

Implantação da Padronização Primária de Resistência Elétrica DC Baseada no efeito Hall Quântico

Zulmara Virginia de Carvalho ¹, Hélio Schechter ², Janice de Brito Fernandes ³

¹ Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, zvcarvalho@inmetro.gov.br

² Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, hschechter@inmetro.gov.br

³ Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, jbferrandes@inmetro.gov.br

Resumo: O Laboratório de Resistência do Inmetro implantou um sistema de medição de resistências baseado no efeito Hall quântico. Testes estão sendo realizados com o intuito de tornar o sistema apto para calibração de resistores com incerteza relativa de algumas partes em 10^9 , alcançando um patamar de exatidão não disponível no país atualmente.

Palavras chave: padronização primária, efeito Hall quântico, confiabilidade metrológica, reprodução da unidade ohm.

1. INTRODUÇÃO

Em 1879 [1], ao aplicar um campo magnético perpendicular ao fluxo de uma corrente em uma fita condutora, o físico americano Edwin H. Hall verificou a existência de uma voltagem entre as duas bordas da fita, gerada pela separação de cargas produzida pelo campo. A resistência Hall (R_H , como ficou conhecida), definida pela relação entre essa voltagem transversal e a corrente, é diretamente proporcional tanto à corrente quanto ao campo magnético aplicado, enquanto a resistência elétrica longitudinal era invariante ao campo.

Um século depois, ao estudarem o efeito Hall em elétrons livres confinados em uma fina camada no interior de um semiconductor, K. von Klitzing, G. Dorda e M. Pepper descobriram o Efeito Hall Quântico (QHE) [2]. Eles demonstraram que R_H , medida em um transistor de efeito de campo em óxido metálico semiconductor (MOSFET, do inglês: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) de silício em baixas temperaturas (1,5 K) e em altos campos magnéticos (15 T) possui um comportamento diferente do medido em condições normais (ver figura 1): o crescimento da resistência transversal com o campo magnético apresenta platôs, onde R_H se mantém constante, independente do campo magnético. A resistência longitudinal, por sua vez, cai a zero quando R_H atinge um dos platôs. Esse comportamento é a consequência da quantização da energia de um gás de elétrons bi-dimensional (2DEG, da sigla em inglês) em presença de um campo magnético forte a baixas

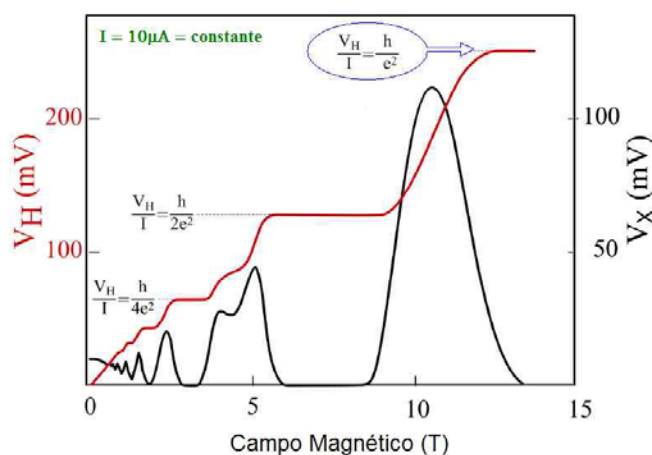


Fig. 1. Assinatura da resistência Hall e longitudinal de uma heteroestrutura GaAs/GaAlAs, em função do campo magnético de até 14 T, sob uma corrente constante de 10 μA . K. von Klitzing, comunicação particular.

temperaturas. O valor da resistência correspondente a um platô de ordem i é dado por

$$R_H = \frac{h}{ie^2}, \quad 01$$

onde h é a constante de Planck e e a carga do elétron. A resistência

$$\frac{h}{e^2} = 25\,812,807 \, \Omega, \quad 02$$

do primeiro platô ($i = 1$), é denominada constante de von Klitzing.

A partir da descoberta original, o efeito foi observado em vários dispositivos à base de heteroestruturas fabricadas a partir de três a cinco componentes semicondutores [3].

A existência de valores de resistência elétrica expressos como combinação de constantes universais torna o QHE propício ao uso em metrologia. Isso se harmoniza com a recomendação do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) de que as unidades básicas do SI sejam definidas em termos de constantes fundamentais, com o objetivo de prover um caráter universal às medidas obtidas nos Institutos Nacionais de Metrologia (INM's),

Nessa direção, os resistores padrão do Laboratório de Resistência (Lares) do Inmetro são, desde 1990, rastreados à referência padrão de resistência DC, baseada no efeito Hall quântico (QHE, da sigla em inglês), do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM).

