ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA NA CALIBRAÇÃO DE RESISTORES PADRÃO DE 10 K Ω E 100 K Ω UTILIZANDO O MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POTENCIOMÉTRICO POR DIVISOR DE TENSÃO BINÁRIO E POR COMPARAÇÃO DE CORRENTE

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 duas metodologias disponíveis em equipamentos comerciais para calibrar resistores padrão de 10 k Ω e 100 k Ω . A calibração desses resistores foi realizada através de duas pontes automáticas de resistência de modelos e métodos diferentes. Uma delas utiliza o método de comparação de corrente e a outra, o método potenciométrico com divisor de tensão binário. Os resistores utilizados possuem uma significativa corrente de fuga que mostram a divergência que pode ocorrer entre os resultados de calibração obtidos em cada metodologia. Para realizar esta comparação foi utilizada metodologia específica para estimar o valor da resistência de fuga e comparar este valor com o obtido através de um teraohmímetro. Este estudo contribui para estabelecer critérios de correção e/ou inclusão de componentes de incerteza em resistores calibrados nestas duas metodologias.

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

ABSTRACT

This article discusses the use of two methodologies available in commercial equipment to calibrate standard 10 k Ω and 100 k Ω resistors. The calibration of these resistors was carried out using two automatic resistance bridges of different models and methods. One uses the current comparison method and the other, the potentiometric method with a binary voltage divider. The resistors used have a significant leakage current that show the divergence that can occur between the calibration results obtained in each methodology. In order to carry out this comparison, a specific methodology was used to estimate the leakage resistance value and compare this value with that obtained using a teraohmmeter. This study contributes to establish criteria for correction and/or inclusion of uncertainty components in resistors calibrated in these two methodologies.

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

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.

O Lampe possui dois modelos de pontes comerciais: a ponte 6010D (Mil, 2012) que utiliza o método de comparação de corrente e a ponte 6000B (Mil, 2005) que utiliza o método potenciométrico usando o princípio do divisor binário. Os dois modelos usam quatro terminais.

A ponte 6010D alterna o sentido das correntes durante a calibração de resistores para reduzir os efeitos das correntes e tensões parasitas. Sua faixa de calibração é de 1 mΩ a 100 kΩ.

A ponte 6000B foi construída através das contribuições de Dunn (1991), Tsao (1989) e Cutkosky(1978) cuja metodologia de medição permite compensar o efeito de correntes de fuga de resistores e cabos de ligação durante a calibração. A faixa de calibração da ponte 6000B é de 10 kΩ a 1 TΩ.

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.

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

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

Neste trabalho foi avaliado a influência da resistência de fuga na calibração de resistores ao utilizar estes dois modelos de ponte de resistência.

2 METODOLOGIA PARA ESTIMAR O VALOR DA RESISTÊNCIA DE FUGA DOS RESISTORES PADRÃO DURANTE AS MEDIÇÕES REALIZADAS ATRAVÉS DE UM TERAOHMÍMETRO E AS PONTES 6010D E 6000B

O modelo simplificado de um resistor padrão com a contribuição das resistências de isolamento está ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Diagrama simplificado de um resistor padrão e sua resistência de isolamento

Fonte: (Autor,2021)

A figura 1 mostra que entre os terminais de conexão *High* e *Low* e a caixa de proteção existe uma resistência de isolamento que dependendo de sua ordem de grandeza e do valor nominal do padrão poderá influenciar nos resultados obtidos durante a calibração de resistores.

Além da resistência de isolamento, podem existir outros tipos de contribuição devido a forma como é construído. Neste estudo, a composição da resistência de isolamento dos resistores, cabos e outras formas de perda resistiva (HONIG, 2010) serão denominadas de resistência de fuga (R_F) e o resistor em calibração ou sob teste de R_x .

Antes de realizar as calibrações, todos os cabos foram testados com o Teraohmímetro e apresentaram valores de isolamento superiores a 10 TΩ para uma tensão aplicada de 50V.

Os efeitos da resistência de fuga serão analisados em três situações:

- Medição direta da R_F do resistor A-04 de 10 kΩ e A-05 de 100 kΩ utilizando-se o Teraohmímetro M1501P do fabricante Sefelec;
- Calibração dos resistores A-04 de 10 kΩ e A-05 de 100 kΩ sem e com o terminal de *Ground* conectado ao terminal de terra da ponte 6010D;

- c) Calibração dos resistores A-04 de 10 k Ω e A-05 de 100 k Ω , sem e com o terminal de *Ground* conectado ao terminal de terra da ponte 6000B.

2.1 Medição direta da R_F dos resistores A-04 de 10 k Ω e A-05 de 100 k Ω utilizando-se o teraohmímetro M1501P do fabricante Sefelec

A figura 2 ilustra a ligação do Teraohmímetro a um resistor com suas respectivas resistências de fuga.

Figura 2 – Diagrama simplificado da ligação de um teraohmímetro a um resistor padrão

Fonte: (Autor, 2021)

Pelo circuito da figura 2, pode-se observar que ao realizar-se a medição da R_F utilizando-se o Teraohmímetro, o valor medido corresponderá ao paralelo de $(R_{F1} + R_x)$ e R_{F2} .

