

# SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE FONTES E MEDIDORES DE TENSÃO E CORRENTE CONTÍNUA DE ALTA EXATIDÃO

Regis P. Landim<sup>1</sup>, Rodrigo Ventura<sup>2</sup>, Vanderson M. Teixeira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, rplandim@inmetro.gov.br

<sup>2</sup> Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, rvventura@inmetro.gov.br

<sup>3</sup> Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, vmteixeira@inmetro.gov.br

**Resumo:** Neste artigo, o Sistema de Calibração de Fontes e Medidores de Tensão e Corrente DC do Inmetro é descrito, bem como as configurações utilizadas, os métodos de calibração, os respectivos modelos matemáticos e planilhas de incerteza.

**Palavras-chave:** calibração, fonte, medidor, tensão, corrente, DC.

## 1. INTRODUÇÃO

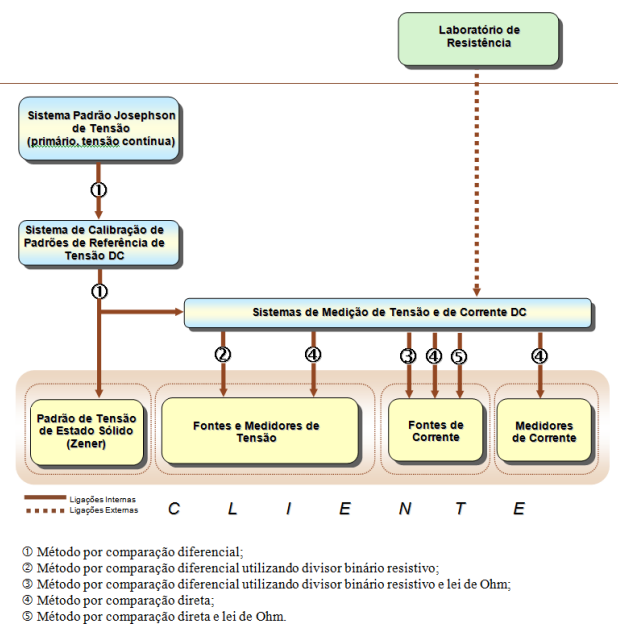
O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) é o instituto responsável pela manutenção, realização e disseminação das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI), bem como pela guarda, preservação e rastreabilidade dos padrões nacionais das grandezas relacionadas, no Brasil. No que se refere às grandezas elétricas, estas tarefas são responsabilidade da Divisão de Metrologia Elétrica (Diele, que faz parte da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial), através do Laboratório de Tensão e Corrente Elétrica (Latce), do Laboratório de Resistência (Lares) e do Laboratório de Capacitância e Indutância (Lacin), de acordo com a nova estrutura da Diele. Nesta nova estrutura, o Latce passará a se chamar “Laboratório de Calibração em Metrologia Elétrica-Lacme”, o Lares se chamará “Laboratório de Metrologia Elétrica Quântica-Lameq” e o Lacin se chamará “Laboratório de Metrologia em Padronização Elétrica-Lampe”. Mais detalhes sobre a nova estrutura da Diele podem ser vistos em [1].

Embora exista um grande número de laboratórios pertencentes à Rede Brasileira de Calibração (RBC), que prestam serviços de calibração para indústrias, laboratórios etc., seus instrumentos e padrões precisam ser calibrados no Inmetro, para garantir a sua rastreabilidade às unidades do SI. Além disso, o Latce também calibra os instrumentos (dentro da sua área de atuação) dos demais laboratórios do Inmetro. Assim, todos os anos, o Latce calibra mais de 150 instrumentos de alta exatidão, em tensão contínua, tensão alternada, corrente contínua e corrente alternada, sendo esse número impossível de atingir com base em calibrações manuais. Com o crescente aumento de demanda pelos serviços de calibração, já na década de 90 o Latce começou a automação de seus sistemas de calibração.

Um dos primeiros passos nesta direção foi dado quando o Latce implantou um novo sistema automatizado (Sistema

Potenciométrico de Medição de Tensão e de Corrente DC), para calibração de fontes e medidores de tensão DC, no final da década de 90. Este sistema é composto por um potenciômetro comercial e um extensor, capaz de medir a tensão DC, variando de 10 mV a 1 kV e alcançando um nível de precisão de aproximadamente  $\pm 1 \mu\text{V/V}$  [2,3]. Esse sistema trouxe um grande avanço para o Latce naquela época, permitindo-lhe atender de forma satisfatória as solicitações crescentes dos serviços de calibração.

O Sistema Potenciométrico, juntamente com o Sistema de Calibração de Fontes e de Medidores de Tensão e Corrente DC (ou sistema de calibração FMTCdc, foco deste trabalho), compõem os Sistemas de Medição de Tensão e de Corrente DC do Inmetro, através dos quais o Latce garante rastreabilidade ao SI em tensão e corrente DC (figura 1).



