ESTUDO DA ESTIMATIVA DA CONTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA NA CALIBRAÇÃO DE RESISTORES PADRÃO UTILIZANDO O MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POTENCIOMÉTRICO NA FAIXA DE 100 KΩ A 1 GΩ COM FONTE ALIMENTAÇÃO DE 10 VCC

Márcio Cândido da Silva

Mestre em Metrologia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Pesquisador-Tecnologista e Metrologia e Qualidade – INMETRO – Xerém, RJ, Brasil
marciocds@gmail.com

RESUMO

O presente artigo aborda o uso de metodologias disponíveis em um equipamento comercial para calibrar resistores padrão na faixa de 100 kΩ a 1 GΩ com tensão de calibração de 10V. Essas medições são realizadas através de uma ponte automática de altos valores de resistência para buscar metodologias capazes de estimar a contribuição da incerteza de medição devido a corrente de fuga em calibração de resistores padrão. A calibração de resistores padrão pode ser afetada por diversas grandezas tais como: temperatura, umidade, tensão aplicada, *short term drift* e corrente de fuga devido a isolação dos terminais e cabos de ligação dos resistores. Durante as calibrações de resistores de alto valor de resistência utilizando o método potenciométrico, a maioria das grandezas de influência são controladas, excetuando-se a corrente de fuga que depende do material utilizado na fabricação do resistor e cabos de ligação.

Palavras-chave: Metrologia elétrica. Corrente de fuga. Método potenciométrico. Resistor de alto valor.

STUDY OF THE ESTIMATE OF LEAKAGE CURRENT CONTRIBUTION IN THE CALIBRATION OF STANDARD RESISTORS USING THE POTENTIAL METRIC CALIBRATION METHOD IN THE 100 KΩ TO 1 GΩ RANGE WITH 10 VDC POWER SUPPLY

ABSTRACT

This article discusses the use of methodologies available in commercial equipment to calibrate standard resistors in the range of 100 kΩ to 1 GΩ, with a calibration voltage of 10V. These measurements are performed through an automatic bridge of high resistance values to seek methodologies capable of estimating the contribution of measurement uncertainty due to leakage current in calibration of standard resistors. The calibration of standard resistors can be affected by several quantities such as: temperature, humidity, applied voltage, short term drift and leakage current due to the insulation of the resistor terminals and connection cables. During the calibrations of resistors of high resistance value using the potentiometric method, most of the influence quantities are controlled, except for the leakage current that depends on the material used in the manufacture of the resistor and connection cables.

Keywords: Electrical metrology. Leakage current. Potentiometric method. High value resistor.

1 INTRODUÇÃO

As medições em resistência DC no Laboratório de Metrologia em Padronização Elétrica (Lampe-Inmetro) podem ser realizadas pelos seguintes métodos: leitura direta utilizando um multímetro; por comparação utilizando o método potenciométrico ou a ponte automática de resistência comercial.

Uma ponte automática resistência pode medir a razão entre dois resistores pelo método de comparação de corrente ou através do método potenciométrico.

Os modelos de ponte 6000 da Measurement International (MIL) medem a razão entre dois resistores e atribuem um valor a resistência desconhecida baseada em um resistor padrão. As medições de razão destas pontes são realizadas a quatro terminais e podem ser feitas na razão de 0,1 a 1000. A faixa de medição dos resistores é de 1 k Ω a 1 G Ω .

A ponte utiliza uma fonte de alimentação fixa de 10V ou uma variável na faixa de 1 a 110V.

A ponte possui resolução de 8 dígitos quando utilizado um DVM de 5 ½ dígitos e pode chegar a 10 dígitos quando usada com um DVM de 8 ½ dígitos (Agilent 3458A).

A ponte realiza a medição dos resistores através do método potenciométrico utilizando o princípio do divisor binário aplicado a divisores de tensão resistivos.

Esta ponte possui um terminal de GUARD que deve ser ligado ao multímetro e resistores que necessitem desta conexão.

