# MINIMIZAÇÃO DE ERROS EM CIRCUITOS DE TRANSFERÊNCIA AC-DC EM TENSÃO

*F. A. Silveira* [1]

[1] Inmetro/Dimci/Diele, Duque de Caxias, Brasil, *fsilveira@inmetro.gov.br*

**Resumo:** O presente trabalho apresenta o resultado de testes realizados sobre circuitos utilizados em serviços de calibração de transferidores térmicos, prestados pelo Laboratório de Tensão e Corrente Elétrica do Inmetro. Resultados são pautados por um estudo comparativo, e alguns erros de medida são minimizados com medidas simples de aterramento e guarda.

**Palavras chave:** AC-DC, Inmetro, Latce, guarda, tensão.

## 1. INTRODUÇÃO

Os erros de modo comum (EMC) são provocados principalmente pela queda de tensão no plano de aterramento dos equipamentos de teste do circuito, devido à existência de uma impedância residual de terra. Em geral, portanto, o chassi de cada equipamento estará a um potencial diferente, devido à impedância distribuída *z*.

O espectro das correntes de modo comum (CMC) depende, dentre outros fatores, da frequência de operação da linha, da impedância de entrada de cada equipamento em linha, e de impedâncias de acoplamento entre o circuito principal e de alimentação. Pela diversidade de equipamentos que tipicamente estão conectados à linha, na prática é impossível determinar qual a forma do espectro da CMC, embora seus efeitos possam ser minimizados com a adoção de medidas de aterramento e guarda (nos instrumentos onde disponível) adequadas.

Nas seções a seguir, são apresentadas uma breve introdução à transferência AC-DC e seu mensurando, a diferença AC-DC $\delta$, e um estudo dos EMC envolvidos na malha de medida de tensão que compõem $\delta$. Em seguida, três diferentes circuitos de medida são avaliados, e comparados entre si.

## 2. RASTREABILIDADE

Com o fim de desenvolver o sistema de padronização primária, o Latce adquiriu um conjunto de conversores térmicos de multijuncões planares (PMJTC) e construiu o conjunto de resistores necessário para formar os padrões e estabelecer a escala de tensão de 200 mV até 1000 V [1].

Atualmente, o Latce dispõe de padrões de transferência eletrônicos Fluke modelo 792A [2,3], que operam na faixa de 2 mV até 1000V e de 10 Hz até 1 MHz. Um dos padrões, designado primário, tem suas diferenças AC-DC rastreadas ao Physikalisch Technische Bundesanstalt – Alemanha (PTB). A implantação da padronização primária de tensão AC trará a rastreabilidade da grandeza para o escopo do Latce, e evitará o envio periódico dos padrões eletrônicos (que passarão a ser operados unicamente como padrões de trabalho) ao exterior.

## 3. CALIBRAÇÃO DE PADRÕES

A diferença AC-DC é disseminada pelos padrões eletrônicos de acordo com o procedimento definido em Ref. [4], brevemente discutido a seguir. Considere o esquema da Fig. 1, que trata da calibração de um padrão de transferência AC-DC em tensão.

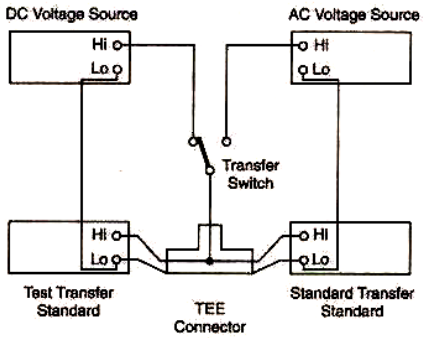


**Fig. 1. Calibração de padrões de transferência em tensão. Adaptado de Ref. [2]**

A chave (Transfer Switch) alterna a aplicação de tensão alternada (VA), tensão contínua direta (VP) e tensão contínua reversa (VM) aos padrões, na sequência VA, VP, VA, VM, VA, em ciclos de medição. Depois de cada câmbio (e após os tempos de estabilização apropriados), são registradas as médias EA, ED, UA, UD das leituras de tensão de saída no instrumento teste (Test Transfer Standard, ou objeto, por simplicidade) e no instrumento padrão (Standard Transfer Standard ou padrão), onde:

