



O SISTEMA DE PADRONIZAÇÃO PRIMÁRIA DE TENSÃO AC DO INMETRO

Renato Afonso Jr.¹, Giovanna Borghi², Regis P. Landim³, Edson Afonso⁴, Flávio A. Silveira⁵

¹ Inmetro/Dimci/Diele, Duque de Caxias, Brasil, rajunior@inmetro.gov.br

² Inmetro/Dimci/Diopt, Duque de Caxias, Brasil, gbalmeida@inmetro.gov.br

³ Inmetro/Dimci/Diele, Duque de Caxias, Brasil, rplandim@inmetro.gov.br

⁴ Inmetro/Dimci/Diele, Duque de Caxias, Brasil, eafonso@inmetro.gov.br

⁵ Inmetro/Dimci/Diele, Duque de Caxias, Brasil, fsilveira@inmetro.gov.br

Resumo: O presente trabalho apresenta o sistema de padronização primária de tensão AC desenvolvido no Laboratório de Tensão e Corrente Elétrica (Latce) do Inmetro. A diferença de tensão AC-DC é obtida através da utilização de padrões de transferência térmica planares (PMJTC). Com este novo sistema, o Latce pretende melhorar os níveis de incerteza nesta grandeza.

Palavras chave: diferença AC-DC, PMJTC, padronização primária.

1. INTRODUÇÃO

Para garantir a confiabilidade metrológica em tensão AC, o Latce utiliza um padrão de transferência térmica comercial que opera na faixa de 2 mV até 1000 V e de 10 Hz até 1 MHz. Periodicamente este padrão é enviado ao PTB (Physikalisch Technischen Bundesanstalt) para calibração, garantindo a sua rastreabilidade a referências internacionais e possibilitando a padronização desta grandeza no país e sua disseminação para os laboratórios que integram a RBC (Rede Brasileira de Calibração) e a todos os laboratórios que necessitem desta rastreabilidade. Com este padrão, o Latce está limitado em suas incertezas de medição, o que dificulta a sua participação em comparações internacionais como um INM (Instituto Nacional de Metrologia).

Para desenvolver o sistema de padronização primária, o Latce adquiriu um conjunto de conversores térmicos de multijunções planares (PMJTC - Planar Multijunction Thermal Converters) e desenvolveu o conjunto de resistores em série necessário para formar os padrões e estabelecer a escala de tensão de 200 mV até 1000 V. O procedimento utilizado foi o step-up, que é bastante conhecido por todos os INM.

Para as baixas tensões de 2 mV até 200 mV, o processo step-down utiliza um divisor de tensão resistivo e dois padrões de transferência térmico de tensão (comercial). O começo deste processo se dá através de uma comparação feita na tensão de 200 mV entre o PMJTC 90 Ω e a faixa de 200 mV do padrão de transferência térmico, este assunto será abordado mais detalhadamente em um próximo artigo.

Neste artigo nós apresentaremos os padrões utilizados no sistema, a metodologia aplicada (step-up), o software de automatização que controla as medidas e executa os cálculos, o estado do desenvolvimento e alguns resultados obtidos até o momento.

2. TEORIA DE OPERAÇÃO

Os padrões de transferência AC-DC baseados em conversores térmicos (*thermal converters*, ou TC) fornecem a mais precisa conexão conhecida entre tensão e corrente AC e DC. O uso de TCs como padrões de transferência para as grandezas tensão e corrente está bem consolidado, e este tipo de conversor é usado como padrão de transferência primário por diversos INMs há mais de 30 anos [1-5]. Muito progresso foi feito no curso desta década, da introdução dos conversores térmicos de junção simples (*single-junction TCs*, ou SJTC) à operação dos primeiros conversores térmicos de multijunção planar (*planar multijunction TCs*, ou PMJTC). O surgimento das PMJTCs data do desenvolvimento das primeiras multijunções tridimensionais (MJTC) pelo PTB, no início dos anos 70. A utilização das MJTCs reduziu as incertezas ao tornar os efeitos termoelétricos menos significativos pela redução dos gradientes de temperatura ao longo do filamento (*heater*). O aumento de exatidão foi acompanhado por um incremento nos custos de fabricação.