A calibração de resistores padrão pode ser afetada por diversas grandezas tais como:

- Temperatura;
- Resistência de isolamento dos terminais dos resistores;
- Umidade;
- Tensão aplicada;
- Resistência de isolamento dos cabos de ligação dos resistores;
- *Short Term Drift*;
- Corrente de fuga;
- *Low Frequency Resistance Noise* (LFRN) devido ao material do resistor e faixa de resistência.

O Lampe calibra resistores padrão com equipamento e ambiente em temperatura controladas na faixa de $(22,5 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$. Além disso os resistores são calibrados em banhos de ar ou óleo com temperatura controlada de $(23,00 \pm 0,01)^{\circ}\text{C}$ e $(23,000 \pm 0,006)^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

A ponte usada neste estudo é a 6000A que realiza calibrações utilizando uma fonte com estabilidade de 0,2 ppm ao longo de 8 horas. O DVM da ponte não precisa de calibrações pois realiza uma auto calibração aplicando o princípio do divisor binário aplicado a divisores de tensão

resistivos. Logo a estabilidade pode ser mantida, pois é possível realizar a auto calibração durante o período da calibração dos resistores.

Desta forma, as grandezas de maior influência na calibração de resistores no Lampe serão a tensão aplicada e a corrente de fuga devido a isolação dos cabos e resistores.

O Lampe trabalha com incertezas que vão desde $0,15 \mu\Omega/\Omega$ a $7 \mu\Omega/\Omega$.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da resistência de fuga na calibração de resistores no Lampe ao utilizar esta ponte para realizar calibrações.

2 DIAGRAMAS ESQUEMÁTICO DAS CALIBRAÇÕES DE RESISTORES NA PONTE 6000A

2.1 Método Potenciométrico

Este método é de considerável exatidão na medição de resistências e utiliza relação de tensões V_s e V_x sobre dois resistores R_s e R_x conectados em série percorridos pela mesma corrente cc, conforme a Figura 1. As tensões V_s e V_x são medidas e sua relação é multiplicada por R_s para determinar R_x , conforme a equação (1). Para se obter uma boa exatidão com este método é necessário utilizar uma fonte de corrente bem estável e um multímetro de boa exatidão. A exatidão deste método é comprometida por efeitos termoelétricos em suas conexões. Estes efeitos podem ser mitigados invertendo-se periodicamente o sentido da corrente e realizando-se as determinações de tensão nos terminais de R_x e R_s . Desta forma, consegue-se compensar o efeito das tensões parasitas. A incerteza de calibração varia em função do padrão R_s e DVM utilizados.

Figura 1 - Circuito utilizando o Método Potenciométrico

- A = Fonte de corrente
- I = Correntes através das resistências
- V_x = Tensão medida em R_x
- V_s = Tensão medida em R_s
- R_s = Resistência conhecida
- R_x = Resistência desconhecida

Fonte: (Autor,2020)

$$R_x = \frac{V_x}{V_s} \times R_s \quad (1)$$

2.2 Diagrama simplificado de ligação dos resistores na ponte 6000A

Um diagrama simplificado de ligação dos resistores na ponte 6000A é mostrado na figura 2.

Figura 2 - Diagrama simplificado de ligações dos resistores na ponte 6000A

Fonte: (Autor,2020)

O resistor R_s é o padrão e o R_x , o resistor a ser calibrado. A ponte 6000A fornece o valor da razão V_{High}/V_{Low} que corresponde a razão de R_x/R_s . Esta análise não contempla a o efeito de carga do voltímetro durante a medição das tensões V_{High} e V_{Low} .

As calibrações realizadas na ponte 6000A só podem ser realizadas aplicando-se uma tensão de 10 V, limitando a avaliação da influência da tensão aplicada durante a calibração de resistores. Desta forma, os elementos que podem influenciar na calibração de resistores na ponte 6000A, além dos já citados no item 1, são as configurações de calibração como o *Settle Time*, número de medições e método de medição na ponte (Direto, Reverso e *Interchange*).