1- UA (alternativamente, EA) é uma média de leituras do padrão de referência (objeto) quando VA é aplicado ao circuito;

2- UD (alternativamente, ED) é uma média de leituras do padrão de referência (objeto) quando VP e VM são aplicados ao circuito

A diferença AC-DC $\delta_i$ de cada ciclo é determinada por:

$$\delta_i = \frac{\frac{UA}{UD} - 1}{NP} - \frac{\frac{EA}{ED} - 1}{NO} \quad (1)$$
$$1 + \frac{\frac{EA}{ED} - 1}{NO}$$

onde NO, NP são os coeficientes de linearidade do objeto e do padrão, respectivamente. Uma medição é composta pela repetição de N ciclos realizados sob condições idênticas, e a diferença AC-DC $\delta$ é determinada por:

$$\delta = \delta_N + \delta_S + \delta_D + \delta_C + \delta_T \quad (2)$$

onde $\delta_N$ é média dos resultados $\delta_i$ em N ciclos de medição; $\delta_S$ é a diferença AC-DC apresentada no certificado de calibração do padrão de referência; $\delta_D$ é a contribuição à $\delta$ devido ao drift do padrão; $\delta_C$ é a contribuição à $\delta$ devido ao câmbio de cabos e conectores; $\delta_T$ é a contribuição à diferença AC-DC devido à variação de temperatura ambiente. As diferenças $\delta_D$, $\delta_C$ e $\delta_T$ apenas contribuem para a incerteza combinada; i.e., $\delta_D = \delta_C = \delta_T = 0$.

## 4. EMC E TRANSFERÊNCIA AC-DC

A transferência AC-DC depende fortemente da qualidade das medidas de tensão DC realizada nas saídas dos instrumentos padrão e objeto, e um dos principais problemas encontrados em medidas de tensão no nível do *nV* é neutralizar o acoplamento dos diversos pontos de aterramento do circuito de medida. A queda de tensão na impedância distribuída por meio da corrente de modo comum é a principal causa deste acoplamento. Um artifício bastante simples permite que a influência da CMC seja controlada e até eliminada, em alguns casos; trata-se do guarda.

Alguns instumentos possuem uma blindagem adicional entre o circuito interno e o chassi (GND). Esta blingadem é chamada guarda (GRD), e é projetada para aumentar a impedância líquida entre o LO e o GND [2,5]. Há diversas formas de conectar o GRD ao circuito, e aproveitar suas características para eliminar o acoplamento dos diversos circuitos conectados à linha, tipicamente em medidas acima do terra.

A Fig. 2 mostra o diagrama de uma medida de tensão aterrada; a Fig. 3, uma medida de tensão acima do terra utilizando um multímetro com guarda.

Na Fig. 3, uma tensão de modo comum de 10 V provoca queda de tensão sobre a resistência do guarda ($r_2$) e sobre o cabo Lo, através de $r_1$ e $c_1$. Essa ddp é <1 nV a 1 kHz, e a corrente através do Lo devido a ela é desprezível. A ddp sobre $r_2$ também faz com que corrente circule através de $c_3$ e pelo cabo Hi. A corrente que atravessa $c_3$ é igualmente desprezível a baixas frequências, o erro a 1 kHz pode chegar a uns poucos microvolts. O uso do guarda neste exemplo reduz os erros causados por CMC em até 80 dB, quando comparado ao circuito aterrado da Fig. 2.