Em 2008, o Lares implantou seu próprio sistema baseado no QHE, o que amplia sua confiabilidade metrológica, já que o transporte de resistores até o BIPM, com a consequente exposição dos mesmos a condições ambientais diversas durante a viagem, pode introduzir pequenos desvios em seus valores, que irão se somar às variações naturais que sofre um resistor com o tempo. Com a posse de um sistema próprio, o Lares pode atingir o mesmo patamar de competência técnica dos principais INM's, que reproduzem a unidade ohm com um nível de exatidão na ordem de 10^{-9} . O Lares é, no momento, o único laboratório do país a dispor de tal equipamento.

2. INFRA-ESTRUTURA

Com o objetivo de utilizar um dispositivo Hall como referência padrão de resistência DC, o Laboratório de Resistência Elétrica do Inmetro adquiriu em 2008 os seguintes equipamentos:

- um dispositivo Hall baseado em uma heteroestrutura de GaAs/GaAlAs;
- um criostato com um módulo de ^3He e
- um comparador criogênico de corrente – CCC.

2.1. Dispositivo Hall

Confeccionado na Universidade de Cambridge, o dispositivo Hall do Lares (figura 2), apresenta o centro do patamar $i = 2$ da quantização Hall em um campo magnético $B = 9,20 \text{ T}$, enquanto no campo $B = 4,62 \text{ T}$ se situa o centro do patamar $i = 4$.

Segundo certificado do *National Physical Laboratory* (NPL), as resistências de contato e a voltagem longitudinal nos referidos patamares apresentam resultados compatíveis com aquelas especificadas na publicação *Orientações técnicas revisadas para a realização de medidas de resistência Hall quantizada DC*, para um erro na resistência Hall menor que uma parte em 10^9 [4].

2.2. Criostato

O criostato, fabricado pela firma inglesa *Cryogenic Limited* (figura 3), possui um magneto supercondutor com placa lambda, com a qual é possível atingir 16 T , e um módulo de ^3He , com o qual é possível baixar a temperatura a 300 mK .

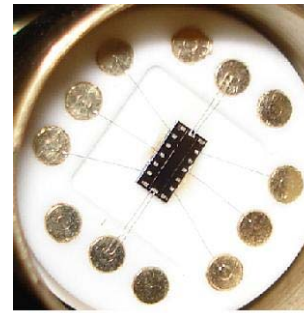


Fig. 2. Dispositivo Hall baseado em GaAs/GaAlAs.

O monitoramento da temperatura é feito por cinco termômetros localizados na base do criostato, na placa lambda e nos espaços: da bomba de sorção, do ancoramento 1 K e da amostra. O primeiro é monitorado por um multímetro HP 3458 e os demais por um controlador de temperatura *LakeShore*.



Fig. 3. O criostato (à direita) e a carga de ^3He .

2.3. Comparador Criogênico de Corrente

Para o aproveitamento máximo da exatidão dos valores de resistência elétrica fornecida por um dispositivo Hall quântico, é necessário que se use um Comparador Criogênico de Corrente – CCC – no lugar de uma ponte comparadora de resistências convencional, não criogênica.

A figura 4 mostra o esquema de um CCC. O princípio de funcionamento é o mesmo do de uma ponte comparadora comum, que mede a razão entre duas resistências detectando um sinal nulo de voltagem quando o produto da resistência pela corrente que a atravessa é o mesmo para os dois braços da ponte.

Como a medição da razão entre correntes não pode ser feita com boa exatidão, um outro setor do comparador faz essas correntes passarem em duas bobinas de número conhecido de espiras, adaptável para a relação em questão, de modo a tornar nulo o campo magnético total produzido pelas correntes. É neste aspecto que um comparador comum difere de um comparador criogênico. Neste último, as bobinas são mergulhadas em hélio líquido, de modo a torná-las supercondutoras, e a detecção da nulidade do campo é

feita com muito maior sensibilidade por um dispositivo supercondutor de interferência quântica (SQUID) que, na presença de um campo não-nulo, envia um sinal que realimenta uma das fontes de corrente, promovendo o reequilíbrio do sistema.

