



## Serviço de Calibração de Nanovoltímetros no Inmetro

R V F Ventura<sup>1</sup>, L V S Costa<sup>1</sup>, M V V Pinto<sup>1</sup>, V M Teixeira<sup>2</sup> e V M L M Félix<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Calibração em Metrologia Elétrica - Lacel, Inmetro, Duque de Caxias, 25250-020, Brasil

<sup>2</sup> Divisão de Metrologia Elétrica - Diele, Inmetro, Duque de Caxias, 25250-020, Brasil

<sup>3</sup> UFRJ, Rio de Janeiro, 21941-630, Brasil

rvventura@inmetro.gov.br, lvcosta@inmetro.gov.br, mvviegas@inmetro.gov.br, vmteixeira@colaborador.inmetro.gov.br, vickmagalhaesrj15@gmail.com

**Resumo.** Este artigo tem por finalidade apresentar as características do serviço de calibração de nanovoltímetros implementado no Laboratório de Calibração em Metrologia Elétrica do Inmetro – Lacel, que possibilitou significativa melhora no escopo de serviços do laboratório, aumentando o intervalo e reduzindo incertezas de medição. Tais características estão distribuídas entre o funcionamento da metodologia, da garantia da rastreabilidade, da apresentação das grandezas de influência e da correlação entre as medidas realizadas, bem como na visualização do software desenvolvido para a automação e processamento e demonstração dos resultados obtidos.

### 1. Introdução

Por mais de duas décadas o Laboratório de Calibração em Metrologia Elétrica do Inmetro – Lacel – vem disseminando rastreabilidade em tensão contínua através de um sistema potenciométrico de alta exatidão, baseado em um divisor binário de tensão e um padrão de referência Dc de 10 V. Sua ampla versatilidade e estabilidade, principalmente para a faixa de medição compreendida entre 10 mV e 1000 V, garante até hoje níveis de incerteza compatíveis com os mais recentes equipamentos de medição lançados no mercado.

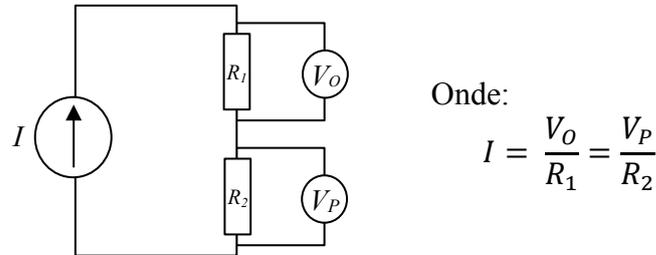
Porém, quando se trata de níveis de tensão contínua da ordem de micro ou milivolts, as limitações deste mesmo sistema esbarram nas especificações técnicas dos padrões destinados a este intervalo de medição, tais como os Nanovoltímetros. Estas limitações se dão tanto pela impossibilidade de alcançar níveis suficientemente baixos de tensão para atender todas as faixas de medição destes equipamentos, como na obtenção de incertezas de medição significativamente baixas nos pontos iniciais da sua própria faixa de medição. No limite da sua utilização, o sistema potenciométrico utilizado no Lacel possibilita a realização de medições de baixos valores de tensão compreendidos entre 100  $\mu$ V e 10 mV, com incertezas da ordem de 0,18  $\mu$ V.

No intuito de estender a melhor capacidade de medição do laboratório e reduzir as incertezas de medição para valores compreendidos nos intervalos de micro e milivolts, o Lacel conseguiu desenvolver uma alternativa, relativamente simples, que possibilita a realização da calibração de voltímetros e nanovoltímetros atendendo plenamente às suas especificações.

De modo geral, a metodologia aplicada possibilita prover rastreabilidade em intervalos de medição de 1  $\mu$ V até 100 mV, com incertezas da ordem de 7 nV até 0,5  $\mu$ V.

## 2. Metodologia de medição

A calibração de voltímetros e nanovoltímetros em baixos valores de tensão se dá por comparação ao valor do mensurando, sendo este determinado através das leituras de um medidor padrão de tensão contínua e da razão entre dois resistores padrão na configuração de divisor de tensão (Figura 1).



**Figura 1.** Circuito Básico do Sistema de Medição

Como pode-se ver no circuito, uma fonte de corrente é aplicada aos resistores de modo que a razão das diferenças de potencial originadas,  $V_O$  e  $V_P$ , seja a mesma dos valores dos padrões resistivos,  $R_1$  e  $R_2$ . Sendo  $V_O$  a representação do nível de tensão a ser medido pelo objeto sob calibração e  $V_P$  a representação do nível de tensão a ser medido pelo medidor padrão caracterizado.