**Fig. 1. Cadeia de Rastreabilidade de Tensão e Corrente DC – Inmetro**

O diagrama de rastreabilidade da figura 1 ainda está de acordo com a estrutura antiga da Diele. Na nova estrutura (assumida pela Diele recentemente), o Sistema Josephson (bem como o Sistema de Calibração de Padrões de Referência de Tensão DC e o serviço de calibração de padrões de tensão de estado sólido) estão no Lares (Lameq) [1,4].

Nas próximas seções, o sistema de calibração FMTCdc, bem como os métodos e as respectivas planilha de incertezas serão descritos detalhadamente.

## 2. O SISTEMA CALIBRAÇÃO DE FONTES E DE MEDIDORES DE TENSÃO E CORRENTE DC DO INMETRO

O Inmetro possui mais de um sistema FMTCdc, para atender a demanda de serviços de calibração. Um sistema de calibração FMTCdc é composto por um multímetro digital padrão de 8 ½ dígitos (DMM), resistores padrão (RP), uma fonte padrão de tensão e corrente DC de alta exatidão (FTE), um amplificador de transcondutância padrão (ATC), um amplificador de corrente padrão (AC), um computador (PC) e um programa desenvolvido no laboratório para o controle automatizado do sistema (execução de medições, geração de arquivos de dados de medição, geração de planilha de incertezas e certificado de calibração etc.). Este sistema possui seis configurações, a depender do instrumento a ser calibrado (fonte ou medidor), da grandeza na qual o instrumento será calibrado (tensão DC - V DC, ou corrente DC - I DC) e qual o método utilizado (comparação direta – CD, ou comparação direta+lei de Ohm – CD/LO). A tabela 1 mostra cada uma das configurações, o tipo de instrumento a ser calibrado e em qual grandeza, o método utilizado e os equipamentos que compõem o sistema (o PC foi omitido por fazer parte de todas as configurações). Estas configurações, bem como as respectivas planilhas de incerteza (baseadas em [4]), serão abordadas nas próximas subseções.

Em todas as configurações, as fontes são ajustadas de forma que os valores nominais (do ponto de calibração) estejam presentes nos terminais do instrumento sob calibração. Assim, no caso da calibração de um medidor de tensão (por exemplo), a fonte de tensão é ajustada um pouco acima ou um pouco abaixo do valor nominal do ponto de calibração (considerando o seu erro de calibração e a linearidade do sistema) de forma que o medidor de tensão esteja recebendo o valor nominal do ponto de calibração. Os respectivos modelos matemáticos levam este fato em consideração.

Tabela 1. Configurações disponíveis do sistema de calibração FMTCdc do Inmetro.

Config.	Instrum. a ser Calibr.	Grandeza	Método	Equipamentos
1	Fonte	V DC	CD	DMM
2	Fonte	I DC	CD/LO	DMM, RP
3	Medidor	V DC	CD	FTE
4	Medidor	I DC	CD	FTE
5	Medidor	I DC	CD	FTE, AC
6	Medidor	I DC	CD	FTE, ATC

### 2.1. Configuração 1

Esta configuração é utilizada para calibrar fontes de tensão DC de 10 mV até 1 kV, utilizando o método da comparação direta (tabela 1, figura 2), onde a tensão gerada pela fonte é medida diretamente pelo multímetro digital padrão.

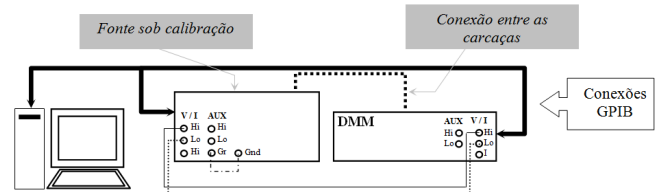


Fig. 2. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 1

O modelo matemático do circuito da figura 2 é dado por:

$$V_Y = (V - V_{offset}) \cdot (\Delta_P + 1) + \delta V_P + \delta V_C \quad (1)$$

onde:  $V_Y$  é o valor da tensão submetida à medição (em V);  $V$  é a leitura realizada pelo multímetro padrão (em V);  $V_{offset}$  é a leitura da tensão de offset do multímetro padrão (em V);  $\Delta_P$  é o erro relativo do multímetro padrão (em V/V);  $\delta V_P$  é a correção devido à resolução do multímetro padrão (em V);  $\delta V_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em V).

A equação 1 mostra que a grandeza a ser medida ( $V_Y$ ) depende de  $V$ ,  $V_{offset}$ ,  $\Delta_P$ ,  $\delta V_P$  e  $\delta V_C$ , que devem ser estimadas. As suas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(V)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(V_{offset})$ , dada pelo desvio padrão da média do offset (tipo A);  $u(\Delta_P)$ , dada pela incerteza de calibração multímetro padrão (tipo B);  $u(\delta V_P)$ , dada pela metade da resolução do multímetro padrão (tipo B); e  $u(\delta V_C)$ , devido a cabos e conectores (tipo B).