O método Direto consiste em medir o R_x em V_{High} e o R_s em V_{Low} e no Reverso, o R_x é medido em V_{Low} e o R_s em V_{High} . No método *Interchange*, ocorrem medições intercaladas com o método Direto e Reverso. Se forem realizadas dez leituras de tensão, as leituras pares serão realizadas no método Direto e as ímpares no método Reverso.

A figura 3 mostra um diagrama elétrico simplificado conforme observações de Honig(2010)

Figura 3 - Diagrama elétrico considerando a resistência de isolamento dos cabos de ligação e a resistência de

O circuito da figura 3 pode ser simplificado. A ligação de cada resistor é feita através de 2 cabos coaxiais de 2 fios rígidos com isolamento de teflon e os cabos são entrelaçados entre si. Cada cabo coaxial é utilizado para ligar o terminal C1 e P1 ou C2 e P2, dessa forma não existe fuga de corrente entre os cabos coaxiais, podendo ser eliminadas as resistências de isolação R_{icxp} e R_{icsp} . As resistências de isolação R_{icxp2} e R_{icxc2} estão ligadas no ponto de maior potencial (10V), não tendo influência no cálculo da razão R_x/R_s , podendo ser eliminada. As resistências de isolamento dos pontos P1 e C1 em relação ao ponto terra estão em paralelo e sua resistência equivalente pode ser simplificada como um único resistor R_{ic} em paralelo com R_s , onde R_{ic} é a resistência equivalente de isolação dos cabos de ligação.

A figura 4 mostra o novo diagrama.

Figura 4 - Diagrama elétrico considerando a resistência de isolamento dos cabos de ligação e a resistência de isolamento entre o resistor e sua caixa de ligações

A partir dos diagramas das figuras 3 e 4 é feita uma avaliação do comportamento da ponte 6000A quando aos efeitos das resistências de isolamento dos cabos e da caixa de resistor.

2.3 Princípio de funcionamento da ponte 6000A

O divisor resistivo binário desenvolvido por Cutkosky(1978) consistia em um circuito divisor resistivo que tinha a possibilidade de se autocalibrar através de uma fonte de tensão estabilizada. Através dessa técnica é possível calibrar várias razões de resistência atribuindo valores de correção para cada razão utilizada podendo-se construir um divisor de tensão de até 8 bits, obtendo-se incertezas na faixa de 1 parte por 10^7 da razão para uma tensão de referência de 10V.

Tsao(1987 e 1989) realizou diversas melhorias no projeto original de Cutkosky(1978) que resultou no desenvolvimento de um sistema potenciométrico automatizado de 25 bits de alta

exatidão para calibração de tensões até 10 V. Este novo sistema permitiu realizar calibrações com incertezas de até 0,3 μV .

Através das contribuições de Tsao(1989) e Cutkosky(1978), Dunn(1991) desenvolveu um sistema potenciométrico que utilizou o princípio do divisor resistivo binário(BVD), para medição de valores de resistência até 100 M Ω . Este sistema permitiu calibrar com incertezas em resistência de alto valor até 1 $\mu\Omega/\Omega$.

A ponte automática de altos valores de resistência 6000A (Mil, 2000) foi construída com todas as contribuições de Dunn(1991), Tsao(1989) e Cutkosky(1978). A figura 5 mostra o diagrama simplificado dos resistores, terminais e DVM(Digital Voltmeter). Onde R_x apresenta a resistência a ser calibrada, R_s a resistência padrão, E a tensão da fonte e E' a tensão de *Guard* ativo.

Figura 5 - Diagrama elétrico simplificado da ponte 6000A

Fonte: (Haiming, 2010).