Por outro lado,  $V_O$  pode ser determinado algebricamente em função dos valores de  $V_P$ ,  $R_1$  e  $R_2$ , e dessa forma o erro de medição do objeto sob calibração pode ser definido a partir da comparação entre a média de suas leituras e do valor calculado do mensurando, ou seja:

$$\varepsilon_O = V_O - V_P \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

## 3. Garantia da rastreabilidade e grandezas de influência

Além dos valores convencionais dos resistores padrão definidos através de suas calibrações, para garantir a rastreabilidade das medições é fundamental que a razão entre  $R_1$  e  $R_2$  seja estabelecida de modo que a diferença de potencial sobre o medidor padrão se mantenha dentro do intervalo de 100 mV e 1 V, ou seja, para que  $V_P$  possa ser rastreado ao sistema potenciométrico amplamente consolidado pelo histórico de seu uso.

O cuidado com a escolha de  $R_1$  e  $R_2$  também se dá pelas limitações da fonte de corrente. Mesmo que esta não seja uma das grandezas de influência no sistema, é necessário que a resistência equivalente da associação seja tal que permita uma estabilidade significativa do gerador, o que proporcionará medições mais precisas de  $V_O$  e  $V_P$ . Em termos práticos, o sistema implementado no Lancel aplica correntes no intervalo de 10  $\mu$ A até 1 mA às associações de resistores padrão, estas com resistências equivalentes entre 1 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$ , representando o máximo de 50% da carga admitida pelo gerador utilizado.

Em termos das demais grandezas de influência, o modelo matemático da medição é extrapolado com a inclusão das variáveis relativas à dispersão das leituras, das medições de tensões parasitas, da resolução dos medidores, das derivas temporais e dependências da temperatura dos resistores, de modo a representar as fontes de incerteza que não podem ser minimizadas durante o processo de medição.

$$\varepsilon_o = (\bar{V}_o - \delta\bar{V}_o + \delta V r_o) - (\bar{V}_p - \delta\bar{V}_p + \delta V r_p) \cdot (1 + \Delta V_p) \cdot \frac{R_1 + \delta R t_1 + \delta R d_1}{R_2 + \delta R t_2 + \delta R d_2} \quad (2)$$

Tratando-se da execução de medição de tensões contínuas, é fundamental um olhar mais crítico sobre as diferenças de potenciais termoelétricas de contato e outros potenciais parasitas que podem gerar uma influência significativa na medição, principalmente a níveis tão baixos. Representados por

$\overline{\delta V_o}$  e  $\overline{\delta V_p}$  no modelo, estes *offsets* detêm uma natureza significativamente transitória, implicando na sua determinação através de séries alternadas entre a fonte aplicando zero (0 A) e o nível de corrente específico para o valor de potencial programando, ou sejam, tanto o objeto sob calibração quanto o medidor padrão realizam medições na seguinte sequência:

Voffset → Vprog → Voffset → Vprog → Voffset → ... → Vprog → Voffset

Logo, o valor a ser considerado como resíduo será a média do par de medições realizadas antes e depois de cada leitura do valor programado. Dessa forma, teremos o resíduo mais atual de cada uma das amostras obtidas de maneira simultânea pelos voltímetros.

#### 4. Correlação entre as medições

Uma interessante observação neste método de medição é a forte correlação entre os resultados das leituras. É de se esperar que haja esse efeito justamente pela interdependência de  $V_o$  e  $V_p$ , oriundas de uma mesma fonte de corrente e com amostras tomadas simultaneamente. Contudo, a observação numérica desse efeito traz à tona um exemplo prático de um assunto muitas vezes ignorado.