A tabela 1 mostra os valores encontrados durante as medições utilizando-se o Teraohmímetro.

Tabela 1- Medições da resistência de fuga dos resistores A-04 e A-05 para diferentes valores de tensão

Tensão Aplicada (V)	Valor da Resistência de Fuga Medida no Teraohmímetro (G Ω)	
	A-04 (10 k Ω)	A-05 (100 k Ω)
1	0,8	1,6
5	0,5	1,2
10	0,4	0,9
15	0,4	0,8
20	0,3	0,8
50	0,3	0,7

Conforme era esperado, conforme se aumenta o valor da tensão aplicada, o valor da resistência de fuga diminui.

2.2 Calibração dos resistores A-04 de 10 kΩ e A-05 de 100 kΩ sem e com o terminal de *Ground* conectado ao terminal de terra da ponte 6010D

A figura 3 ilustra a ligação do resistor a ponte 6010D com a análise das resistências de fuga nas situações sem e com a conexão do terminal de *Ground* ao terminal de terra da ponte 6010D.

Figura 3 – Diagrama simplificado da ligação do resistor padrão a ponte 6010D sem e com a conexão do terminal de *Ground* ao terminal de terra da ponte 6010D.

Na configuração sem conexão do terra, R_{F1} e R_{F2} são somados e formam um paralelo com o resistor R_x .

Conforme o desenho do circuito da figura 3, para uma fonte de alimentação positiva, a resistência R_{F1} fica em paralelo com o resistor R_x , enquanto que R_{F2} é eliminada. No entanto, estas duas resistências de fuga nem sempre serão iguais e poderiam ocasionar diferentes valores de medição quando são invertidos os terminais de ligação do resistor a ser calibrado.

Na ponte 6010D, devido a alternância no sentido da corrente durante a calibração, também ocorre alternância da resistência de fuga que ficará em paralelo com o R_x . Desta forma o resultado da calibração seria o valor de R_x em paralelo com a média de R_{F1} e R_{F2} .

A tabela 2 mostra os valores encontrados durante as medições realizadas na ponte 6010D.

Tabela 2 - Medições dos resistores de 10 kΩ e 100 kΩ para diferentes valores de corrente nas configurações com e sem a conexão do terminal de *Ground* do resistor ao terminal de terra da ponte 6010D

Resistor	Corrente Aplicada (mA)	Com Terra		Sem Terra		Diferença (ComTerra-SemTerra) ($\mu\Omega/\Omega$)
		Valor (kΩ)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	Valor (kΩ)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	
A-04 (10 kΩ)	0,1	10,000 016 0	0,16	10,000 093 8	0,14	-7,8
	1	9,999 951 4	0,21	10,000 078 7	0,16	-12,7
A-05 (100 kΩ)	0,1	99,993 109	0,20	99,996 976	0,26	-38,7

No resistor de 10 k Ω , observa-se que conforme se aumenta o valor da corrente aplicada, o valor da R_F diminui, fazendo com que o valor medido pela ponte 6010D deste resistor também seja reduzido. Esta redução pode ser observada para os dois resistores tanto na coluna Sem Terra como na coluna Com Terra da tabela 2.

2.3 Calibração dos resistores A-04 de 10 k Ω e A-05 de 100 k Ω , com e sem o terminal de terra conectado a ponte 6000B

A figura 4 ilustra a ligação do resistor a ponte 6000B com a análise das resistências de fuga nas situações sem e com a conexão do terminal de *Ground* ao terminal de terra da ponte 6000B.

Figura 4 – Diagrama simplificado da ligação do resistor padrão a ponte 6000B sem e com o terminal de terra ligado ao resistor

Fonte: (Autor,2021)

Na configuração sem conexão do terra, R_{F1} e R_{F2} de R_x e R_s são somados e formam um paralelo com o resistor R_x e R_s .

Na configuração com terra no método potenciométrico, R_{Fx1} e R_{Fs2} são eliminadas, restando apenas a R_{Fx2} e R_{Fs1} que ficam em paralelo com resistor padrão R_s . Neste tipo de configuração, R_{Fx2} e R_{Fs1} tenderiam a influenciar no resultado da calibração aumentando o valor da razão R_x/R_s , obtendo-se um resultado maior que o esperado para R_x .

No entanto, a ponte 6000B possui uma metodologia de medição que compensa a influência da resistência de fuga tanto dos cabos de alimentação como do resistor.

A tabela 3 mostra os valores encontrados durante as medições realizadas nos resistores na ponte 6000B.

