



## ESTABELECIMENTO DE REQUISITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM RESISTOR VIRTUAL PROGRAMÁVEL E APLICÁVEL COMO PADRÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA CC

VINICIUS COUTINHO DE OLIVEIRA

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia e Tecnologia (PPGMT) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)

### Resumo

Este projeto tem o objetivo de estabelecer requisitos para se desenvolver um resistor virtual, cujo valor nominal pode ser programado pelo usuário. O paradigma das calibrações é utilizar artefatos, cujos valores de resistência elétrica são modelados pelas dimensões e resistividade dos materiais que os compõem e efeitos ambientais como temperatura e pressão. Este projeto, por sua vez, consistirá num conjunto de *hardware* e *software* (o resistor virtual) capaz de realizar um sistema de controle que emula um artefato. Para consecução do objetivo geral, foram estabelecidos como objetivos específicos: (1º) efetuar a modelagem matemática do sistema; (2º) definir a plataforma computacional e implementar o *software* do subsistema de controle; e (3º) definir as premissas do projeto de *hardware*. Neste trabalho, são discutidos os resultados da parte de modelagem matemática obtidos até outubro de 2025, relacionados ao desenvolvimento de uma metodologia original de modelagem de pontes comparadoras criogênicas de corrente.

### Material e Métodos

**Comparador criogênico de corrente (CCC):** circuito em ponte (Figura 1) que mede a razão entre dois resistores  $R_1$  e  $R_2$  em função da razão  $r$  entre as correntes  $I_1$  (corrente de *master*) e  $I_b$  (corrente de *balance*), conforme a Equação (1) [1][2][3].

$$r = \frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1}{N_2} \left( 1 - \frac{I_b}{I_1} \frac{N_b}{N_1} \right) \quad (1)$$

As flutuações experimentalmente observadas de  $I_1$  são incorporadas às variações de  $I_b$  graças aos controles do CCC. Perguntas respondidas nesta pesquisa:

- Qual a distribuição de probabilidade de  $I_1$ ?
- O quanto da variabilidade de  $r$  se deve a  $I_1$ ?

A modelagem compreendeu o mapeamento dos fatores de influência sobre o ruído de  $I_b$  e o cálculo estimado deste ruído a partir de um modelo matemático original, cujas entradas são conhecidas pelo operador quando da execução de uma medição. São exemplos dessas variáveis de entrada: o tempo de medição,  $\tau$ ; os valores de  $R_1$  e  $R_2$ ; a faixa da corrente  $I_1$  aplicada durante a medição; e a força eletromotriz (FEM) térmica decorrente de cabos e conexões.

### Resultados e Discussão

Para validação do modelo matemático proposto, foram comparados os resultados por ele produzidos com dados de medição coletados para um tempo de medição  $\tau$  de 20 s. De modo geral, a validade do modelo pode ser confirmada, conforme se vê na Figura 2.

#### Algumas constatações feitas durante a pesquisa:

- Nem sempre as correntes de *master* são aderentes à distribuição gaussiana.
- Nem sempre as correntes de *master* são constantes ao longo de uma medição.
- Nas avaliações preliminares do modelo matemático proposto, os desvios padrão da corrente de *balance*, frequentemente, eram maiores do que os dos dados reais de medição.
- Existe uma prevalência de componentes de ruído não branco. Além das fontes de ruído não branco do CCC já descritas na literatura, a corrente  $I_1$  também exibe este comportamento em certas faixas e certos tempos de medição.

As constatações acima motivaram a avaliação da incerteza adotando desvio de Allan no lugar do desvio padrão clássico, o que foi a chave para a validação do modelo.

Para  $\tau = 20$  s, a componente de maior influência é o ruído da fonte de corrente de *master*. No entanto, quando  $R_1$  é de 1  $\Omega$  ou 10  $\Omega$ , o ruído da FEM térmica oriunda de cabos e conexões não pode ser desprezado.

Para  $\tau = 100$  s e  $R_1 = 1$   $\Omega$ , também é considerável o ruído do SQUID, podendo este assumir a mesma ordem de grandeza dos ruídos de  $I_1$  e da FEM térmica; já para este tempo de medição e  $R_1 > 1$   $\Omega$ , prevalece apenas o ruído da corrente de *master*.