Após as medições das tensões V_1 , V_2 , V_3 e V_4 , a razão R_x/R_s é dada por:

$$R = \frac{R_X}{R_S} = \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} = \frac{V_1/E - V_2/E}{V_3/E - V_4/E} = \frac{r_1 - r_2}{r_3 - r_4} \quad (2)$$

No caso de valores de resistência iguais ou superiores a 100 M Ω , a resistência de fuga R_L entre os terminais V_2 , V_3 ou isolamento dos cabos e o terra irão desviar consideravelmente a corrente em R_s , aumentando a incerteza durante a calibração. A corrente de *offset* do DVM, em torno de picoamperes, que flui através da alta impedância de saída da ponte também acrescenta alguns microvolts a leitura do DVM. (Haiming, 2010)

O erro de medição causado por esta corrente de fuga pode ser reduzido utilizando o modo de medição "*Virtual Null*". Esta técnica consiste em medir duas vezes a tensão V_2 e V_3 . Com a chave S na posição 1, mede-se V_2 e V_3 , então com a chave S na posição 2 e mantendo-se todo o setup sem alteração, mede-se V_2 e V_3 novamente. A diferença entre estas leituras, com a chave

em S1 e S2, reduz os efeitos de isolamento dos cabos e resistores assim como o de corrente de *offset*.

Figura 6 - Circuito equivalente da chave S. (a) Posição S1. B) Posição S2.

Fonte: (Haiming, 2010).

2.4 Esquema de testes

Foi elaborado um esquema de ligações entre a ponte 6000A e um grupo de resistores com valores decádicos de 100 k Ω a 1 G Ω com tensão de alimentação de 10V para observar o efeito da resistência de fuga durante a calibração. Neste esquema foram testadas quatro possibilidades quanto a ligação do terra nos resistores na razão de 10:1: $R_s \times R_x$, $R_s \times R_{xT}$, $R_{sT} \times R_x$ e $R_{sT} \times R_{xT}$, aonde a letra 'T' no final do resistor significa que o fio terra foi ligado no conector terra do resistor. Na razão 1:1, foram testadas as seguintes possibilidades: $R_s \times R_x$ e $R_{sT} \times R_{xT}$. O resistores utilizados durante este estudo estão relacionados na tabela 2

Embora o fio terra não tenha sido ligado no borne do resistor, durante as avaliações realizadas na ponte 6000A, o terra sempre permaneceu ligado a malha do cabo de ligação do resistor.

Também foram testadas a alternância dos cabos de ligação aos terminais do resistor.

Tabela 1 - Relação de código e valor nominal dos resistores

Código do Resistor	Valor Nominal
10A	100 k Ω
10B	100 k Ω
11A	1 M Ω
11B	1 M Ω
12A	10 M Ω
12B	10 M Ω
13A	100 M Ω
13C	100 M Ω
14A	1 G Ω
14B	1 G Ω

Foram utilizados os 3 métodos de medição da ponte: Direto, Reverso e *Interchange*.

Destas medições, as que trouxeram dados mais significativos foram as realizadas a partir de 1 MΩ. A tabela 1 mostra os códigos dos resistores e valores utilizados. Observando que os resistores 10A, 10B, 11A e 11B são utilizados em banho de óleo mineral, não sendo utilizado o terminal de terra no resistor. De forma a simplificar a análise deste estudo, só foram coletas apenas as medições mais relevantes.

Os métodos para análise destes dados foram a Diferença entre valores Medidos e de Referência e o Erro Normalizado (En)

A equação de En é a diferença dos resultados dividida pela raiz quadrada da soma quadrática das incertezas. Sendo que, normalmente, considera-se o módulo da diferença dos resultados no numerador da fração.

$$En = \frac{|r_1 - r_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (3)$$

Onde:

r1 é o resultado da primeira medição e U1 é a sua incerteza,

r2 é o resultado da segunda medição e U2 é a sua incerteza.

3 RESULTADOS

3.1 Faixa de 100 kΩ a 1 MΩ

Na tabela 2 são mostrados os valores medidos nos resistores 11A e 11B, quanto a configuração, método, diferenças entre valores e Erro Normalizado(En).