De maneira didática, podemos identificar essa correlação em um exercício rápido de álgebra. Tomando o modelo matemático resumido da medição, considerando  $m$  o valor medido pelo objeto sob calibração e  $c$  o valor calculado do mensurando, temos as definições do erro do objeto e sua variância:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - c_i) \quad (3)$$

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_i - c_i) - \overline{(m - c)}]^2 \quad (4)$$

Expandindo o quadrado da diferença em (4), vemos que:

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [m_i^2 + c_i^2 - 2m_i c_i + \bar{m}^2 + \bar{c}^2 - 2\bar{m}\bar{c} - 2m_i \bar{m} + 2m_i \bar{c} + 2c_i \bar{m} - 2c_i \bar{c}] \quad (5)$$

Agrupando os termos semelhantes em (5), obtemos:

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_i - \bar{m})^2 + (c_i - \bar{c})^2 - 2m_i(c_i - \bar{c}) + 2\bar{m}(c_i - \bar{c})] \quad (6)$$

Identificando as variâncias de  $m$  e  $c$ , simplificamos (6) em:

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \sigma(m)^2 + \sigma(c)^2 - \frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_i - \bar{m})(c_i - \bar{c})] \quad (7)$$

Observamos então no último termo de (7) a definição da covariância entre  $m$  e  $c$ , logo:

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \sigma(m)^2 + \sigma(c)^2 - 2\text{cov}(m, c) \quad (8)$$

Que por sua vez pode ser apresentado também em termos do coeficiente de correlação ente  $m$  e  $c$ :

$$\sigma(\varepsilon)^2 = \sigma(m)^2 + \sigma(c)^2 - 2\sigma(m)\sigma(c)\text{corr}(m, c) \quad (9)$$

A aplicação da expansão da teoria da propagação de incertezas, com a devida análise da correlação entre as grandezas desse método, é fundamental para garantir os melhores resultados. Em termos práticos, a não consideração da correlação implicaria em agregar às variâncias as pequenas oscilações

que a fonte de corrente pode apresentar entre as tomadas de leituras dos voltímetros, mesmo elas sendo executadas simultaneamente.

## 5. Sistema de medição

Para o controle dos equipamentos envolvidos, tomadas de leituras, processamento dos cálculos e emissão de relatórios, foi desenvolvido um software em LabVIEW®.

Este software permite ajustar os parâmetros principais da medição, tais como faixas e pontos a serem calibrado, intervalos de espera e de leitura, bem como o número de repetições a serem realizadas, possibilita também o controle remoto dos medidores e da fonte de corrente, acessa às bases de dados de rastreabilidade dos padrões utilizados e de registro de clientes e equipamentos para calibração.

