

## CALIBRAÇÃO DE RESISTORES EM CORRENTE ALTERNADA

*Renata T. de Barros e Vasconcellos, Luiz Macoto Ogino*

Inmetro, Duque de Caxias, Brasil, lacin@inmetro.gov.br

**Resumo:** Desenvolvimento de uma ponte coaxial de quatro terminais, a ser usada para a calibração tanto de resistores em corrente alternada como de capacitores de alto valor, superiores a 10 nF. Sendo também parte da cadeia de rastreabilidade do efeito Hall Quântico. Motivações e desafios para a construção deste sistema.

**Palavras chave:** metrologia elétrica, resistência em corrente alternada, pontes coaxiais, efeito Hall Quântico.

### 1. MOTIVAÇÃO

O Inmetro tem recebido inúmeras solicitações de calibração de resistores padrão em corrente alternada, tanto por parte dos laboratórios secundários como por parte das indústrias, concessionárias de energia, centros de pesquisa e universidades.

Embora a calibração de resistores em corrente alternada seja uma necessidade mundial, pontes de medição de alta exatidão específicas para esta calibração ainda não estão disponíveis no mercado. Por este motivo, diversos Institutos Nacionais de Metrologia desenvolveram, ou estão desenvolvendo, as suas próprias pontes para a realização deste tipo de calibração.

Dentro deste contexto está em processo de desenvolvimento no Inmetro uma ponte coaxial para calibração de resistores em corrente alternada. Esta ponte, além de permitir a calibração de resistores em corrente alternada, também é parte integrante da cadeia de rastreabilidade da unidade de capacitância ao efeito Hall quântico.

Inicialmente foi construída no Laboratório de Capacitância e Indutância (Lacin) do Inmetro uma ponte de quatro terminais não-coaxial para calibração de resistores em CA. Esta ponte possui um circuito mais simples, que infelizmente apresenta algumas instabilidades e também incertezas relativamente altas, sendo incapaz de atender as demandas da cadeia de rastreabilidade.

Para solucionar este problema, foram estabelecidas parcerias com outras instituições congêneres, como o *Laboratoire National de Metrologie et d'Essais* (LNE),

visando a construção de um sistema de medição com alta estabilidade e incerteza muito baixa, na forma de uma ponte coaxial de quatro terminais.

### 2. PONTE DE RESISTÊNCIA NÃO-COAXIAL

O Lacin desenvolveu uma ponte de quatro terminais não-coaxial para calibrar resistores CA entre os anos 2000 e 2003. Em 2006 a ponte foi remontada pelos autores, com algumas modificações para aprimorar o aterramento da ponte e reduzir influências externas. Sendo então realizadas série de medições. Nas subseções a seguir está uma descrição resumida desta ponte e o resultado das medições efetuadas.

#### 2.1. Descrição da Ponte de Resistência

Os resistores manifestam comportamento diferente para corrente contínua e corrente alternada, pois quase sempre possuem alguma reatância que provoca dependência em frequência. Além disto os resistores padrão CA são construídos em quatro terminais, para eliminar a resistência dos fios.

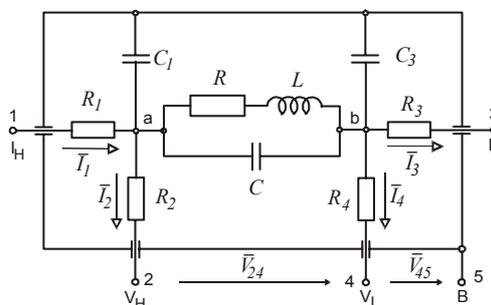


Fig. 1. Modelo de Resistor CA em quatro terminais

A partir deste modelo é possível definir a resistência em corrente alternada e a constante de tempo de acordo com as seguintes equações  $R_{CA} = \frac{R}{1 - \omega^2(2LC - R^2C^2)}$  e  $\tau = \frac{L}{R} - RC$

Para se construir uma ponte de comparação para resistores CA de quatro terminais é preciso considerar não só o equilíbrio da parte resistiva (real) como também o equilíbrio da parte reativa (imaginária), sendo necessário para tanto um gerador de quadratura.

Além disto deve ser feita uma compensação da resistência dos nós de ligação (equilíbrio Kelvin). Devido a falta de equipamentos na ocasião esta compensação foi feita usando a média de duas medições, conforme mostrado na figura 2.