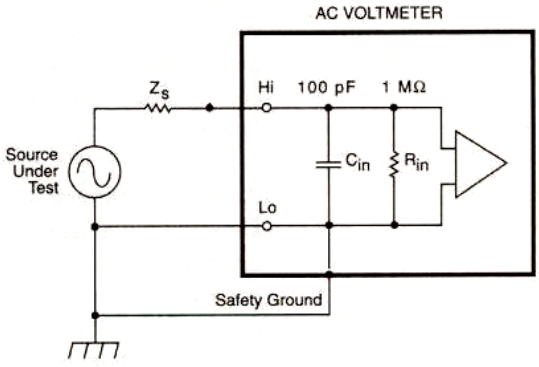


**Fig. 2. Medida de tensão com circuito aterrado. Adaptado de Ref. [2]**

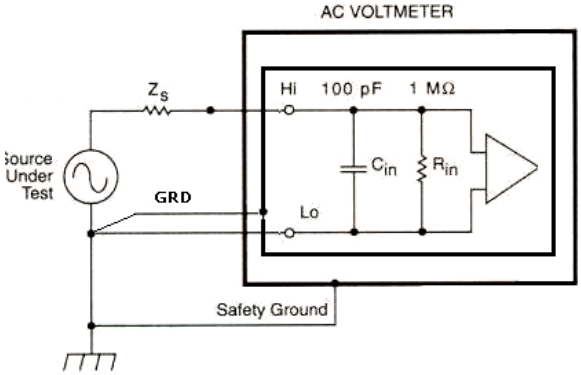


**Fig. 3. Medida de tensão acima do terra. Adaptado de Ref. [2]**

Configurar corretamente o guarda dos equipamentos em um sistema de medição de tensão pode ser uma tarefa complexa. Há situações que demandam análise cuidadosa, tão diversas quanto o número de equipamentos de bancada que se podem interconectar. A rigor, a melhor forma de julgar uma configuração é comparar medições; no entanto, existem algumas regras práticas que podem auxiliar na escolha segura destas configurações [2,5].

1. O GRD pode ser usado tanto para reduzir erros provocados por CMC quanto para prover blindagem eletromagnética. O grau de adequação de uma configuração com guarda para um e outro fim depende das características de projeto de guarda dos equipamento interconectados;
2. Em geral, as configurações com guarda não são efetivas acima de 100 kHz;
3. O GRD nunca deve estar aberto. As ddp de ruptura dielétrica Lo-GRD são usualmente menores que as ddp de ruptura Lo-GND e podem provocar dano aos circuitos mesmo a baixas tensões;
4. Conecte o GRD de forma que GRD e Lo estejam sempre no mesmo potencial, ou que GRD e Lo estejam conectados na fonte. GRD e Lo, em regra, devem estar conectados em algum lugar do circuito;
5. Conecte o GRD de forma que as CMC não fluam através do terminal Lo.

Três padrões eletrônicos modelo Fluke 792A (F792A) compõem atualmente o sistema de padronização AC do Inmetro. Foram experimentadas três circuitos diferentes para a calibração de transferidores AC-DC em tensão, em pontos de baixa estabilidade na faixa ativa do F792A, e uma comparação realizada com os resultados obtidos por meio da configuração utilizada anteriormente [6].

## 5. CONFIGURAÇÕES REALIZADAS

Esta seção detalha os testes de configuração de guarda realizados com o sistema de transferência AC-DC em tensão, na calibração de um padrão eletrônico. Os circuitos são denominados C1, C2 e C3, e detalhados nas subseções **5.1** a **5.3**, respectivamente.

Para os testes, foram escolhidos alguns pontos na faixa de 22 mV do padrão. O sistema de medição é composto por dois nanovoltímetros Keithley 182A (K-182), dois padrões eletrônicos Fluke 792A (F792A), um micropotenciômetro Holt modelo 12 (H12), e um calibrador Fluke 5720A (F5720A). Em todas as configurações relatadas, o calibrador opera como fonte de tensão em modo EXT GRD ON.

O mensurando é a diferença AC-DC $\delta$ do instrumento teste corrigida pelos valores de certificado do padrão de trabalho, medido e calculado de acordo com as equações 1 e 2.

### *5.1. Circuito C1*

A Fig. 4 mostra o circuito utilizado para a calibração de padrões em tensões de 2 a 200 mV e frequências de 10 Hz a 1 MHz [4], e as Figs. 5 e 6 mostram gráficos de dispersão em frequência (denotada no gráfico pela letra *f*, e medida em hertz) das diferenças AC-DC $\delta$ (em μV/V) fornecidas a um dos clientes do Latce em setembro de 2008, nas tensões nominais 2 e 6 mV, na faixa de 22 mV do padrão, usando esta configuração.