A tabela 2 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 1, no ponto de 150 mV, faixa de 220 mV, para o qual a incerteza padrão é de 2,3  $\mu V/V$  e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de 4,7  $\mu V/V$ .  $n_1$  é o número de leituras para a medição da tensão da fonte sob calibração e  $n_2$  é o número de leituras para a medição da tensão de offset, ambas pelo multímetro padrão.

Tabela 2. Incerteza de calibração de fontes de tensão DC usando o sistema FMTCdc na configuração 1, no ponto de 150 mV, faixa de 220 mV

Grand $X_i$	Estim $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [V]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $\nu_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [V]
V	0,1499 7284	2,7x10 <sup>-9</sup>	Normal	$(\Delta_P + 1)$	$n_1 - 1$	1,5x10 <sup>-9</sup>
$V_{offset}$	-7,3 x10 <sup>-7</sup>	2,1x10 <sup>-8</sup>	Normal	$-(\Delta_P + 1)$	$n_2 - 1$	5,4x10 <sup>-9</sup>
$\Delta_P$	-9,8 x10 <sup>-7</sup>	4x10 <sup>-6</sup>	Normal	$(\frac{V - V_{offset}}{V})$	$\infty$	3,0x10 <sup>-7</sup>
$\delta V_P$	0	1x10 <sup>-7</sup>	Retang.	1	$\infty$	5,8x10 <sup>-8</sup>
$\delta V_C$	0	3x10 <sup>-7</sup>	Retang.	1	$\infty$	1,7x10 <sup>-7</sup>
$V_Y$	0,1499 7342				$\infty$	3,5x10 <sup>-7</sup>

### 2.2. Configuração 2

Esta configuração é utilizada para calibrar fontes de corrente DC de 10  $\mu A$  até 100 A, utilizando o método da comparação direta + lei de Ohm (tabela 1, figura 3). Neste caso, a queda de tensão em um resistor padrão (ocasionado pela passagem da corrente no circuito) é medida diretamente

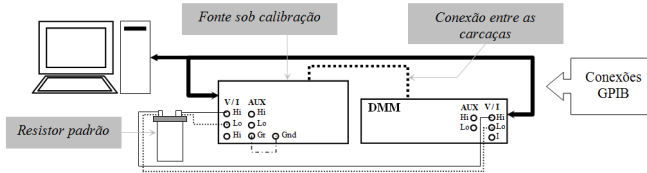


Fig. 3. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 2

pelo multímetro digital padrão e a corrente é calculada a partir dos valores de tensão e do resistor padrão.

O modelo matemático do circuito da figura 3 é dado por:

$$I_Y = \frac{(V - V_{offset}) \cdot (\Delta_P + 1) + \delta V_P}{R + \delta R_T + \delta R_D} + \delta I_C \quad (2)$$

onde:  $I_Y$  é o valor da corrente submetida à medição (em A);  $V$  é a leitura realizada pelo multímetro padrão (em V);  $V_{offset}$  é a leitura da tensão de offset do multímetro padrão (em V);  $\Delta_P$  é o erro relativo do multímetro padrão (em V/V);  $\delta V_P$  é a correção devido à resolução do multímetro padrão (em V);  $R$  é o valor convencional do resistor padrão (em  $\Omega$ );  $\delta R_T$  é a correção devido à variação do resistor padrão em função da temperatura (em  $\Omega$ );  $\delta R_D$  é a correção devido à deriva do resistor padrão em função do tempo (em  $\Omega$ );  $\delta I_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em A).

Tabela 3. Incerteza de calibração de fontes de tensão DC usando o sistema FMTCdc na configuração 2, no ponto de 10  $\mu$ A, faixa de 220  $\mu$ A

Grand $X_i$	Contr $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [A]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $\nu_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [A]
$V$	$9,999981 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-8}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial V}$	$n_3 - 1$	$1,45 \times 10^{-11}$
$V_{offset}$	$-5,9 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-8}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial V_{offset}}$	$n_4 - 1$	$1,16 \times 10^{-11}$
$\Delta_P$	$-2,2 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial \Delta_P}$	$\infty$	$1,10 \times 10^{-10}$
$\delta V_P$	0	$1 \times 10^{-8}$	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial \delta V_P}$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-12}$
$R$	$1000,00$ 632	$8,1 \times 10^{-4}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial R}$	$\infty$	$4,05 \times 10^{-12}$
$\delta R_T$	0	$3 \times 10^{-3}$	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial \delta R_T}$	$\infty$	$1,73 \times 10^{-11}$
$\delta R_D$	0	$2 \times 10^{-3}$	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial \delta R_D}$	$\infty$	$1,15 \times 10^{-11}$
$\delta I_C$	0	$5 \times 10^{-11}$	Retang.	1	$\infty$	$2,89 \times 10^{-11}$
$I_Y$	$9,999976 \times 10^{-6}$				$\infty$	$1,2 \times 10^{-10}$