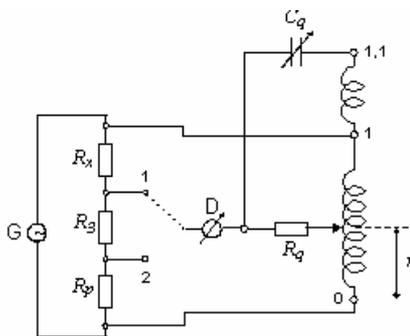


Fig. 2. Ponte de resistência em quatro terminais

Para se obter o valor do resistor desconhecido  $R_x$  em relação ao resistor padrão  $R_p$ ,  $R_x \approx R_p \frac{1 - r_1}{r_2}$ , se assumiu, novamente devido a escassez de equipamentos, que a resistência do divisor indutivo é significativamente maior que  $R_p$ . Fato este que não é necessariamente verdadeiro.

Tanto o fato acima citado como devido a não existência do braço de equilíbrio Kelvin, contribuem para a alta incerteza deste sistema. Outro ponto importante é o fato de que esta ponte não é coaxial, o que a torna suscetível a interferências externas.

### 2.3. Resultados Experimentais

Foram feitos alguns ensaios usando a ponte não-coaxial para calibrar resistores CA de propriedade do laboratório nas frequências de 60 Hz e 1 kHz. Para 60 Hz não é possível obter o equilíbrio da ponte devido a interferências externas. Para contornar este problema as medições foram refeitas em 50 Hz. Neste caso, a incerteza expandida é da ordem de 0,01 %.

Para 1 kHz a ponte se apresentou mais estável, porém não estavam disponíveis no momento resistores calibrados nesta frequência, necessários para se obter o cálculo de incerteza. Como estes resultados são insuficientes para um laboratório primário, optou-se por um outro modelo de ponte. É preciso realçar que para fazer parte da cadeia de rastreabilidade ao efeito Hall o sistema deve apresentar incerteza inferior a  $0,1 \mu\Omega/\Omega$ , ou seja, um milésimo da incerteza apresentada.

### 3. PONTE COAXIAL DE QUATRO TERMINAIS

Para solucionar os problemas referentes a calibração de resistores AC com alta precisão optou-se por um modelo de ponte coaxial de quatro terminais. Este projeto está sendo realizado com a colaboração do Dr. Alexandre Bounouh, do LNE/FRANÇA e com recursos do Projeto Verde-Amarelo / FINEP.

Nesta nova ponte são considerados diversos fatores, descritos a seguir, visando reduzir a incerteza de calibração para valores inferiores a  $0,1 \mu\Omega/\Omega$ . O esquema simplificado da ponte coaxial pode ser visto na figura 3.

Na ponte coaxial a alimentação é feita via um transformador de alimentação, permitindo que a ponte receba a tensão do gerador e ao mesmo tempo esteja isolada da rede de alimentação do laboratório, evitando interferências.

A ponte utiliza ainda um divisor indutivo de tensão na comparação das impedâncias, garantindo alta impedância entre os resistores e os dois divisores decádicos usados no equilíbrio principal.

A compensação dos cabos é feita através de um circuito auxiliar denominado braço de Kelvin. Existe também braços auxiliares de compensação para garantir que não haja corrente nos terminais de tensão  $V_H$  e  $V_L$ . Além disto é feita a compensação de capacitâncias parasitas, usando-se uma ponte auxiliar de Wagner, garantindo que toda a ponte esteja no mesmo potencial.

Como se trata de uma ponte coaxial, podemos garantir sua blindagem contra campos eletromagnéticos externos. Para tanto é preciso garantir que a corrente na malha seja simétrica a corrente do condutor interno. Este resultado é alcançado com o uso *chokes* colocados no cabeamento da ponte.

Esta ponte coaxial está em fase de construção pelo Lacin. No momento foram construídos o transformador de isolamento e o divisor principal, descritos na próxima seção.

Simultaneamente a construção da ponte, está sendo feito um sistema de controle ativo de temperatura para os padrões de resistência CA, visando diminuir a incerteza e melhorar a estabilidade das medições.

### 4. TRANSFORMADORES

Ambos os transformadores foram construídos usando núcleos toroidais de super-malloy, material de alta permeabilidade magnética, evitando perdas ao máximo.

#### 4.1 Transformador de Alimentação

O transformador de alimentação é um transformador com ganho 1:2, o qual fornece a tensão de alimentação tanto para o equilíbrio central como para os braços auxiliares da ponte.

Este transformador foi construído com um núcleo toroidal de super-malloy, tendo o enrolamento feito com fios de cobre. No primeiro estágio enrolamento foi feito com 140 espiras no estilo *boot-lace*.