O comportamento esperado para as diferenças AC-DC acima de 100 kHz é monotônico, e dominado principalmente pelo offset DC (relacionado à corrente nos resistores do sensor rms, e atribuído a efeitos termoelétricos) e à perdas reativas [2,7]. As Figs. 5 e 6 mostram que há um forte desvio deste comportamento próximo a 1 MHz que não pode ser explicado nos mesmos termos.

A Tabela 1 mostra os valores de $\delta$ para o mesmo serviço, para 24 pontos na faixa de 22 mV. Estes dados foram obtidos durante a realização de serviços regulares de calibração em 2007 e 2008; as barras entre os valores separam as diferenças obtidas em anos diferentes, e os valores são expressos em μV/V. As incertezas associadas a estes valores são mostradas na Tabela 2. As incertezas relatadas na Tabela 2 são declaradas como incertezas padrão multiplicadas por um fator de abrangência *k=2*, que para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

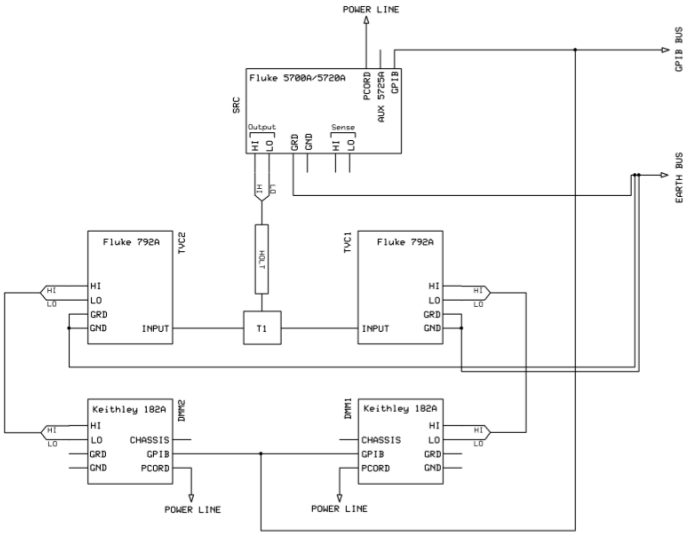


**Fig. 4. Circuito para calibração de padrões de transferência em tensão com guarda aterrado [6]**

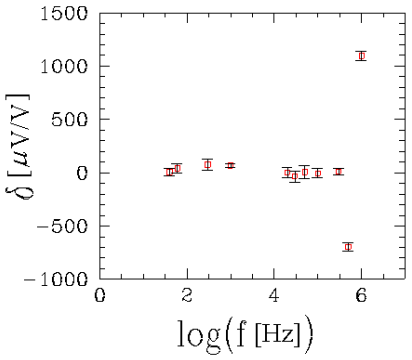


**Fig. 5. Dispersão em frequencia das diferenças AC-DC em 2mV**

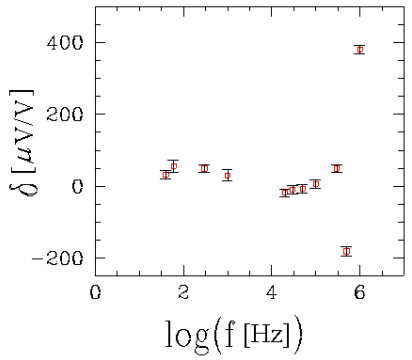


**Fig. 6. Dispersão em frequencia das diferenças AC-DC em 6mV**

**Tabela 1. Diferenças AC-DC na faixa de 22 mV**

| Faixa de Medição | Tensão medida | *Diferença AC-DC [μV/V] 2007/2008* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **40 [Hz]** | **60 [Hz]** | **300 [Hz]** | **1 [kHz]** | **50 [kHz]** | **1 [MHz]** |
| 22 mV | 2 mV | *22/6* | *26/30* | *57/50* | *24/37* | *-14/4* | *559/611* |
| | 6 mV | *35/32* | *45/49* | *51/49* | *15/34* | *3/-7* | *243/288* |
| | 10 mV | *35/33* | *56/50* | *48/52* | *20/28* | *-8/-7* | *279/221* |
| | 20 mV | *43/44* | *45/49* | *47/44* | *11/15* | *-14/-18* | *109/113* |