Tabela 2 - Resultado de 11A na razão 1:1 e 11B nas razões 1:1 e 10:1

Configuração (Rs x Rx)	Método	Valor de Rx (MΩ)	U (μΩ/Ω)	k	neff	Diferença (μΩ/Ω)	En
10A x 11A	<i>Interchange</i>	1,000 065 02	0,22	2,00	307,2	0,23	0,74
10B x 11A	<i>Interchange</i>	1,000 065 25	0,22	2,00	400,0		
10A x 11B	<i>Interchange</i>	1,000 042 84	0,24	2,02	120,6	0,15	0,44
10B x 11B	<i>Interchange</i>	1,000 042 99	0,24	2,01	193,2		
11A(10A) x 11B(10A)	<i>Interchange</i>	1,000 042 83	0,25	2,00	357,5	0,01	0,03

Nesta faixa, todos os resultados passaram pelo teste do En.

3.2 Faixa de 1 MΩ a 10 MΩ

Na tabela 3 são mostrados os valores medidos nos resistores 12A e 12B, quanto a configuração, método, diferenças entre valores e Erro Normalizado(En).

Tabela 3 - Resultado de 12A(T) na razão 1:1 e 12B(T) nas razões 1:1 e 10:1

Configuração (Rs x Rx)	Método	Valor de Rx (MΩ)	U (μΩ/Ω)	k	neff	Diferença (μΩ/Ω)	En
11A x 12A	Direto	10,000 827 1	0,56	2,00	400,0	0,02	0,03
11B x 12A	Direto	10,000 826 9	0,56	2,00	400,0		
11A x 12B	Direto	10,000 060 9	0,68	2,09	30,2	0,13	0,15
11B x 12B	Direto	10,000 062 2	0,58	2,01	175,6		
12A(11A) x 12B(11A)	Interchange	10,000 093 1	0,79	2,00	400,0	3,22	3,09
11A x 12AT	Direto	10,000 833 0	0,57	2,00	372,5	0,02	0,02
11B x 12AT	Direto	10,000 833 2	0,58	2,01	210,1		
11A x 12BT	Direto	10,000 395 0	0,56	2,00	369,6	0,02	0,02
11B x 12BT	Direto	10,000 395 2	0,62	2,04	56,9		
12AT(11A) x 12BT	Interchange	10,000 396 9	0,80	2,00	400,0	0,19	0,19
Comparação 12AT(11A) e 12A(11A)	-	-	-	-	-	0,59	0,74
Comparação 12BT(11A) e 12B(11A)	-	-	-	-	-	33,41	37,93

Nesta faixa, ocorreram dois resultados com En maior que 1.

A calibração de resistores sem utilizar o terminal de terra do resistor é instável, pois fica dependente da resistência de isolamento dos resistores padrão (Rs) e em calibração(Rx). Observa-se que o resistor 12B é instável e apresenta resistência de isolamento baixa, conforme pode ser observado nos valores comparados nas ligações sem terra e com terra. A diferença entre seus dois valores passa de 33 μΩ/Ω. Este valor sugere uma resistência de isolamento de pode ser calculada de forma aproximada, dividindo-se o valor nominal do resistor 12B pela diferença encontrada (100 MΩ/33x10⁻⁶) cujo resultado é de aproximadamente 3 TΩ. No entanto, o resistor 12B apresentou-se estável quando medido na razão 10:1, no entanto, na razão 1:1 esta diferença ficou em torno de 3 μΩ/Ω.

Uma hipótese para esta diferença seria devido a tensão aplicada no resistor na configuração 10:1 e 1:1. A ponte utiliza uma fonte estabilizada de 10V. Ao ser aplicada nos dois resistores em série nas razões 10:1 e 1:, a tensão aplicada no resistor Rx e Rs são de aproximadamente 9,91 V e 5,00 V, respectivamente. A resistência de isolamento é inversamente proporcional ao aumento de tensão, logo, é possível que a resistência de isolamento de 12B na configuração 1:1 seja maior que na configuração 10:1, ocasionado este En alto.

