 20 mA até 20 A, o que corresponde a totalidade da sua faixa de medição. Na pequena faixa de 10 mA até <20 mA, o padrão **E** apresentou as menores incertezas. O padrão **B** apresentou como menor incerteza 0,015%, para o ponto de 220 mA, enquanto que o padrão **F** apresentou 0,0058 % como menor incerteza. Por fim, o padrão **E** possui 0,012% como menor incerteza..

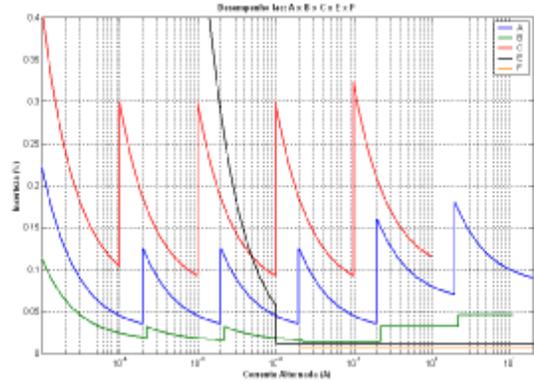


Fig. 5. Incertezas dos padrões do CAEL: Corrente Alternada

3.5. Resistência

O padrão **A**, na faixa de interesse da grandeza resistência de 1 Ω até 2 G Ω , apresentou as menores incertezas em toda a faixa, como mostram os gráficos das figuras 6 e 7. A menor incerteza apresentada pelo padrão **A** foi de 7.2 ppm, referente aos pontos de 200 k Ω , 20 k Ω , 2 k Ω e 200 Ω . Ressalta-se para a grandeza resistência que o padrão **A** é o único a cobrir toda a faixa de interesse, e que o padrão **B** só pode ser utilizado para valores discretos de resistência.

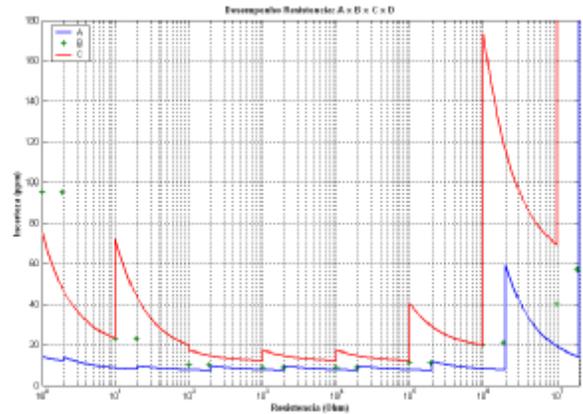


Fig. 6. Incertezas dos padrões do CAEL: Resistência até 20 M Ω

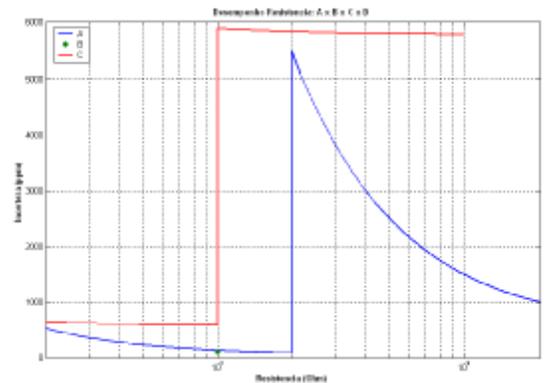


Fig. 7. Incertezas dos padrões do CAEL: Resistência de 20M Ω até 2G Ω

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pôde-se observar, pela heterogeneidade dos gráficos dos perfis de incerteza, que devem ser considerados, além das menores incertezas, aspectos relacionados à amplitude da faixa de medição dos padrões para que a aquisição, a calibração e a conseqüente elaboração da melhor capacidade de medição sejam realizadas de forma econômica buscando as menores incertezas possíveis.

Considerando a grandeza tensão contínua, pôde-se constatar que, indubitavelmente, o padrão A deveria ser definido como padrão de referência do CAEL. Entretanto, na grandeza tensão alternada, o padrão B apresenta as menores incertezas na maior parte da faixa de interesse. Se for considerado que ambos os padrões devam ser utilizados como referência, fica óbvia a inviabilidade dessa decisão para um laboratório que esteja em fase de aquisição de instrumentos. Para laboratórios que eventualmente possuam os dois padrões, essa decisão acarretaria na necessidade de calibração de ambos em laboratório externo, implicando em custos adicionais.

Com relação a grandeza corrente alternada, observou-se que o padrão F apresentou as menores incertezas na totalidade da sua faixa de medição. No entanto, essa faixa de medição não cobre toda a faixa de interesse, sendo que no restante dessa faixa de interesse, o padrão B apresentou as menores incertezas. Entretanto, a faixa de medição do padrão B também não cobre toda a faixa de interesse. Dessa forma, o CAEL deve optar entre calibrar os dois padrões em laboratório externo e assim poder prestar serviços em toda a faixa de interesse com as menores incertezas possíveis, ou calibrar apenas um dos padrões e abrir mão de prestar serviços de calibração em parte da faixa de interesse, ou por último, calibrar um terceiro padrão que apresente incertezas maiores, mas que cubra toda a faixa de interesse, como é o caso do padrão A.