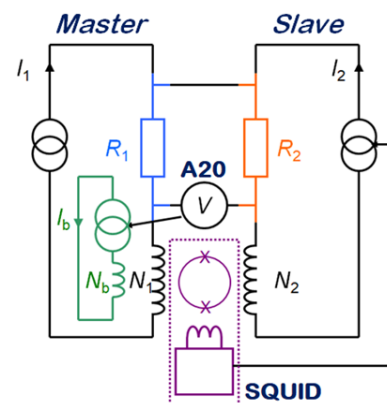


Figura 1: Diagrama do comparador criogênico de corrente (CCC).

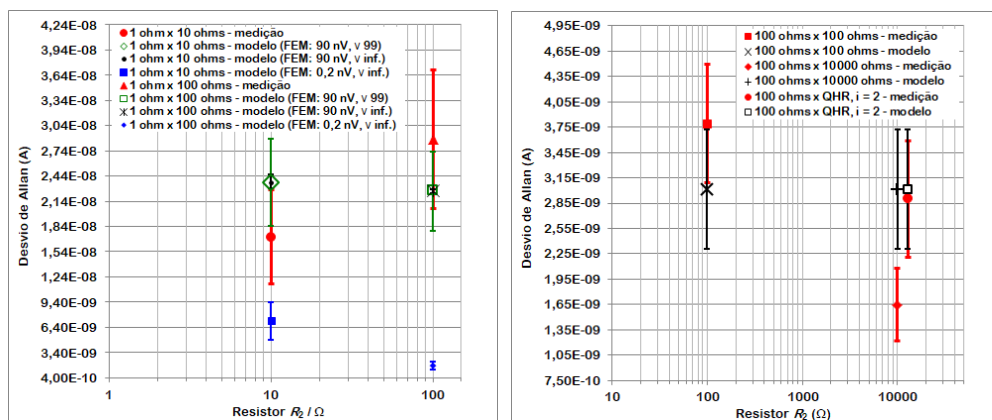


Figura 2: Resultados da comparação entre o ruído da corrente  $I_b$  (expresso em termos de desvio de Allan) estimado pelo modelo e o ruído de  $I_b$  nos dados das medições para um tempo de medição  $\tau$  de 20 s; à esquerda,  $R_1 = 1$   $\Omega$ ; à direita,  $R_1 = 100$   $\Omega$ .

### Conclusões

Foi desenvolvido um modelo matemático do ruído do CCC o qual atende tanto às necessidades do projeto (possibilitando integração futura com o modelo matemático do resistor virtual) quanto a outras aplicações práticas. Pode-se concluir, também, que o desvio padrão clássico majora a medida de dispersão da corrente de *balance*; portanto, deve-se adotar, em seu lugar, o desvio de Allan.

A contribuição científica que se busca trazer por meio desta pesquisa inclui os pontos a seguir:

- Descrição pormenorizada das componentes de ruído do CCC e das suas contribuições para o ruído total.
- Caracterização das correntes de *master*, ausente na literatura.
- Desenvolvimento de um método original para elaboração de modelos matemáticos capazes de estimar o ruído de CCCs.

### Agradecimento

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio do projeto aprovado na chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2021, processo nº 422919/2021-7.

### Referências

- [1] WILLIAMS, J. M.; JANSSEN, T. J. B. M.; RIETVELD, G.; HOUTZAGER, E. An automated cryogenic current comparator resistance ratio bridge for routine resistance measurements. *Metrologia*, v. 47, n. 3, p. 167, 2010.
- [2] WILLIAMS, J. M. Cryogenic current comparators and their application to electrical metrology. *IET Science, Measurement and Technology*, v. 5, n. 6, p. 211–224, 2011.
- [3] DE OLIVEIRA, V. C.; LANDIM, R. P.; PRADO, C. B. A closer look at the mathematical model of a cryogenic current comparator. XV Semetro, 2023, Petrópolis. *Proceedings* [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2023, p. 306926. Disponível em [https://metrologia2023.org.br/?page\\_id=6173](https://metrologia2023.org.br/?page_id=6173)