**Tabela 2. Incertezas na faixa de 22 mV**

| Faixa de Medição | Tensão medida | *Incerteza Expandida [μV/V] 2007/2008* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **40 [Hz]** | **60 [Hz]** | **300 [Hz]** | **1 [kHz]** | **50 [kHz]** | **1 [MHz]** |
| 22 mV | 2 mV | *102/122* | *102/121* | *102/120* | *102/120* | *106/125* | *186/197* |
| | 6 mV | *64/72* | *64/72* | *64/72* | *55/64* | *55/64* | *135/139* |
| | 10 mV | *54/55* | *54/55* | *54/55* | *49/50* | *44/46* | *114/115* |
| | 20 mV | *37/37* | *37/38* | *37/38* | *32/33* | *37/37* | *93/93* |

### *5.2. Circuito C2*

A Fig. 7 mostra uma possível opção à configuração do item 5.1, para a calibração de padrões eletrônicos em tensões de 2 a 200 mV e frequências de 10 Hz a 1 MHz. A Tabela 3 mostra os valores de diferença AC-DC corrigida em 2 mV; as incertezas relatadas são os desvios padrão das medidas em 6 repetições, e todos os valores são dados em μV/V. Os dados da Tabela 3 mostram resultados pouco repetitivos para a configuração da Fig. 7, particularmente em 1 MHz, além de apresentar flutuações no valor central de diferença que fogem ao comportamento esperado em HF.

A baixa repetitividade das medições realizadas com esta configuração pode ser explicada da seguinte forma: uma vez que apenas a malha formada por F792A e K-182 seja considerada, o circuito de entrada do K-182 é similar à situação mostrada na Fig. 2, e favorece a forte atuação de correntes de modo comum na composição do erro de medição nesta malha.

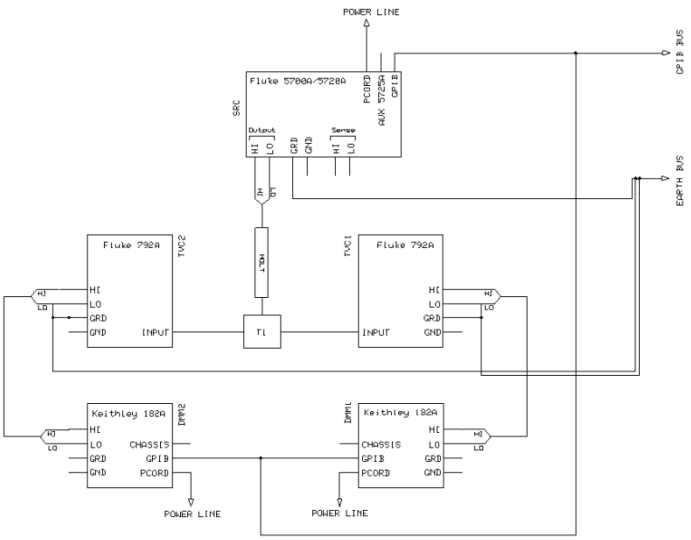


**Fig. 7. Circuito para calibração de padrões de transferência em tensão com Lo aterrado**

**Tabela 3. Repetitividade das medidas em 2 mV**

| | **19/10/2009** | **21/10/2009** | **22/10/2009** | **repetitividade** |
|---|---|---|---|---|
| **50 kHz** | *-29±20* | *-42±32* | *-16±32* | *6,6* |
| **100 kHz** | *22±32* | *-1±30* | *-15±40* | *7,7* |
| **300 kHz** | *70±37* | *73±32* | *71±12* | *4,4* |
| **500 kHz** | *171±25* | *163±33* | *165±25* | *2,4* |
| **1 MHz** | *243±54* | *270±34* | *238±34* | *9,9* |

### *5.3. Circuito C3*

A Fig. 8 mostra o sistema utilizado para a calibração de padrões eletrônicos em tensões de 2 a 200 mV e frequências de 10 Hz a 1 MHz, e as Figs. 9 e 10 mostram resultados de calibração do instrumento de um cliente contra um de nossos padrões de trabalho obtidos respectivamente para 2 e 6 mV, em frequências de 40 Hz a 1 MHz, usando esta configuração. As barras de incerteza mostradas nas figuras correspondem a desvios-padrão das medidas. Estes resultados datam de serviços de calibração e testes realizados pelo Inmetro em outubro de 2009.