Posteriormente, mais um progresso foi alcançado com o surgimento de novos materiais e moderna tecnologia, como o uso de filamentos de filmes finos e termopares construídos sobre membranas dielétricas. Este novo salto levou as PMJTCs que proporcionam estabilidade a longo prazo, e resposta dinâmica na faixa de frequência. Também é um fato bem conhecido que as PMJTCs exibem pequena diferença de transferência de tensão AC-DC na faixa de áudio-frequências [6-10].

Um conversor térmico é composto por um pequeno filamento resistivo que opera como aquecedor, ou *heater*, conectado a pontas de prova bem estáveis em seus terminais, e a um termopar no seu centro. O elemento conversor é encapsulado em um bulbo evacuado de vidro,

para evitar perdas de calor por convecção. O princípio da equivalência consiste em medir com termopares o incremento da temperatura no *heater*, quando atravessado alternadamente por correntes AC e DC. O principal processo físico responsável por este aumento de temperatura é chamado aquecimento Joule. A tensão de saída do termopar varia de 7 mV a 10 mV, de acordo com o par de metais escolhido. Um exemplo esquemático deste tipo de conversor, seu encapsulamento e construção, é mostrado na Figura 1.

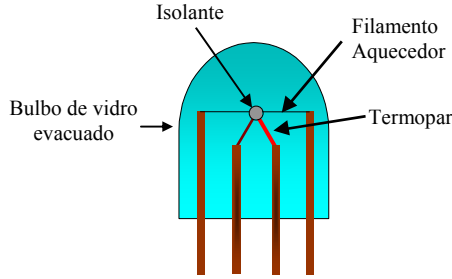


Fig. 1. Esboço da junção de um conversor térmico.

Em um instrumento ideal, espera-se que uma corrente DC cause o mesmo incremento de temperatura no *heater* que a aplicação de uma corrente AC. Isto não ocorre, na prática, devido a efeitos termoelétricos como os efeitos Thomsom e Peltier, responsáveis por uma redistribuição não homogênea da temperatura no *heater*, dependente do sentido da corrente elétrica, e que causam uma diferença AC-DC sistemática.

As distribuições de temperatura ao longo do *heater* em regime AC e DC são diferentes. Quando uma corrente DC atravessa o *heater*, é acompanhada pelo surgimento de um gradiente de temperaturas paralelo ao sentido da corrente local. Em regime AC, as oscilações no perfil de temperaturas são absorvidas por integração sobre o período de oscilação da corrente, pela inércia térmica. Uma PMJTC consiste em uma matriz de termoelementos (TE) dispostos em série, com o fim de minimizar os erros devidos a efeitos termoelétricos.

Como a tensão DC é uma grandeza bem conhecida (rastreada ao efeito Josephson quântico), pode-se comparar a saída da junção quando submetida a tensões DC e AC de mesma magnitude. A saída é a mesma, idealmente. Mas, devido a efeitos termoelétricos e a oscilações de temperatura abaixo do período de integração térmica do *heater* (*low-frequency tracking*) sobre o sinal (tensão) de entrada, e à reatância e à perda dielétrica (corrente), a diferença AC-DC é uma quantidade não-nula, em geral.