A equação 2 mostra que a grandeza a ser medida ( $I_Y$ ) depende de  $V$ ,  $V_{offset}$ ,  $\Delta_P$ ,  $\delta V_P$ ,  $R$ ,  $\delta R_T$ ,  $\delta R_D$  e  $\delta I_C$ , que devem ser estimadas. As suas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(V)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(V_{offset})$ , dada pelo desvio padrão da média do offset (tipo A);  $u(\Delta_P)$ , dada pela incerteza de calibração do multímetro padrão (tipo B);  $u(\delta V_P)$ , dada pela metade da resolução do multímetro padrão (tipo B);  $u(R)$ ,

dada pela incerteza de calibração do resistor padrão;  $u(\delta R_T)$  e  $u(\delta R_D)$ , dadas pela especificação do resistor padrão (tipo B); e  $u(\delta V_C)$ , devido a cabos e conectores, (tipo B).

A tabela 3 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 2, no ponto de 10  $\mu$ A, faixa de 220  $\mu$ A, para o qual a incerteza padrão é de 12  $\mu$ A/A e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de 24  $\mu$ A/A.  $n_3$  é o número de leituras para a medição da tensão no resistor padrão e  $n_4$  é o número de leituras para a medição da tensão de offset, ambas pelo multímetro padrão.

### 2.3. Configuração 3

Esta configuração é utilizada para calibrar medidores de tensão DC de 10 mV até 1 kV, utilizando o método da comparação direta (tabela 1, figura 4). Neste caso, a tensão gerada pela fonte padrão é medida diretamente pelo instrumento sob calibração.

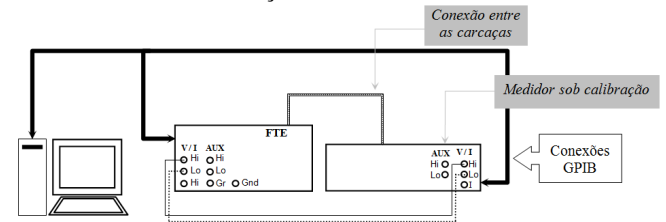


Fig. 4. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 3

O modelo matemático do circuito da figura 4 é dado por:

$$V_Y = ((V - V_{offset}) + \delta V_O) \cdot (\Delta_P + 1) + \delta V_P + \delta V_C \quad (3)$$

onde:  $V_Y$  é o valor da tensão submetida à medição (em V);  $V$  é a leitura realizada pelo medidor sob calibração;  $V_{offset}$  é a leitura da tensão de offset do medidor sob calibração (em V);  $\delta V_O$  é a correção devido à resolução do medidor sob calibração (em V);  $\Delta_P$  é o erro relativo da fonte padrão (em V/V);  $\delta V_P$  é a correção devido à resolução da fonte padrão (em V);  $\delta V_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em V).

A equação 3 mostra que a grandeza a ser medida ( $V_Y$ ) depende de  $V$ ,  $V_{offset}$ ,  $\delta V_O$ ,  $\Delta_P$ ,  $\delta V_P$ , e  $\delta V_C$ , cujas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(V)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(V_{offset})$ , dada pelo desvio padrão da média do offset (tipo A);  $u(\delta V_O)$  dada pela metade da resolução do medidor sob calibração (tipo B);  $u(\Delta_P)$ , dada pela incerteza de calibração da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta V_P)$ , dada pela metade da resolução da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta V_C)$ , devido a cabos e conectores (tipo B).

A tabela 4 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 3, no ponto de 2 mV, faixa de 100 mV, para o qual a incerteza padrão é de 55  $\mu$ V/V e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de 110  $\mu$ V/V.  $n_5$  é o número de leituras para a medição da tensão da fonte padrão e  $n_6$  é o número de leituras para a medição da tensão de offset, ambas pelo medidor sob calibração.

Tabela 4. Incerteza de calibração de fontes de tensão DC usando o sistema FMTCdc na configuração 3, no ponto de 2 mV, faixa de 100 mV

Grand $X_i$	Contr $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [V]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $\nu_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [V]
V	$1,999354 \times 10^{-3}$	$1,78 \times 10^{-8}$	Normal	$(\Delta_P + 1)$	$n_5 - 1$	$1,03 \times 10^{-8}$
$V_{offset}$	$-6,61 \times 10^{-7}$	$3,30 \times 10^{-8}$	Normal	$(\Delta_P + 1)$	$n_6 - 1$	$8,52 \times 10^{-9}$
$\delta V_O$	0	$1 \times 10^{-8}$	Retang.	$(\Delta_P + 1)$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-9}$
$\Delta_P$	$-1,95 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-4}$	Normal	$(\overline{V - V_{offset}})$	$\infty$	$1,04 \times 10^{-7}$
$\delta V_P$	0	$1 \times 10^{-8}$	Retang.	1	$\infty$	$2,89 \times 10^{-9}$
$\delta V_C$	0	$4 \times 10^{-9}$	Retang.	1	$\infty$	$2,31 \times 10^{-9}$
$V_Y$	$1,99998 \times 10^{-3}$				$\infty$	$1,1 \times 10^{-7}$

#### 2.4. Configuração 4

Esta configuração é utilizada para calibrar medidores de corrente DC de 10  $\mu$ A até 2,2 A, utilizando o método da comparação direta (tabela 1, figura 5). Aqui, a corrente gerada pela fonte padrão é medida diretamente pelo instrumento sob calibração.