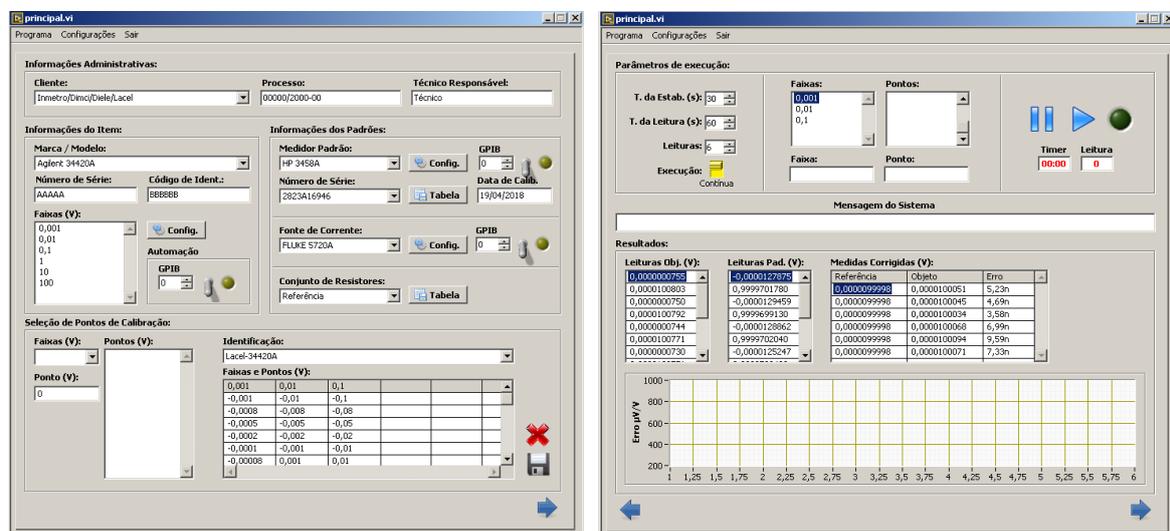


Figura 2. Telas do programa de automação das medições

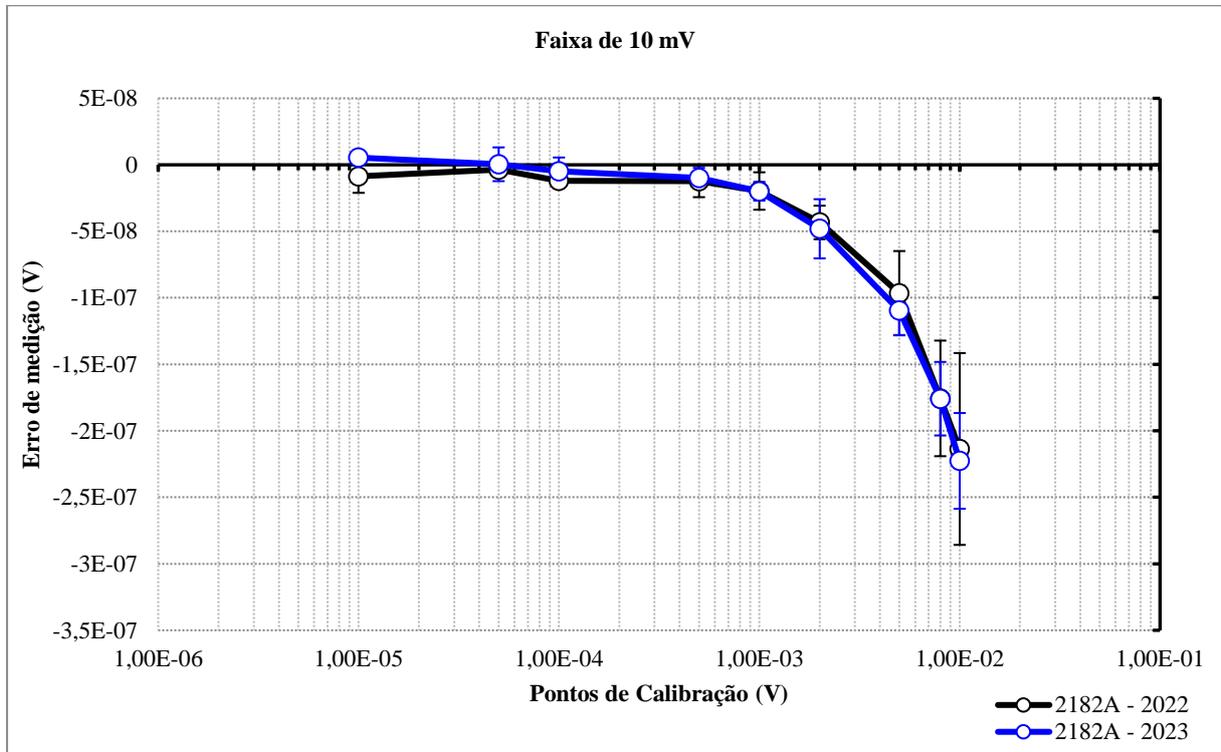
## 6. Resultados e melhor capacidade de medição

Como mencionado anteriormente, esta metodologia simples proporcionou o aumento do escopo de medições em tensões contínuas, com significativa redução de incertezas de medição. O quadro comparativo apresentado a seguir deixa mais claro esse avanço.