Para estabelecer a diferença AC-DC, minimizando algumas fontes de erro, utiliza-se um procedimento bastante conhecido, onde se aplica na entrada da multijunção a sequência de tensões: AC, DC mais, AC, DC menos, AC, medindo a tensão DC na saída da multijunção. Na teoria, o valor da diferença AC-DC é definido como a diferença de tensão relativa entre o valor de entrada AC e DC quando a tensão de saída for equivalente. Isso pode ser visto na equação 1.

$$\delta_{ac-dc} = \frac{V_{ac} - V_{dc}}{V_{dc}} \bigg|_{U_{ac}=U_{dc}} \quad (1)$$

Onde:

V_{ac} é a tensão AC aplicada,

V_{dc} é a média entre o valor DC mais e DC menos aplicado,

U_{ac} e U_{dc} são as tensões AC e DC de saída.

Dentre as características comuns aos conversores térmicos está a corrente máxima de 10 mA. Instrumentos baseados em TCs podem ser usados indistintamente para padronização de tensão e corrente. Como padrões de tensão, os conversores devem ser usados com um divisor resistivo em série, com o fim de reduzir a tensão de entrada. Como padrões de corrente, devem estar conectados a *shunts*.

3. SISTEMA DE PADRONIZAÇÃO AUTOMATIZADO

Para a padronização da transferência de tensão AC-DC, utilizou-se: duas PMJTCs com valor de resistência de aquecimento de 180 Ω , calibradas no PTB em 1,5 V e na faixa de frequência que varia de 10 Hz a 1 MHz, onze de 90 Ω , uma de 400 Ω e uma de 900 Ω . Estas PMJTCs utilizadas em conjunto com resistores estabelecem a faixa de tensão que varia de 200 mV até 1000 V, quando aplicado o procedimento de step-up (figura 2). Os resistores utilizados para os valores de 5 V até 300 V são resistores comerciais do tipo *power film* e a montagem foi feita no Inmetro. Acima de 300 V utilizam-se resistores comerciais (Fluke 1000 V range resistor).

O modelo da calibração da transferência AC-DC está baseado no método da diferença para medir a diferença AC-DC, δ_d , onde no valor do padrão conhecido, δ_s , deve ser acrescentado a diferença da transferência AC-DC, conforme mostra a equação (2). As diferenças das tensões de saída de ambos os conversores, que têm valores equivalentes, são medidas com dois nanovoltímetros, onde um mede a junção conhecida e o outro a tensão de saída do conversor desconhecido, δ_x .

$$\delta_x = \delta_d + \delta_s \quad (2)$$

A incerteza associada da diferença $u(\delta_s)$ da transferência AC-DC para cada tensão no step-up é calculada como mostra a equação (3).

$$u^2(\delta_x) = u^2(\delta_d) + u^2(\delta_s) \quad (3)$$

A melhor solução para a equação 3 é obtida usando o método dos mínimos quadrados e a solução é o vetor δ' que que minimiza a incerteza padrão.

$$(A \cdot \delta - B)^T \cdot (A \cdot \delta - B) = \min \quad (4)$$

$$\delta' = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (5)$$

A incerteza padrão da medida de diferença entre ambos os conversores $u(\delta_d)$ é obtido através da equação 6 e $u(\delta_s)$ é obtido no certificado do INM.

$$u^2(\delta_d) = u_A^2(\delta_d) + u_C^2(\delta_d) + u_M^2(\delta_d) \quad (6)$$

Onde:

u_A é o desvio padrão (Tipo A),
 u_C é a incerteza do padrão da comparação,
 u_M é a incerteza do padrão devido ao método.