6. CONCLUSÃO

De um modo geral, a necessidade de comparação das incertezas dos padrões do CAEL, com o intuito de definir os seus padrões de referência, levou ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional que se mostrou ser uma interface amigável para essa atividade, por proporcionar a realização da comparação de modo gráfico. Também pôde-se constatar que, para uma correta tomada de decisão acerca da aquisição, calibração em laboratório externo e conseqüentes definições dos padrões de referência e elaboração da melhor capacidade de medição do laboratório, as grandezas devem primeiramente ser avaliadas independentemente, e os resultados dessas análises devem posteriormente ser avaliados em conjunto.

Como mencionado no trabalho, muitas dificuldades foram encontradas para realizar as comparações devido a grande diversidade de maneiras dos fabricantes declararem as incertezas dos seus instrumentos. Muitas vezes, as dificuldades foram causadas até mesmo pela omissão de informações nos manuais, principalmente com relação aos intervalos de calibração e os efeitos das condições ambientais nos valores das incertezas.

É importante observar que todas as análises foram realizadas considerando apenas as incertezas dos padrões declaradas pelos seus respectivos fabricantes. Para uma análise mais realista, essas incertezas deveriam ser comprovadas através da calibração dos padrões, e de avaliações das contribuições devido à deriva e à estabilidade, o que pode muitas vezes ter custo elevado ou mesmo ser inviável.

Cabe ainda ressaltar que o INMETRO acredita laboratórios na RBC não para realizar calibrações de grandezas, e sim para calibrar de tipos de instrumentos que medem as grandezas. Por exemplo, em tensão DC, um laboratório pode solicitar acreditação para realizar calibrações de fontes e medidores de tensão DC e pilhas padrão (3 serviços ao todo) [1]. Supondo que nessa grandeza fosse constatado, através da análise das incertezas, que uma fonte apresentasse a melhor performance. Dessa forma, essa fonte só poderia ser definida como padrão de referência para os serviços de calibração de medidores de tensão DC. Caso o laboratório desejasse ser acreditado para realizar serviços de calibração de fontes de tensão DC, um outro instrumento, do tipo medidor, deveria ser definido como padrão de referência para esse serviço. Situação semelhante ocorreria se, através da análise das incertezas, fosse constatado que um medidor de tensão DC apresentasse a melhor performance. Então, esse medidor só poderia ser definido como padrão de referência para os serviços de calibração de fontes de tensão DC, a menos que o laboratório possuísse uma fonte estável da grandeza, que permitisse a aplicação do mesmo sinal ao medidor padrão de referência e ao medidor sob calibração.

Por fim, fica como sugestão para trabalhos futuros a utilização do código produzido na elaboração da ferramenta juntamente com uma interface gráfica, que proporcione aos usuários a entrada de dados de uma maneira mais amigável e que forneça outros resultados baseados nos dados de entrada, como a incerteza de um padrão para um certo ponto ou mesmo que informe qual a relação entre incertezas (TUR) entre dois padrões para qualquer ponto.

REFERÊNCIAS

- [1] INMETRO, 2003. *Relação Padronizada de Serviços de Calibração Credenciados*, NIT-DICLA-012, Rev nº 3.
- [2] Lira, F.A., 2001. *Metrologia na Indústria*, Ed. Érica.
- [3] Rabinovich, S. G., 2000. *Measurement Errors and Uncertainties, Theory and Practice*, 2nd Edition.
- [4] Fluke Corporation, 1994. *Calibration: Philosophy in Practice*, 2nd Edition.
- [5] Vuolo, J. H., 1996. *Fundamentos da Teoria de Erros*, Ed. Edgard Blucher Ltda.
- [6] Fluke Corporation, 2003. *8508A Digital Reference Multimeter: Users Manual*, Rev. 2.
- [7] Fluke Corporation, 2003. *5500A Multi-product Calibrator: Operator Manual*, Rev. 10.

- [8] Agilent Technologies, 2000: *3458A Multimeter: User's Guide*, Edition 4.
- [9] Fluke Corporation, 2002. *5700A/5720A Series II: Operators Manual*, Rev. 1.
- [10] MTE, 2001. *Comparator KOM 200.3: Operating Instruction*, Edition 07.2001.
- [11] Radian Research, Inc., 2005. *RD-31 Portable Three-phase Electricity Standard: Operations Manual*, Rev. 02-05.
- [12] ABNT, INMETRO, SBM, 2003. *Guia para Expressão da Incerteza da Medição*, 3^a. ed. Brasileira.