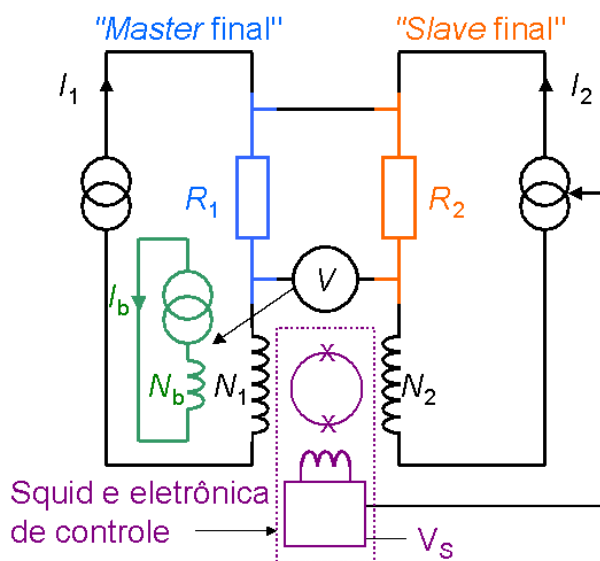


Fig. 4. Diagrama esquemático da ponte CCC. Correntes adequadas nos ramos denominados “Master” e “Slave”, fornecidas pelas suas respectivas fontes, produzem uma voltagem nula no nanovôltemetro e um campo magnético total nulo no CCC, detectado pelo SQUID.

Do CCC constam, uma ponta de prova que fica imersa no banho de hélio líquido e um aparato eletrônico, confeccionado pelo NPL, formado por quatro módulos: duas fontes de corrente isoladas; um nanovôltemetro e um sistema para monitorar e controlar os sinais do SQUID (figura 5).



Fig. 5. Eletrônica do CCC, resistor em temperatura controlada e Dewar de ^4He , onde fica a ponta de prova do CCC.

3. MEDIÇÕES

A tabela 1 mostra o resultado das primeiras medições efetuadas com o novo equipamento, onde o valor quantizado dos patamares $i=2$ e $i=4$ é utilizado na medição de um resistor de $100\ \Omega$. O software que controla as medições do

CCC apresenta o resultado final como a diferença entre o desvio em relação ao valor nominal do resistor padrão e o desvio equivalente do resistor desconhecido. No caso de o padrão ser o valor da resistência Hall em um dos patamares, o desvio correspondente é nulo por definição. Na tabela 1, cada um dos cinco desvios é a média de 12000 medições, feitas em 100 s durante o equilíbrio da ponte. A diferença encontrada entre a média dos dois casos é cerca de $0,05\ \mu\Omega/\Omega$.

Medida	100 Ω x QHR(4)		100 Ω x QHR(2)	
	Desvio ($\mu\Omega/\Omega$)	Incerteza ($n\Omega/\Omega$)	Desvio ($\mu\Omega/\Omega$)	Incerteza ($n\Omega/\Omega$)
01	-11,1088	1,26	-11,1331	5,60
02	-11,1074	1,38	-11,1361	5,28
03	-11,0948	1,23	-11,0730	5,96
04	-11,1088	1,26	-11,2027	5,31
05	-11,0813	1,25	-11,1782	5,23
Média	-11,0999	0,57	-11,1482	2,44

Tabela 1. Medidas da resistência de um resistor de valor nominal de $100\ \Omega$ por meio do QHE.

3.1. Cadeia de rastreabilidade

O valor da resistência da amostra Hall em um de seus platôs é geralmente usado para calibrar um resistor de $100\ \Omega$. A partir deste é possível com o CCC calibrar diretamente os resistores padrão de $1\ \Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$ do laboratório. Fora dessa faixa não é mais possível usar o CCC, e os demais resistores padrão do laboratório, o mais baixo de $100\ \mu\Omega$ e o mais alto de $1\ \text{G}\Omega$, devem ser calibrados usando pontes convencionais.

Nas medidas realizadas na faixa de $1\ \Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$ o programa de análise dos dados gerados pelo CCC aponta incertezas melhores que 1 parte em 10^9 . Na figura 6 vemos um exemplo de um conjunto de dados da medição de um resistor de $100\ \Omega$ utilizando como padrão um resistor de $10\ \text{k}\Omega$. No entanto, o desvio padrão de diversos conjuntos de medições é bem maior, variando de $10\ \text{n}\Omega/\Omega$ a $50\ \text{n}\Omega/\Omega$.

A incerteza acima não é, obviamente, a única presente ao valor final do resistor. Com um sistema de maior sensibilidade, fatores de influência normalmente pequenos podem se tornar fontes de incerteza apreciáveis. Tal é o caso da temperatura do resistor de $100\ \Omega$ a ser medido a partir do valor conhecido da resistência Hall padrão. Para minimizar a incerteza do valor medido desse resistor em relação a variações de temperatura, termômetros de boa qualidade calibrados, banhos estáveis e com baixo gradiente de temperatura, e resistores de baixos coeficientes térmicos são desejáveis. O Lares possui banho de óleo de estabilidade $<0,001^\circ\text{C}$ em 1 mês e gradiente máximo de $0,003^\circ\text{C}$, termômetros *Guildline* com resolução de $0,001^\circ\text{C}$ calibrados pelo Laboratório de Termometria do Inmetro, e um resistor de $100\ \Omega$ da Tinsley & Co de coeficientes de temperatura a

25°C , $\alpha = 0,11 \times 10^{-6}$, $\beta = -0,07 \times 10^{-6}$. Nessas condições podemos estimar que a temperatura não deve contribuir com uma incerteza maior do que alguns poucos $\text{n}\Omega/\Omega$. Outras fontes de incerteza, em particular a possível presença de erro sistemático no CCC, devem também ser investigadas.