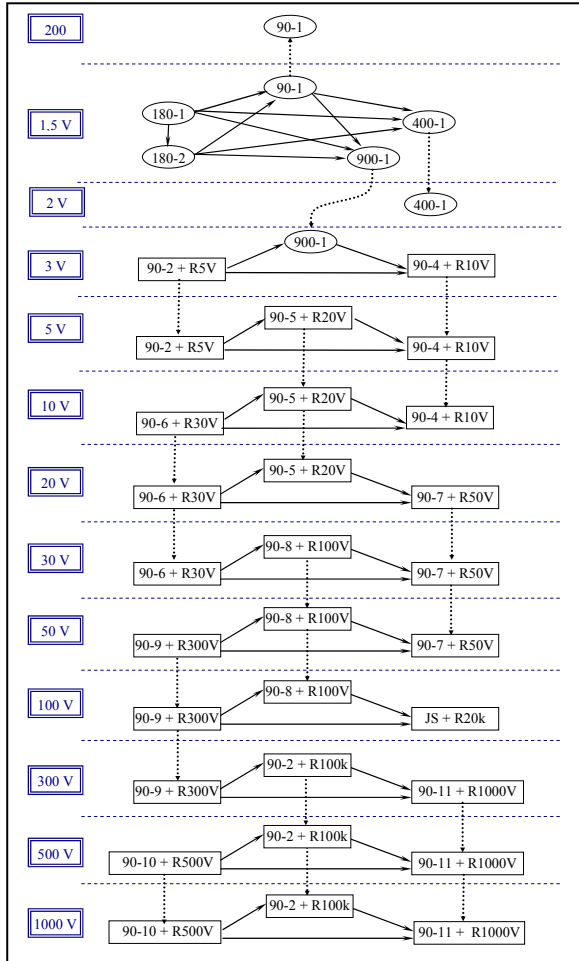


Fig. 2. Esquema do procedimento de step-up em tensão.

Desenvolvido na linguagem Labview™ o software de medição faz o controle dos equipamentos envolvidos na calibração através da porta GPIB e RS232. Dentre outras características o software controla a medição das condições ambientais, armazena os dados de uma calibração em banco de dados e permite a consulta ao histórico das medições realizadas.

O status da medição e os resultados podem ser visualizados durante a medição. O software controla seis equipamentos diretamente: 2 fontes; 2 nanovoltímetros; 1 switch; 1 medidor de temperatura e umidade. A figura 3 mostra o esquema simplificado do sistema de medição.

O software desenvolvido tem a interface amigável e por meio de painéis de configurações é possível controlar os instrumentos (figuras 4 e 5). Estes painéis são divididos em 4 grupos principais descritos a frente.

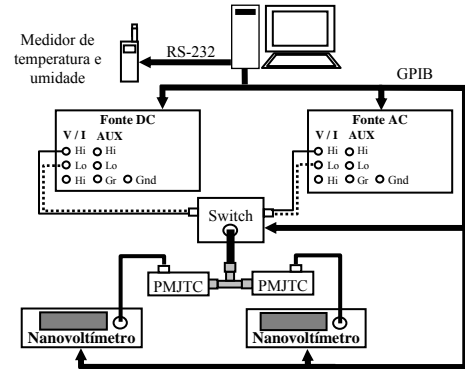


Fig. 3. Esquema simplificado do sistema de padronização primária de tensão AC-DC do Latce.

1º painel – Seleção de padrões PMJTC e pontos de tensão e frequências que serão medidos: Permite ao operador selecionar as PMJTC's que serão utilizadas como referência e como objeto da calibração; É possível incluir ou modificar as informações relacionadas as PMJTC's. Os pontos (tensão e frequência) que serão medidos devem ser definidos neste painel também.

2º painel – Configuração (figura 4): O operador pode alterar os parâmetros de calibração como: Tempo de aquecimento, Tempo de espera entre as leituras, N° de repetições por ponto, Habilitar ou não o guarda externo das fontes, Habilitar o Holt e ativar o registro das medições.

É necessário selecionar as fontes e os medidores que serão utilizados. É possível a inclusão de novas fontes e medidores, caso os mesmos não estejam cadastrados.

3º painel – Medição (figura 5): O operador pode visualizar os pontos de medição e acompanhar o seu status. Através do gráfico localizado na parte inferior da tela é possível acompanhar todas as medidas realizadas do ponto.

4º painel – Resultados: Após a medição ser concluída, o operador pode visualizar todos os resultados medidos, incluindo a data, a hora, o valor final de diferença e o desvio padrão de cada ponto programado. É possível exportar os valores medidos para uma planilha onde são realizados os cálculos de incerteza.