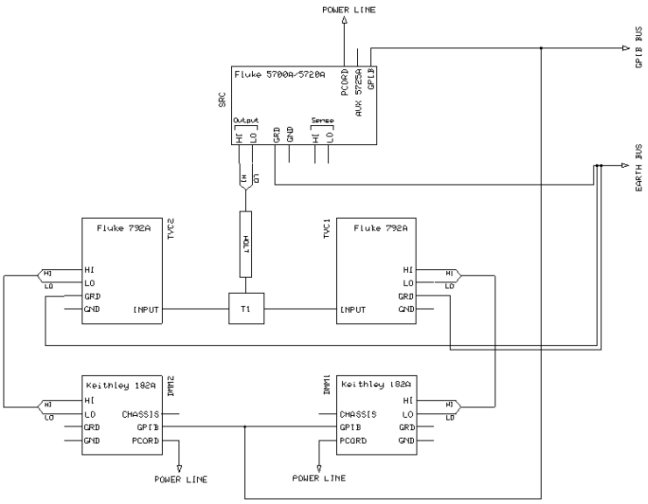


**Fig. 8. Circuito para calibração de padrões de transferência em tensão com Lo flutuando e guarda**

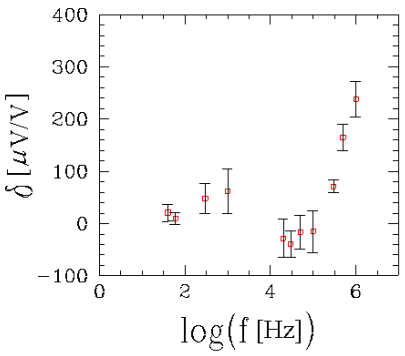


**Fig. 9. Dispersão em frequencia das diferenças AC-DC em 2mV**

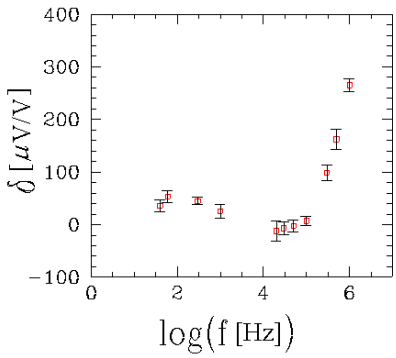


**Fig. 10. Dispersão em frequencia das diferenças AC-DC em 6mV**

A Tabela 4 mostra os valores de diferença AC-DC corrigida para pontos na faixa de 22 mV; todos os valores são dados em μV/V. Os resultados da Tabela 4 mostram maior repetitividade (menor que 10 μV/V), além da drástica redução da diferença AC-DC corrigida em 1 MHz (de até 5 vezes) e o bom acordo com o comportamento esperado em HF, donde a configuração C3 representa evolução se comparada aos circuitos C1 e C2. Note que a escala vertical das Figs. 9 e 10 é aproximadamente 3 vezes menor que a das Figs. 5 e 6.