3.3 Faixa de 10 MΩ a 100 MΩ

Na tabela 4 são mostrados os valores medidos nos resistores 13A e 13C, quanto a configuração, método, diferenças entre valores e Erro Normalizado(En).

Nesta faixa, ocorreram dez resultados com En maior que 1.

Analisando os resultados dos item 01 e 02 observa-se que a diferença encontrada é de no máximo $-4,2\mu\Omega/\Omega$. Esta diferença pode ser corrigida ao utilizar-se o valor encontrado para o resistor 12B na razão 1:1 encontrada no item 3.2. Ao realizar esta correção, esta diferença seria reduzida de $(-4,2 + 3,2)\mu\Omega/\Omega$, ou seja, seria igual a $-1,0\mu\Omega/\Omega$.

No item 05, o resistor 13C foi medido sem a ligação de seu terminal de terra, causando uma instabilidade em seu valor que pode ser constatado através da diferença entre seu valor com terra e sem terra conforme calculado no item 18.

Os itens 07 e 08 seguem a mesma análise realizada para os itens 01 e 02.

O item 11 apresentou En maior que 1. As medições realizadas neste estudo, demoraram um tempo relativamente grande, chegando a 1 semana. Neste período de tempo pode ter ocorrido um *short term drift*, tanto no valor do resistor 12B como do resistor 13C.

Do item 13 ao 18, observa-se uma diferença entre os valores de 13A e 13C medidos com terra e sem terra na razão 10:1, que poderia ser utilizado para cálculo de sua resistência de isolamento.

Tabela 4 - Resultado de 13A(T) na razão 1:1 e 13C(T) nas razões 1:1 e 10:1

Item	Configuração (Rs x Rx)	Método	Valor de Rx (MΩ)	U (μΩ/Ω)	k	neff	Diferença (μΩ/Ω)	En
01	12A x 13A	Direto	100,022 89	1,3	2,00	400,0	4,20	2,12
	12B x 13A	Direto	100,022 47	1,5	2,06	46,3		
02	12A x 13C	Direto	100,004 13	1,2	2,00	400,0	4,10	2,32
	12B x 13C	Direto	100,003 72	1,3	2,05	54,0		
03	13A(12A) x 13C	Interchange	100,004 17	1,7	2,00	400,0	0,40	0,19
04	12AT x 13A	Direto	100,023 07	1,3	2,00	400,0	1,50	0,82
	12BT x 13A	Direto	100,022 92	1,3	2,00	400,0		
05	12AT x 13C	Direto	100,004 25	1,3	2,05	52,2	1,90	1,07
	12BT x 13C	Direto	100,004 06	1,2	2,00	400,0		
06	13A(12AT) x 13C	Interchange	100,004 35	1,7	2,00	400,0	1,00	0,47
07	12A x 13AT	Direto	100,024 09	1,4	2,03	93,5	4,60	2,32
	12B x 13AT	Direto	100,023 63	1,4	2,03	93,2		
08	12A x 13CT	Direto	100,004 60	1,2	2,00	400,0	4,60	2,60
	12B x 13CT	Direto	100,004 14	1,3	2,05	56,7		
09	13AT(12A) x 13CT	Interchange	100,004 61	1,7	2,01	234,8	0,10	0,05
10	12AT x 13AT	Direto	100,024 06	1,3	2,01	219,0	2,30	0,95
	12BT x 13AT	Direto	100,023 83	2,0	77,80	400,0		
11	12AT x 13CT	Direto	100,004 58	1,2	2,00	400,0	2,40	1,41
	12BT x 13CT	Direto	100,004 34	1,2	2,00	400,0		
12	13AT(12AT) x 13CT(12AT)	Interchange	100,004 58	1,7	2,00	400,0	0,00	0,00
13	Comparação 13AT(12A) e 13A(12A)	-	-	-	-	-	12,00	6,28
14	Comparação 13AT(12AT) e 13A(12AT)	-	-	-	-	-	9,90	5,18
15	Maior diferença entre 13AT e 13A(Rs=12A)	-	-	-	-	-	12,00	
16	Comparação 13CT(12A) e 13C(12A)	-	-	-	-	-	4,70	2,29
17	Comparação 13CT(12AT) e 13C(12AT)	-	-	-	-	-	3,30	1,94
18	Maior diferença entre 13CT e 13C (Rs=12A)	-	-	-	-	-	4,70	
19	Maior diferença entre 13CT e 13C na razão 1:1	-	-	-	-	-	4,40	

O item 19 representa a maior diferença encontrada na razão 1:1, que está de acordo com resultados anteriores.