Fig. 4. Painel de configuração

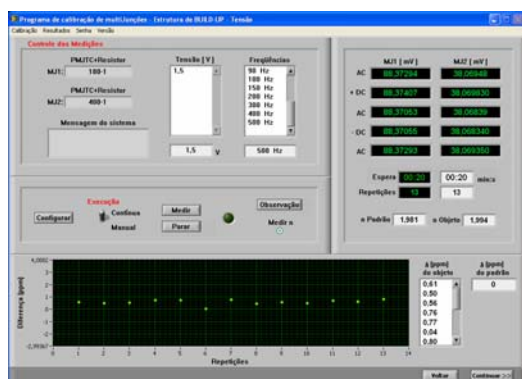


Fig. 5. Painel de medição

4. RESULTADO DE MEDIÇÕES

Os resultados obtidos no procedimento step-up estão de acordo com o esperado ao se comparar com o valor da PMJTC de 180 Ω calibrada no PTB. Os valores de diferença são mostrados na tabela 1 após aplicar o método dos mínimos quadrados (diferença AC-DC).

A metodologia utilizada para este trabalho consistiu em realizar 12 medições para cada conjunto de padrão, obtendo-se os valores da diferença AC-DC e calculando a média e o desvio padrão das medições. As incertezas foram calculadas seguindo o modelo apresentado nas eq. (3) e eq. (6). Os valores de incerteza para esses valores de tensão diminuíram aproximadamente duas vezes quando comparados com os mesmos resultados obtidos usando o Padrão de transferência comercial (Fluke 792A).

Tabela 1. Valores de diferença AC-DC em tensão ($\mu\text{V/V}$).

Freq. kHz	Tensão							
	1,5 V		3 V		5 V		10 V	
	180-1	180-2	90-2 R5V	90-2 R5V	90-4 R10V	90-5 R20V	90-6 R30V	90-7 R50V
0,01	3,15	3,45	6,32	5,41	11,72	6,64	19,23	23,45
0,02	0,49	0,71	1,46	1,41	5,08	6,64	7,62	9,72
0,03	0,13	-0,13	-0,18	-0,01	3,43	4,36	4,94	6,75
0,04	-0,02	0,02	-0,46	0,03	3,04	3,84	4,37	5,44
0,5	0,01	-0,01	-0,40	0,11	3,05	3,39	3,48	4,72
1	-0,05	0,05	-0,52	-0,12	3,00	3,33	3,64	4,80
10	0,18	0,12	-3,48	-3,04	2,54	3,52	3,59	5,66
20	0,60	0,50	-6,91	-6,46	2,23	4,06	4,00	7,00
50	1,36	0,64	-20,88	-20,35	-1,15	4,37	4,10	10,41
70	2,12	1,38	-30,91	-30,55	-4,36	3,93	4,20	12,44
100	1,12	0,18	-46,59	-45,78	-11,76	0,60	0,97	12,13
200	-0,43	-1,77	-79,99	-79,40	-25,41	-2,75	-1,58	17,77
500	-6,27	-8,83	-139,90	-138,64	-56,23	-10,90	-7,02	-
700	-11,68	-15,42	-182,61	-176,17	-87,99	-38,19	-49,39	-
1000	-18,92	-23,88	-203,57	-271,45	-9,28	77,53	-	-

O sistema apresentou excelente estabilidade, obtendo-se desvio padrão médio em torno de 0,5 $\mu\text{V/V}$ e desvio padrão máximo de 0,7 $\mu\text{V/V}$, aproximadamente, encontrados nas frequências mais baixas (< 30 Hz). Desta forma, a repetitividade não foi a contribuição de incerteza predominante para o cálculo da incerteza combinada deste sistema.