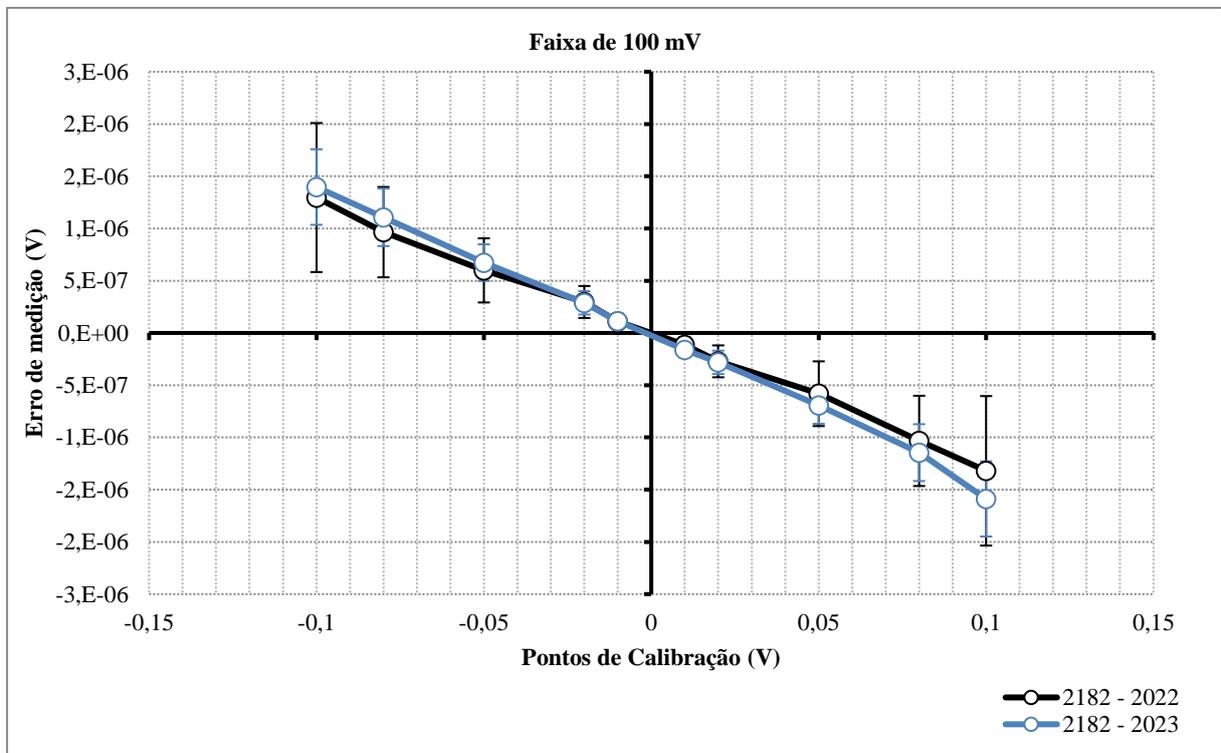
Tabela 1. Comparação entre os métodos de medição disponíveis

Metodologia	Intervalo de medição	Incerteza
Sistema potenciométrico	100 $\mu$ V até 10 mV	180 nV
	> 10 mV até 100 mV	18 $\mu$ V/V até 4 $\mu$ V/V
Razão de tensão com resistores padrão	1 $\mu$ V até 1 mV	7 nV
	> 1 mV até 100 mV	6 $\mu$ V/V

A seguir são apresentados os resultados de calibração de um nanovoltímetro do Lacel em dois anos consecutivos:



**Figura 3.** Gráfico de medição da faixa de 10 mV



**Figura 4.** Gráfico de medição da faixa de 100 mV



## 7. Conclusão

Com os bons resultados de medição alcançados, associados às incertezas relativamente baixas, o desenvolvimento do software de automação e o procedimento técnico, a implementação deste serviço foi concluída e já acumula algumas atuações para laboratórios internos do Inmetro, mesmo com parte deste processo acontecendo durante o período de restrições sanitárias em virtude da pandemia de COVID-19.

O objetivo do Lacel é atender toda a comunidade metrológica com calibrações de nanovoltímetros, garantindo assim rastreabilidade com confiança e garantia da qualidade, além de disseminar conhecimento para que outros laboratórios possam replicar e melhorar a metodologia aqui exposta.

## Referências

- [1] Measurements International, Automatic Potentiometer Model 8000A/8001A – Operating Manual. Rev. 0, Abr. 1997;
- [2] E. Arri, N. Locci, M. Tosi, “Performance of a Custom High Precision Potentiometric Device”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1989. IMTC-89. Conference Record., 6th IEEE Volume , Issue , p. 288-291, Abr. 1989;
- [3] Measurements International, Service Manual Model 8000A Automatic Potentiometer. Rev. 0, Abr. 1997;
- [4] E. Toth, “Manual do Sistema Potenciométrico de Medição”, relatório técnico interno, Inmetro, 1 ed., Jun. 2000;
- [5] P. Simonsson, H. Nilsson, “An Automated Measuring System for One-to-Ten Volt dc”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 42, N° 2, p. 580-582, Abr. 1993;
- [6] KEITHLEY, Low Level Measurements Handbook. 6 ed. Keithley Instruments, 2004;
- [7] Y. Sakamoto, T. Endo, T. Sakuraba, “A 10 V Calibrating System Using an Automated Voltage Divider and a 1 V Josephson Array”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 42. no. 2, p. 583-587, Abr. 1993;
- [8] FLUKE. Calibration: Philosophy in Practice. 2. ed. Everett: Fluke, Abr. 1994;
- [9] [B. F. FIELD,] “A Sub-PPM Automated 1-10 Volt DC Measuring System”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-34, no. 2, p. 327-330, Jun. 1985.asdf asd fasdf