Tabela 3 - Medições dos resistores de 10 k Ω e 100 k Ω para diferentes valores de corrente nas configurações com e sem a conexão do terminal de *Ground* do resistor ao terminal de terra da ponte 6000B

Resistor	Tensão Aplicada (V)	Com Terra		Sem Terra		Diferença (ComTerra-SemTerra) ($\mu\Omega/\Omega$)
		Valor (k Ω)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	Valor (k Ω)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	
A-04 (10 kΩ)	5	10,000 139 1	0,17	10,000 089 9	0,17	+4,9
	10	10,000 139 3	0,17	10,000 078 0	0,17	+6,1
A-05 (100 kΩ)	10	99,999 888	0,19	99,996 959	0,30	+29,3
	20	99,999 847	0,31	99,996 535	0,80	+33,1

Conforme era esperado, conforme se aumenta o valor da tensão, o valor da R_F diminui, fazendo com que o valor medido pela ponte 6000B deste resistor também seja reduzido. Esta redução pode ser melhor observada para os dois resistores na coluna Sem Terra da tabela 3.

3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS PONTES 6010D E 6000B

As tabelas 2 e 3 mostram os resultados individualizados das pontes 6010D e 6000B. Na tabela 4 é feita a correlação entre a tensão aplicada ao resistor de 10V, pela ponte 6000B e ao produto da corrente aplicada pelo valor nominal resultando em 10 V e comparados os resultados.

Tabela 4 – Correlação dos resultados obtidos pela 6010D e 6000B para uma tensão de 10 V

Resistor	Tipo de Conexão	6010D		6000B		Diferença (6010D-6000B) ($\mu\Omega/\Omega$)
		Valor (k Ω)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	Valor (k Ω)	U ($\mu\Omega/\Omega$)	
A-04 (10 kΩ)	Com Terra	9,999 951 4	0,21	10,000 139 3	0,17	-18,8
	Sem Terra	10,000 078 7	0,16	10,000 078 0	0,17	+0,1
A-05 (100 kΩ)	Com Terra	99,993 109	0,20	99,999 888	0,19	-67,8
	Sem Terra	99,996 976	0,26	99,996 959	0,30	+0,2

A tabela 4 mostra que para a conexão sem terra, os resultados obtidos para os dois resistores estão compatíveis pois possuem diferenças menores que a incerteza declarada em cada resistor. No entanto, para as conexões com terra, devido a influência da corrente de fuga, o resultado se tornou incompatível, sendo adotado o da ponte 6000B que faz compensação da corrente de fuga. Logo o valor dos resistores A-04 e A-05 passaram a ser 10,000 139 3 k Ω e 99,999 888 k Ω , respectivamente.

A partir dos resultados da tabela 4 foi possível estimar o valor da resistência de fuga e comparar com os resultados obtidos no Teraohmímetro. Desta forma, é possível verificar os valores de $(R_{F1} + R_{F2})/2$ e $(R_{F1} + R_{F2})$ nas duas pontes conforme tabela 5, onde o valor do conjunto R_F é obtido dividindo o valor padrão pelo módulo da diferença encontrada.

Tabela 5 – Cálculo do conjunto $(R_{F1} + R_{F2})/2$ e $(R_{F1} + R_{F2})$

Valor padrão 6000B (k Ω)	Valor ComTerra 6010D (k Ω)	Diferença (Valor Com Terra-Padrão) ($\mu\Omega/\Omega$)	$(R_{F1} + R_{F2})/2$ (G Ω)	Valor SemTerra 6000B (k Ω)	Diferença (Valor Sem Terra-Padrão) ($\mu\Omega/\Omega$)	$(R_{F1} + R_{F2})$ (G Ω)
10,000 139 3	9,999 951 4	-18,8	0,53	10,000 078 0	-6,1	1,65
99,999 888	99,993 109	-67,8	1,48	99,996 959	-29,3	3,41

A resistência de fuga pode variar um pouco devido as condições ambientais, correntes e tensões parasitas, mas os resultados encontrados mostram a mesma ordem de grandeza. Lembrando que conforme descrito em 2.1, o resultado equivalente a medição realizada no teraohmímetro seria o circuito equivalente ao paralelo de $(R_{F1} + R_x)$ com R_{F2} . A partir da tabela 5 e considerando que $R_{F1} = R_{F2}$, pode-se estimar que:

- Para o resistor de 10 k Ω , estaria entre (0,26 e 0,41) G Ω . No teraohmímetro este valor foi de 0,4 G Ω ;
- Para o resistor de 100 k Ω , estaria entre (0,74 e 0,85) G Ω . No teraohmímetro este valor foi de 0,9 G Ω .

4 CONCLUSÃO

Através das medições realizadas nas duas pontes observou-se que o sistema de compensação de corrente de fuga da ponte 6000B funciona bem nas faixas de 10 k Ω e 100 k Ω .

A ponte 6010D não possui um sistema similar de compensação de corrente de fuga, devendo ser observado as características do resistor a ser medido nesta faixa de valores. Na ausência de um Teraohmímetro, é possível estimar o valor da resistência de fuga e calcular uma possível correção e/ou componente de incerteza a acrescentar no resultado final do resistor calibrado.

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 LIMITED (MIL). **Automated Primary Resistance Bridge – Model 6010D – Operator Manual**, Ontario, 2005.

MEASUREMENTS INTERNATIONAL LIMITED (MIL). **Automated Primary Resistance Bridge – Model 6000B – Operator Manual**, Ontario, 2012.

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.