5. CONCLUSÃO

Medidas preliminares foram realizadas comparando os resultados da diferença AC-DC dos padrões utilizando duas fontes AC comerciais (Fluke 5200A e Fluke 5720A, que possui melhores níveis de exatidão). Foi verificado uma grande variação nas diferenças AC-DC resultantes e um sensível aumento no valor do desvio padrão da medição, para os casos de frequências superiores (> 500 kHz). Desta forma, pretendemos realizar uma maior investigação destes resultados para melhorarmos a estimativa das incertezas do tipo B.

O Padrão primário de transferência AC-DC está em desenvolvimento no Inmetro, pretendemos ter todos os valores de tensão estabelecidos de 200 mV até 1000 V, e de 10 Hz até 1 MHz até o fim de 2009. Após isso o procedimento step-down será iniciado. Esperamos participar em uma comparação de medidas em 2009 e assim atualizar nossa melhor capacidade de medição - CMC (Calibration and Measurement Capabilities) no banco de dados Bureau Internacional de Pesos e Medidas - BIPM (Bureau International de Poids et Mesures) com melhores incertezas.

Este projeto, quando concluído, irá melhorar a repetitividade das medidas de tensão AC, reduzirá a incerteza de medição e, conseqüentemente, aumentará a confiabilidade metrológica dos serviços de calibração relacionados, uma vez que não haverá mais a necessidade de manter os padrões de tensão AC rastreados a Institutos Nacionais de Metrologia (INMs) de outros países através dos certificados de calibração, mas sim através da participação do Latce em comparações-chave em igualdade de condições dos demais INMs.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer Dr. Hector Laiz (INTI) e ao Dr. Manfred Klonz (PTB) pelas suas colaborações e apoio na implementação do padrão primário AC-DC no Inmetro, compartilhando conosco os seus conhecimentos.

REFERÊNCIAS

- [1] B. D. Inglis, "Standards for AC-DC Transfer", Metrologia, vol. 29, number 2, pp. 191-199, (1992).
- [2] M. Klonz, "Current Developments in Accurate AC-DC Transfer Measurements", IEEE Trans. Instr. Meas. vol. 44, pp. 363-366, (1995).
- [3] J. Wilkins, "Theoretical analysis of ac/dc transfer difference of NPL multijunction thermal converters over the frequency range of 100 kHz", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-21, No. 4, pp. 334-340, (1972).
- [4] M. Klonz, "AC-DC transfer difference in PTB multijunction thermal converters in the frequency range of 10 Hz to 100 kHz", IEEE Trans. Instr. Meas., vol. IM-36, No. 2, pp. 320-329, (1987).
- [5] N. Oldham, M. Parker, A. Young and A. Smith, "A high-accuracy 10 Hz to 1 MHz automatic voltage calibration system", IEEE Trans. Instrument Meas., vol. IM-36, No. 4, pp. 883-887, (1987).
- [6] M. Klonz, H. Laiz, T. Spiegel, P. Bittel, "AC-DC Current Transfer Step-Up Calibration and Uncertainty Calculation", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 51, pp. 1027-1034, (2002).
- [7] M. Klonz, H. Laiz, E. Kessler, "Development of Thin-Film

- Multijunction Thermal Converters at PTB/IPHT", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, pp. 1490-1498, (2001).
- [8] M. Klonz, H. Laiz, "New ac-dc transfer step-up calibration and uncertainty calculation in PTB and INTI", Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000 Conference on 14-19 May 2000 pp. 490-491, (2000).
- [9] T. Funck, M. Kampik, E. Kessler, M. Klonz, H. Laiz, R. Lapuh, "Determination of the AC-DC Voltage Transfer Difference of High Voltage Transfer Standards at Low Frequencies", Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2004 Conference on June 2004 pp.581-582, (2004).
- [10] L. Di Lillo, V. Grünhut, F. Kornblit, and H. Laiz, "Optimization of an AC-DC Transfer Step-Up Scheme", IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. 56, no. 2, pp. 316-320, (2007).