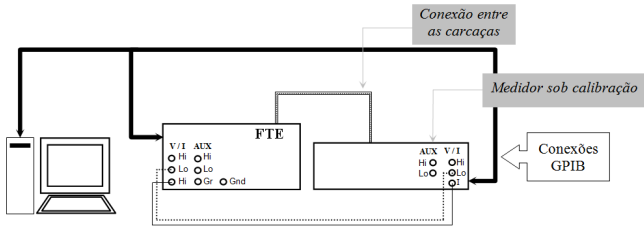


Fig. 5. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 4

O modelo matemático do circuito da figura 5 é dado por:

$$I_Y = (I + \delta I_O) \cdot (\Delta_P + 1) + \delta I_P + \delta I_C \quad (4)$$

onde:  $I_Y$  é o valor da corrente submetida à medição (em A);  $I$  é a leitura realizada no medidor sob calibração (em A);  $\delta I_O$  é a correção devido à resolução do medidor sob calibração (em A);  $\Delta_P$  é o erro relativo da fonte padrão (em A/A);  $\delta I_P$  é a correção devido à resolução da fonte padrão (em A);  $\delta I_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em A).

A equação 4 mostra que a grandeza a ser medida ( $I_Y$ ) depende de  $I$ ,  $\delta I_O$ ,  $\Delta_P$ ,  $\delta I_P$  e  $\delta I_C$ , cujas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(I)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(\delta I_O)$ , dada pela metade da resolução do medidor sob calibração (tipo B);  $u(\Delta_P)$ , dada pela incerteza de calibração da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta I_P)$ , dada pela metade da resolução da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta I_C)$ , devido a cabos e conectores (tipo B).

A tabela 5 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 4, no ponto de 100  $\mu$ A, faixa de 100  $\mu$ A, para o qual a incerteza padrão é de 5  $\mu$ A/A e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de 10  $\mu$ A/A.  $n_7$  é o número de leituras para a medição da corrente da fonte padrão pelo medidor sob calibração.

Tabela 5. Incerteza de calibração de medidores de corrente DC usando o sistema FMTCdc na configuração 4, no ponto de 100  $\mu$ A, faixa de 100  $\mu$ A

Grand $X_i$	Contr $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [A]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $\nu_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [A]
I	$9,99984 \times 10^{-5}$	$2,42 \times 10^{-11}$	Normal	$(\Delta_P + 1)$	$n_7 - 1$	$1,40 \times 10^{-11}$
$\delta I_O$	0	$1 \times 10^{-11}$	Retang.	$(\Delta_P + 1)$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-12}$
$\Delta_P$	$-2,91 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$	Normal	$i - \delta I_0$	$\infty$	$4 \times 10^{-10}$
$\delta I_P$	0	$1 \times 10^{-10}$	Retang.	1	$\infty$	$2,89 \times 10^{-11}$
$\delta I_C$	0	$5 \times 10^{-10}$	Retang.	1	$\infty$	$2,89 \times 10^{-10}$
$I_Y$	$9,999814 \times 10^{-5}$				$\infty$	$4,9 \times 10^{-10}$

#### 2.5. Configuração 5

Esta configuração é utilizada para calibrar medidores de corrente DC de 3 A até 11 A, utilizando o método da comparação direta (tabela 1, figura 6). Neste caso, a corrente gerada pela fonte padrão é amplificada pelo amplificador de corrente padrão, e medida diretamente pelo instrumento sob calibração.

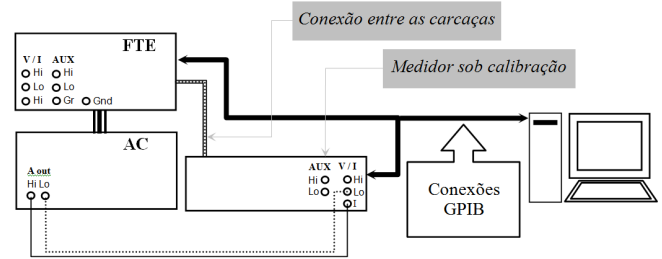


Fig. 6. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 6

O modelo matemático do circuito da figura 6 é dado por:

$$I_Y = (I + \delta I_O) \cdot (\Delta_P + 1) + \delta I_P + \delta I_C \quad (5)$$

onde:  $I_Y$  é o valor da corrente submetida à medição (em A);  $I$  é a leitura realizada no medidor sob calibração (em A);  $\delta I_O$  é a correção devido à resolução do medidor sob calibração (em A);  $\Delta_P$  é o erro relativo do Amplificador de Corrente padrão (em A/A);  $\delta I_P$  é a correção devido à resolução da fonte padrão (em A);  $\delta I_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em A).