As incertezas associadas a estes valores são mostradas na Tabela 5. As incertezas relatadas na Tabela 5 são declaradas como incertezas padrão multiplicadas por um fator de abrangência *k=2*, que para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

**Tabela 4. Diferenças AC-DC na faixa de 22 mV**

| Faixa de Medição | Tensão medida | *Diferença AC-DC [μV/V] 2009* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **40 [Hz]** | **60 [Hz]** | **300 [Hz]** | **1 [kHz]** | **50 [kHz]** | **1 [MHz]** |
| 22 mV | 2 mV | *21* | *10* | *48* | *62* | *-16* | *238* |
| | 6 mV | *36* | *45* | *45* | *25* | *-2* | *270* |
| | 10 mV | *36* | *51* | *50* | *28* | *-14* | *234* |
| | 20 mV | *46* | *46* | *45* | *17* | *-16* | *86* |

**Tabela 5. Incertezas na faixa de 22 mV**

| Faixa de Medição | Tensão medida | *Incerteza Expandida [μV/V] 2009* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **40 [Hz]** | **60 [Hz]** | **300 [Hz]** | **1 [kHz]** | **50 [kHz]** | **1 [MHz]** |
| 22 mV | 2 mV | *85* | *84* | *87* | *91* | *92* | *203* |
| | 6 mV | *76* | *76* | *76* | *72* | *72* | *170* |
| | 10 mV | *64* | *64* | *64* | *60* | *56* | *153* |
| | 20 mV | *46* | *46* | *46* | *46* | *49* | *137* |

## 6. CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo das configurações combinadas de guarda e aterramento para sistemas operando acima e no nível de terra, e um rol de diretrizes básicas para realizar estas configurações com segurança e efetividade foi reunido a partir de um conjunto mínimo de referências bibliográficas sobre o assunto. Então, e a partir do exposto nesta revisão, novas configurações foram aplicadas ao sistema de calibração de transferidores térmicos do Latce.

Os resultados são pautados por um estudo comparativo, em que os erros de medida são relacionados com as correntes de modo comum, e minimizados com medidas de aterramento e guarda bastante simples. Dentre os resultados centrais, podemos citar a redução consistente da diferença AC-DC em 2 mV acima de 100 kHz na calibração de um instrumento teste contra um dos padrões de trabalho do Latce. Esta redução pode ser de um fator de até $10^3$, com melhora significativa na repetitividade das medidas.

Depois de calculada a incertezas combinada, verifica-se que também as incertezas em 2 mV apresentam melhora em todas as frequências. Os resultados são mais repetitivos neste ponto, e as diferenças em 1 MHz são as menores historicamente já obtidas para estes instrumentos, além do melhor ajuste das diferenças ao comportamento esperado em frequência [2,7].

Atualmente, a configuração indicada nos procedimentos específicos do Latce responde historicamente de maneira repetitiva, mas as configurações de aterramento e guarda não são uniformes para pontos na mesma faixa (e.g. a faixa de 22 mV do padrão), como seria de se esperar. De fato, medições preliminares mostraram que os mesmos bons resultados obtidos para 2 mV não são facilmente estendidos a toda a faixa ativa; acima de 2 mV as diferenças e suas incertezas flutuam sistematicamente acima da média histórica. Ainda, as novas configurações de aterramento e guarda parecem se tornar relevantes apenas muito acima de 100 kHz, que é o limite estabelecido na literatura para a redução de erros de modo comum por este método [2,5]. Estes dois fatos sugerem que outras fontes de erro sejam investigadas.

A cobertura de todos os pontos da faixa ativa encontra-se fora do escopo deste trabalho, mas as boas perspectivas abertas ensejam a realização de novos testes, particularmente entre 10 e 200 mV e em pontos em HF.

## REFERÊNCIAS


[1] R. Afonso Jr., G. Borghi, R. P. Landim, E. Afonso and F. A. Silveira, "O Sistema de Padronização Primária de Tensão AC do Inmetro", Proc. of VII Semetro, N 52010, Julho de 2009

[2] Fluke Corp., "Calibration: Philosophy in Practice", Fluke Corp., 1994

[3] Fluke Corp., "Design and Evaluation of 792A AC-DC Transfer Standard", Fluke Application Note 1268781 A-ENG-N Rev. B, 2000

[4] Norma Inmetro Técnica NIT-Latce-001 Rev 08 , 2011

[5] HP Application Note HP AN 123 (1970); v. tb. *http://www.hpmemory.org/ressources/resrc_an_01.htm*

[6] Norma Inmetro Técnica NIT-Latce-001 Rev 06 (2009)

[7] Inglis, B. D.: "Standards for AC-DC Transfer", Metrologia 29, 191, 1992