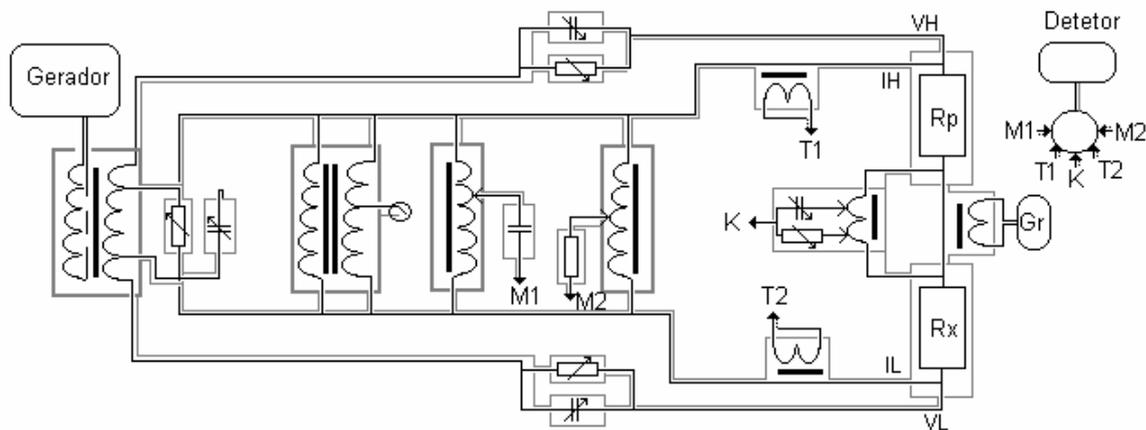


Fig. 3. Ponte coaxial em quatro terminais

Já o segundo estágio foi construído com uma corda de 14 fios e 20 enrolamentos, existindo assim 14 seções idênticas.

Este transformador conta com blindagens de folha de cobre após o primário e o secundário. Conta também com uma blindagem cilíndrica de alumínio, vista na figura 4, usada tanto como blindagem eletrostática como para proteção mecânica do transformador.



Fig. 4 Transformadores

Este transformador ainda receberá uma blindagem magnética de mumetal e proteção contra choques mecânicos, garantindo sua estabilidade e independência de fatores externos.

#### 4.2 Divisor Indutivo de Tensão

O divisor indutivo de tensão (DIV) principal é um auto-transformador em dois estágios, o qual permite que a relação entre as impedâncias comparadas pelo sistema seja de 1:1 ou 1:10. Devido ao método de construção empregado, a relação obtida via este transformador apresenta incerteza muito baixa, da ordem de  $10^{-8}$ .



Fig. 5 Divisor Indutivo de Tensão

Este auto-transformador, também com núcleo de supermalloy, foi construído de forma que o primeiro estágio apresenta enrolamento *boot-lace* e possui uma blindagem de folha de cobre.

Após a construção do primeiro estágio, foi acrescentado outro núcleo ao DIV para a construção do segundo estágio, este apresentando enrolamento tipo corda de 12 fios. A construção do DIV pode ser vista na figura 5. O tipo de enrolamento usado permite que os transformador possua diversas saídas, com relação de ganho entre 1 e 11, permitindo a calibração de impedâncias com valores nominais diferentes.

Da mesma forma que o transformador de alimentação o DIV conta com uma blindagem cilíndrica de alumínio, usada tanto como blindagem eletrostática como para proteção mecânica do transformador, além de uma blindagem magnética de mumetal e um sistema de proteção contra choques mecânicos.

Este divisor necessita ser calibrado, por um sistema também em fase de desenvolvimento no Lacin, para a determinação de seu ganho.

### 5. CONCLUSÃO

Está sendo desenvolvida pelo Lacin uma ponte coaxial de quatro terminais. Esta ponte apresenta incertezas muito baixas, pois em sua construção são consideradas e corrigidas as principais fontes de erros nas medições, de resistores em AC e de capacitores de alto valor.

Até o momento foram construídos os principais transformadores usados neste sistema. Até o próximo ano o sistema deve estar montado e em fase de testes. Serão então realizadas comparações com outros laboratórios para a verificação da confiabilidade metrológica desta ponte.

Esta ponte também é parte fundamental da cadeia de rastreabilidade da unidade de capacitância ao Efeito Hall Quântico. Esta cadeia está em fase de construção pelo Lacin e deve entrar em operação em 2008, simultaneamente ao Efeito Hall Quântico, recém adquirido pelo Inmetro. Com a implementação deste sistema o Brasil passará a reproduzir a unidade de capacitância e a realizar calibração de resistores padrão e medidores de resistência em corrente alternada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a grande colaboração *do Laboratoire de Baisse Fréquences* – LNE, na pessoa do Dr. Alexandre Bounouh. Agrademos também a FINEP – Projeto Verde e Amarelo pelo apoio financeiro ao projeto.

Em memória do Dr. Èndre Tóth.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] E. Tóth, e outros, "Desenvolvimento de uma Ponte para Calibrar Resistores CA", Enqualab, Maio 2004.
- [2] B P Kibble, G H Rayner, "Coaxial AC Bridges", Adam Hilger Ltd, Techno House, 1984.