A equação 5 mostra que a grandeza a ser medida ( $I_Y$ ) depende de  $I$ ,  $\delta I_O$ ,  $\Delta_P$ ,  $\delta I_P$  e  $\delta I_C$ , cujas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(I)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(\delta I_O)$ , dada pela metade da resolução do medidor sob calibração (tipo B);  $u(\Delta_P)$  dada pela incerteza de calibração da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta I_P)$ , dada pela metade da resolução da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta I_C)$ , devido a cabos e conectores (tipo B).

A tabela 6 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 5, no ponto de 5 A, faixa de 20 A, para o qual a incerteza padrão é de 8,6  $\mu$ A/A e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de 17  $\mu$ A/A.  $n_7$  é o número de leituras para a medição da corrente da fonte padrão pelo medidor sob calibração.

Tabela 6. Incerteza de calibração de fontes de tensão DC usando o sistema FMTCdc na configuração 5, no ponto de 5 A, faixa de 20 A

Grand $X_i$	Contr $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [A]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $v_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [A]
$I$	4,9994 55	$5,57 \times 10^{-6}$	Normal	$(\Delta_P + 1)$	$n_7 - 1$	$3,21 \times 10^{-6}$
$\delta I_O$	0	$1,00 \times 10^{-6}$	Retang.	$(\Delta_P + 1)$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-7}$
$\Delta_P$	$6,21 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-5}$	Normal	1	$\infty$	$4,00 \times 10^{-5}$
$\delta I_P$	0	$1,00 \times 10^{-5}$	Retang.	1	$\infty$	$2,89 \times 10^{-6}$
$\delta I_C$	0	$2,50 \times 10^{-5}$	Retang.	1	$\infty$	$1,44 \times 10^{-5}$
$I_Y$	4,9997 65				$\infty$	$4,3 \times 10^{-5}$

## 2.6. Configuração 6

Esta configuração é utilizada para calibrar medidores de corrente DC de 1 A até 20 A, utilizando o método da comparação direta (tabela 1, figura 7). Aqui, a tensão gerada pela fonte padrão é convertida em corrente (pelo amplificador de transcondutância padrão), que é medida diretamente pelo instrumento sob calibração.

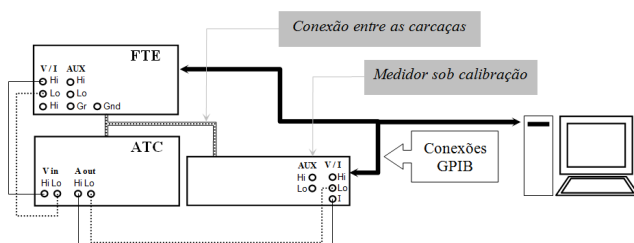


Fig. 7. Circuito de calibração utilizando o FMTCdc na configuração 6

O modelo matemático do circuito da figura 7 é dado por:

$$I_Y = (I + \delta I_O) \cdot \frac{I_N}{(V_P + \delta V_P) \cdot r_{I/V}} + \delta I_C \quad (6)$$

onde:  $I_Y$  é o valor da corrente submetida à medição (em A);  $I$  é a leitura realizada no medidor sob calibração (em A);  $\delta I_O$  é a correção devido à resolução do medidor sob calibração (em A);  $I_N$  é o valor nominal da corrente aplicada pelo amplificador de transcondutância padrão (em A);  $V_P$  é o valor de tensão aplicado pela fonte padrão (em V);  $\delta V_P$  é a correção devido à resolução da fonte padrão (em V);  $r_{I/V}$  é a relação de corrente por tensão definida pelo certificado de calibração do amplificador de transcondutância padrão (em A/V);  $\delta I_C$  é a correção devido a cabos e conectores (em A).

A equação 5 mostra que a grandeza a ser medida ( $I_Y$ ) depende de  $I$ ,  $\delta I_O$ ,  $I_N$ ,  $V_P$ ,  $\delta V_P$ ,  $r_{I/V}$  e  $\delta I_C$ , cujas estimativas têm, respectivamente, as seguintes incertezas:  $u(I)$ , dada pelo desvio padrão da média das leituras (tipo A);  $u(\delta I_O)$ , dada pela metade da resolução do medidor sob calibração (tipo B);  $u(V_P)$ , dada pela incerteza de calibração da fonte padrão (tipo B);  $u(\delta I_P)$ , dada pela resolução da fonte padrão (tipo B);  $u(r_{I/V})$ , dada pela incerteza de calibração do amplificador de transcondutância padrão (tipo B);  $u(\delta I_C)$ , devido a cabos e conectores (tipo B).  $I_N$ , por se tratar do valor nominal do ponto de calibração, é conhecida e sua incerteza é considerada nula.