Com o valor do resistor de $100\ \Omega$ determinado pela calibração primária, pode-se, a partir dele, determinar os valores dos resistores de $1\ \Omega$, $10\ \Omega$, $1\text{k}\Omega$ e $10\text{k}\Omega$. O valor da incerteza do resistor de $100\ \Omega$, determinada previamente, vai ser, naturalmente, uma componente de incerteza para essas novas calibrações.

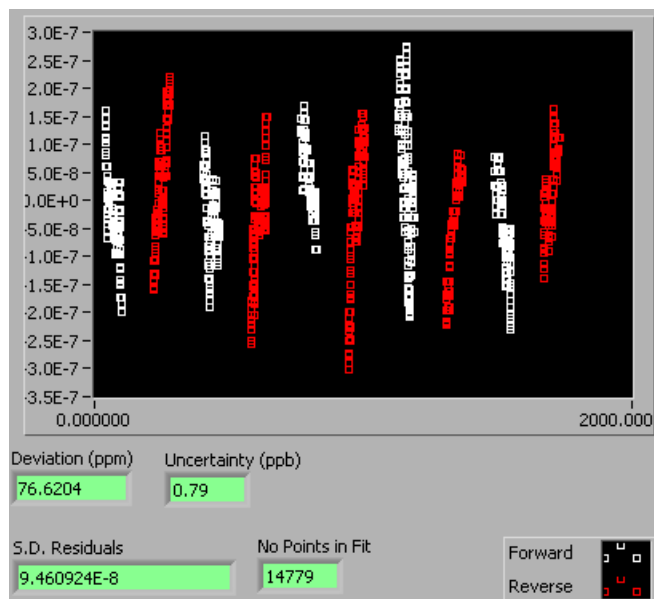


Fig. 6. Saída do programa de análise dos dados fornecidos pelo CCC para uma medição realizada entre resistores de $100\ \Omega$ e $10\text{k}\Omega$. Na ordenada são colocadas as voltagens necessárias ao equilíbrio da ponte. Nas abscissas são marcados os tempos de cada medição.

4. CONCLUSÃO

O sistema de medição baseado no efeito Hall quântico, implantado no laboratório de Resistência do Inmetro está operante. Contudo, vários testes são necessários para poder ser utilizado em nível metrológico na calibração de resistores. Um cuidado frequentemente necessário é a medição da resistência dos contatos da amostra Hall. Contatos ruins são caracterizados por uma resistência alta, podendo ser causada por defeitos estruturais na metalização dos contatos.

No caso dos contatos de voltagem, outra possibilidade é o esvaziamento parcial do 2DEG. Dessa forma, uma redução local da concentração dos portadores de carga pode ser causada pelo resfriamento rápido do dispositivo; pela passagem de uma corrente superior a corrente crítica ou, alguma vezes, mesmo por deixar o dispositivo frio por muitos dias. Na maioria desses casos, as propriedades originais dos contatos são restauradas levando a amostra por algum tempo à temperatura ambiente ou iluminando a mesma com um pulso curto de luz infravermelha [4].

Outro teste importante é a da voltagem longitudinal do dispositivo quando a resistência transversal R_H se encontra em um platô. Ela deve ser, no melhor dos casos, não-mensurável, ou seja, ter um valor menor do que a resolução do nanovôltemetro empregado.

AGRADECIMENTOS

Aos doutores Thomas Holubar e Alejandra Tonina pelas discussões, sempre esclarecedoras.

REFERÊNCIAS

- [1] E. H. Hall, "On a new action of the magnet on electric currents", *Am. J. Math.* Vol 2, pp. 287-292, 1879.
- [2] K. von Klitzing G Dorda and M. Pepper, "New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, no. 6, pp. 494-497, 1980.
- [3] F. Delahaye, D. Dominguez, F. Alexandre, J. P. Andre, J. P. Hirtz and M. Razeghi, "Precise Quantized Hall Resistance Measurements in $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Heterostructures", *Metrologia*, vol. 22, pp. 103-110, Springer-Verlag, 1986.
- [4] F. Delahaye and B. Jeckelmann, "Revised technical guidelines for reliable DC measurements of the quantized Hall resistance", *Metrologia*, vol. 40, pp. 217-223, 2003.