3.4 Faixa de 100 MΩ a 1 GΩ

Na tabela 5 são mostrados os valores medidos nos resistores 14A e 14B, quanto a configuração, método, diferenças entre valores e Erro Normalizado(En).

Tabela 5 - Resultado de 14A(T) na razão 1:1 e 14B() nas razões 1:1 e 10:1

Item	Configuração (Rs x Rx)	Método	Valor de Rx (GΩ)	U (μΩ/Ω)	k	neff	Diferença (μΩ/Ω)	En
01	13A x 14A	Direto	1,000 055 8	5,1	2,03	85,2	4,10	0,56
	13C x 14A	Direto	1,000 059 9	5,2	2,00	400,0		
02	13A x 14B	Direto	1,000 056 5	5,1	2,00	400,0	5,10	0,71
	13C x 14B	Direto	1,000 061 6	5,1	2,00	400,0		
03	14A(13A) x 14B	Interchange	1,000 055 0	7,2	2,00	321,9	1,50	0,17
04	13AT x 14A	Direto	1,000 057 8	5,2	2,00	400,0	2,00	0,27
	13CT x 14A	Direto	1,000 059 8	5,2	2,00	400,0		
05	13AT x 14B	Direto	1,000 060 5	5,1	2,00	400,0	0,50	0,07
	13CT x 14B	Direto	1,000 061 0	5,1	2,00	400,0		
06	14A(13AT) x 14B	Interchange	1,000 057 0	7,3	2,00	400,0	3,50	0,39
07	13A x 14AT	Direto	1,000 083 5	5,2	2,00	400,0	10,60	1,46
	13C x 14AT	Direto	1,000 072 9	5,1	2,00	400,0		
08	13A x 14BT	Direto	1,000 060 5	5,1	2,00	400,0	0,50	0,07
	13C x 14BT	Direto	1,000 061 0	5,1	2,00	400,0		
09	14AT(13A) x 14BT	Interchange	1,000 068 4	7,3	2,00	400,0	7,90	0,89
10	14AT(13C) x 14BT	Interchange	1,000 057 8	7,3	2,00	400,0	3,20	0,36
11	13AT x 14AT	Direto	1,000 075 7	5,1	2,00	400,0	0,70	0,10
	13CT x 14AT	Direto	1,000 076 4	5,2	2,00	400,0		
12	13AT x 14BT	Direto	1,000 059 9	5,1	2,00	400,0	1,50	0,21
	13CT x 14BT	Direto	1,000 061 4	5,2	2,00	400,0		
13	14AT(13AT) x 14BT(13AT)	Interchange	1,000 060 6	7,3	2,00	400,0	0,70	0,08
14								
15	Comparação 14AT(13A) e 14A(13A)	-	-	-	-	-	27,70	3,80
16	Comparação 14AT(13AT) e 14A(13AT)	-	-	-	-	-	17,90	2,46
17	Maior diferença entre 14AT e 14A(Rs=13A)						27,70	
18	Comparação 14AT(13C) e 14A(13C)	-	-	-	-	-	13,00	1,80
19	Comparação 14AT(13CT) e 14A(13CT)	-	-	-	-	-	16,60	2,30
20	Maior diferença entre 14AT e 14A(Rs=13C)						16,60	
21	Comparação 14BT(13A) e 14B(13A)	-	-	-	-	-	4,00	0,55
22	Comparação 14BT(13AT) e 14B(13AT)	-	-	-	-	-	-0,60	0,08
23	Maior diferença entre 14BT e 14B (Rs=13A)	-	-	-	-	-	4,00	
24	Comparação 14BT(13C) e 14B(13C)	-	-	-	-	-	-0,60	0,08
25	Comparação 14BT(13CT) e 14B(13CT)	-	-	-	-	-	0,40	0,05
26	Maior diferença entre 14BT e 14B(Rs=13C)						0,40	
27	Maior diferença entre 14BT e 14B na razão 1:1	-	-	-	-	-	13,40	