Tabela 7. Incerteza de calibração de fontes de tensão DC usando o sistema FMTCdc na configuração 6, no ponto de 15 A, faixa de 20 A

Grand $X_i$	Contr $x_i$	Incert. Padrão $u(x_i)$ [A]	Distrib Probab	Coef. Sensib $c_i$	Grau Lib $v_i$	Contr. Inc.- $u_i(y)$ [A]
$I$	14,9977 682	$2,14 \times 10^{-4}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial I}$	$n_7 - 1$	$9,55 \times 10^{-5}$
$\delta I_O$	0	$1,00 \times 10^{-6}$	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial \delta I_O}$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-7}$
$I_N$	15,0000 00	0	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial I_N}$	$\infty$	0
$V_P$	15,0000 00	$3,00 \times 10^{-5}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial V_P}$	$\infty$	$1,50 \times 10^{-5}$
$r_{I/V}$	1,00005 9333	$1,00 \times 10^{-6}$	Normal	$\frac{\partial I_Y}{\partial r_{I/V}}$	$\infty$	$2,89 \times 10^{-7}$
$\delta V_P$	0	$1,47 \times 10^{-5}$	Retang.	$\frac{\partial I_Y}{\partial \delta V_P}$	$\infty$	$1,10 \times 10^{-4}$
$\delta I_C$	0	$7,50 \times 10^{-5}$	Retang.	1	$\infty$	$4,33 \times 10^{-5}$
$I_Y$	14,9968 8				26	$1,5 \times 10^{-4}$

A tabela 7 mostra a planilha de incertezas do FMTCdc na configuração 6, no ponto de 15 A, faixa de 20 A, para o qual a incerteza padrão é de  $10 \mu A/A$  e a incerteza expandida ( $k=2$ ) é de  $20 \mu A/A$ .  $n_7$  é o número de leituras para a medição da corrente da fonte padrão pelo medidor sob calibração.

## 3. CONTROLE DE QUALIDADE DOS RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO COM O FMTCdc

Para controlar a qualidade dos resultados obtidos em cada calibração, o Latce, utilizando-se da facilidade dos processos automatizados e banco de dados, desenvolveu uma planilha eletrônica automatizada que compara, através de métodos gráficos, os resultados obtidos com resultados anteriores de um mesmo instrumento (fig. 8). Dessa forma, o técnico responsável pela calibração pode verificar de maneira mais rápida se os resultados estão de acordo com o comportamento apresentado em calibrações anteriores e com as especificações definidas pelo fabricante. Além disso, os resultados de cada calibração são conferidos por, pelo menos, dois outros técnicos do Latce.

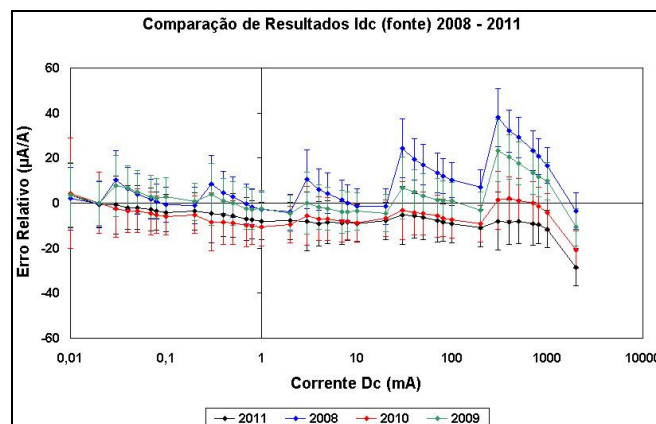


Fig. 8. Ferramenta Gráfica para comparação de resultados de calibração

Os técnicos habilitados para os serviços de calibração são periodicamente avaliados, através da realização de comparações intralaboratoriais no Latce, onde um mesmo sistema é utilizado para calibração do mesmo instrumento, por dois técnicos diferentes. Os resultados destas comparações são utilizados para o cálculo do erro normalizado, que deve ser inferior a 1 em situações normais. Caso contrário, são tomadas ações corretivas.

Os sistemas de calibração do Latce são continuamente reavaliados pelo pessoal do laboratório, em busca de melhorias nos resultados de calibração. Também são feitos estudos e reavaliações das planilhas de incerteza, quando pertinente. Estas melhorias são cheçadas através de comparações intralaboratoriais no Latce (entre dois sistemas FMTCdc ou entre um sistema FMTCdc e o sistema potenciométrico) e através de comparações interlaboratoriais internacionais, das quais o Latce participa. Nas duas últimas [5,6], foi utilizado um dos sistemas de calibração FMTCdc do Latce, de modo a verificar como o mesmo está, com relação aos equivalentes dos outros INMs.