Analisando o item 17, observa-se que a diferença do valor do resistor 14A com terra e sem terra pode chegar até 27,7 μΩ/Ω. No entanto, esta variação pode ter sido influenciada pelo

resistor 13A que está em torno de $10\ \mu\Omega/\Omega$. Assim como outras medições podem ter sido afetadas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *short term drift* dos resistores a partir de $100\ M\Omega$ dificulta encontrar o melhor parâmetro para o cálculo da resistência de fuga. Um caminho para reduzir o *short term drift* seria a utilização de meios automatizados que pudessem chavear as configurações de resistores ligados com terra e sem terra. As análises realizadas na faixa de 100M-1G, foram feitas com um intervalo muito longo, chegando as vezes a 1 mês, devido a necessidade de aproveitar a estabilidade do resistor no banho e evitar a influência de outros fatores externos como a intervenção do operador para alterar as suas conexões.

Neste trabalho foi possível observar que as medições do resistor com terra e sem terra são um importante parâmetro para avaliar a estabilidade do resistor padrão durante as calibrações e pode ser utilizada como uma componente de incerteza durante a calibração.

As calibrações realizadas na razão 1:1 conseguem reduzir erros devido a resistência de fuga e obter valores mais estáveis, sendo necessária reavaliá-la comparando com o método direto para avaliar a possibilidade de usá-lo em conjunto com o *Interchange* para estimar a corrente de fuga devido ao cabo de ligação.

No próximo grupo de testes, seria importante dividi-lo em menos itens ou dividir a medição em mais grupos de testes mais independentes para evitar a influência do *short term drift* nos resultados.

REFERÊNCIAS

CUTKOSKY, R. D. A New Switching for Binary Resistive Dividers. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-27, n. 4, p. 421-422, 1978. DOI: 10.1109/TIM.1978.4314728. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4314728> . Acesso em: 27 maio 2020.

DUNN, A. F. Measurement of Resistance Ratios in the Range to 100 Megohms. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 40, n. 2, p. 278-280, 1991. DOI: 10.1109/TIM.1990.1032937. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/192298>. Acesso em: 27 maio 2020.

HAIMING S. et al. High resistance measurement at NIM. *In: Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, 2010, Sydney. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/850994>. Acesso em: 27 maio 2020.

HONIG, R. Practical aspects of high resistance measurements. **Cal Lab: The International Journal of Metrology**, Jan. 2010. Disponível em: <https://www.callabmag.com/practical-aspects-of-high-resistance-measurements/>. Acesso em: 27 maio 2020.

Measurements International(MIL). **Automatic High Resistance Bridge: Model 6000A – Operator Manual**, 2000.

TSAO, S. H. A 25-bit reference resistive voltage divider. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-36, n. 2, p. 285-290, 1987. DOI: 10.1109/TIM.1987.6312688. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6312688> . Acesso em: 27 maio 2020.

TSAO, S. H; KLEIN, H. P. An accurate, automated 10-V measuring system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 38, n. 2, p. 321-323, 1989. DOI: 10.1109/19.192298. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/192298>. Acesso em: 27 maio 2020.

VARGHA B.; ZOLTÁN I. Calibration algorithm for current-output R-2R ladders. **Elsevier: Measurement**, v.31, n. 3, p. 201-207, 2002. DOI: 10.1016/S0263-2241(01)00026-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224101000264>. Acesso em: 27 maio 2020.