Quando há redução de incertezas nos serviços de calibração, tais comparações servem para comprovar internacionalmente não só o adequado funcionamento dos sistemas de calibração, como também os níveis de incerteza oferecidos.

Entretanto, as comparações laboratoriais são apenas uma parte de todo o processo de controle de qualidade dos resultados de calibração. O Inmetro passa regularmente por dois tipos de auditorias: auditoria interna e avaliação externa local (“on-site peer-review” ou avaliação por peritos de outros INMs). A auditoria interna ocorre duas vezes ao ano, sendo uma vez para os requisitos da direção e a outra vez para os requisitos técnicos da NBR ISO/IEC 17025. Ambos os tipos de auditorias abordam atividades de calibração e são conduzidas de acordo com procedimentos corporativos do Inmetro, ao nível da documentação do Sistema da Qualidade. A avaliação externa local deve ocorrer pelo menos uma vez a cada cinco anos e é usado, principalmente, para mostrar à Força de Trabalho do Sistema da Qualidade (QSTF) do Sistema Interamericano de Metrologia (SIM), o cumprimento dos requisitos aplicáveis da norma NBR ISO/IEC 17025 e do Guia ISO 34, a fim de cumprir os requisitos do Acordo de Reconhecimento Mútuo do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM MRA) [7]. A última avaliação externa ocorreu em 2009 [8].

Com isto tudo, o Inmetro pode evidenciar o oferecimento de serviços de calibração com incertezas compatíveis aos oferecidos pelos Institutos Nacionais de Metrologia (INMs) mais avançados. O Inmetro, através do Latce e do Lares, participa anualmente do Programa de Comparação Interlaboratorial nas grandezas Tensão Alternada, Tensão Contínua, Corrente Alternada, Corrente Contínua, Resistência e Frequência, como laboratório de referência na sua área de atuação [9], da qual participam laboratórios da RBC. Assim, a melhoria da qualidade dos serviços de calibração oferecidos pelo Latce reflete diretamente na melhoria da qualidade dos serviços de calibração oferecidos à sociedade brasileira.

#### 4. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu o Sistema de Calibração de Fontes e Medidores de Tensão e Corrente DC do Inmetro. As configurações utilizadas, os métodos de calibração, os respectivos modelos matemáticos e planilhas de incerteza também foram descritos. Os métodos utilizados e os resultados apresentados mostram que os serviços de calibração de fontes e medidores de tensão e corrente DC oferecidos pelo Inmetro estão compatíveis com os oferecidos pelos INMs mais avançados do mundo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] E. Afonso, J. R. B. da Silva, M. de F. de B. Cyrillo, M. Lira, “Uma Nova Estrutura para a Divisão de Metrologia Elétrica do Inmetro”, aceito para publicação no XVIII IMEKO TC4 Symposium e no IX Semetro, 2011.
- [2] E. Afonso, E. Tóth, G. Borghi, V. Ferreira, R. A. Junior, A. O. B. Neto; “An Automated System for the Calibration of High Accuracy Multifunction Instruments”, anais do 11<sup>th</sup> Symposium on Trends in Electrical Measurements and Instrumentation, Portugal, Setembro 2001.
- [3] R. Ventura, V. M. Teixeira, V. Ferreira, R. P. Landim, “Melhoria no Sistema Potenciométrico de Medição de Tensão e de Corrente dc”, aceito para publicação no XVIII IMEKO TC4 Symposium e no IX Semetro, 2011.
- [4] R. P. Landim, M. A. Camarena, V. Ferreira, E. Afonso, “Implantação de um Sistema Josephson de Tensão Programável no Inmetro”, aceito para publicação no XVIII IMEKO TC4 Symposium e no IX Semetro, 2011.
- [5] Uncertainty of Measurement—Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995), ISO/IEC Guide 98-3:2008.
- [6] H. Sánchez, J. Cioffi, H. Laiz, D. Bennet, H. Ferreira, R. Ortega, N. Oldham, M. Parker, “SIM Comparison of Electrical Units”, CD proc. of Metrologia 2000, 4-7 dezembro 2000.
- [7] Comparison of DC and low-frequency electrical quantities (voltage, current and resistance) SIM.EM-S5. [http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB\\_ApB\\_info.asp?cmp\\_idy=644&cmp\\_cod=SIM.EM-S5&prov=exalead](http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB_ApB_info.asp?cmp_idy=644&cmp_cod=SIM.EM-S5&prov=exalead)
- [8] S. F. Dos Santos, S. Bruce, “Comparative Analysis on the Implementation of Established Criteria for ISO/IEC 17025 between two National Metrology Institutes”, NCSLI 2009. CD-ROM.
- [9] S. F. Dos Santos, “The implementation of the CIPM MRA and quality management system based on peer review processes: the case of Brazilian National Metrology Institute”, NCSLI 2009. CD-ROM.
- [10] “Relatório do Programa de Comparação Interlaboratorial de Eletricidade - Circulação 2010”, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 53 pp., 2010.