

COMPARAÇÃO DE PADRÕES DE TENSÃO DE JOSEPHSON ENTRE O INETI E O BIPM

Luís Ribeiro, Mário Nunes *
Dominique Reymann, Stéphane Solve **

* INETI-LME, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal

** BIPM, Pavillon de Breteuil, F- 92312 Sèvres Cedex, France

RESUMO

Foi realizada uma comparação bilateral de padrões de tensão Josephson entre o INETI e o BIPM, ao nível dos 10 V, em Março de 2006, cujos resultados são parte integrante de uma comparação chave internacional, referência BIPM.EM-K10.b, sendo a primeira comparação realizada após a implementação em 2004 do padrão primário de tensão DC baseado no efeito Josephson no Laboratório de Medidas Eléctricas (LME).

Os resultados considerados excelentes, apresentaram uma concordância de 0,8 nV, com uma incerteza global de 2,6 partes em 10^{10} .

Palavras-chave: Efeito Josephson, metrologia, tensão DC, comparações, padrões, graus de equivalência

INTRODUÇÃO

No âmbito do programa de comparações bilaterais *in-situ* de padrões de tensão de Josephson [^{1,2}] organizado pelo BIPM, foi possível participar numa comparação chave, utilizando um protocolo, em que o *array* do sistema Josephson transportável desenvolvido pelo BIPM é directamente comparado com o *array* utilizado pelos Laboratórios participantes, utilizando os procedimentos próprios para calibração de Zeners. A única premissa necessária é a possibilidade de providenciar um degrau estável, com baixo ruído e a um valor nominal de 10 V. A comparação decorreu nas instalações do LME no INETI, entre os dias 9 e 14 de Março de 2006 [³].

SISTEMAS JOSEPHSON UTILIZADOS

Descrição do sistema do INETI-LME

Equipamento

O sistema implementado tem como núcleo central a utilização de componentes adquiridos a instituições de IDT ligadas de alguma forma à metrologia, nomeadamente os *arrays* e a electrónica de controlo, aos quais se acrescentaram componentes adquiridos no mercado a diversos fornecedores. Esta abordagem veio tornar possível a sua aquisição e integração à medida das necessidades concretas, permitindo também uma adequação à realidade orçamental do LME [⁴].

O sistema está assim constituído:

Data da implementação	Março / 2004	Setembro / 2004
Tipo de arrays	1V	10 V
desenvolvido por	IPHT - JENA	
ensaiado por		PTB [⁵]
tecnologia	SIS	
nº de junções	2400	19700
dimensão das junções	50 x 50 mm	22 x 32 mm
dimensão do array	5 x 19 mm	10 x 24,5 mm
corrente crítica mínima	220 mA	90 mA
Detector	Agilent 34420A	
escalas usadas	10 mV	100 mV
Fonte de polarização	IPBS - JJ desenvolvido pelo NPL	
software de controlo	desenvolvido pelo NPL	
Referência de frequência	10 MHz disciplinada por GPS	
estabilização	EIP 578B com lock interno	
Micro ondas	75 GHz Farran/Millitech/Quinstar	
Determinação do nº do degrau	Agilent 3458A	
Seleção das ref's a calibrar	scanner DataProof	
Interface GPIB	ópticamente isolada	

Aplicações Informáticas

A fonte de polarização é opticamente isolada e programável através de uma aplicação informática desenvolvida pelo NPL [⁶] a partir da qual é possível controlar a polarização do *array*, visualizar as respectivas curvas *IV*, determinar a corrente crítica e o número inteiro correspondente à estabilização do degrau obtido.

No LME foram desenvolvidos quatro módulos informáticos em ambiente de desenvolvimento gráfico LabView, para controlo e automatização de todo o processo de medição:

- Módulo de controlo da instrumentação;
- Módulo de análise para a resolução do modelo matemático implementado;
- Módulo do cálculo de incertezas;
- Módulo de gestão de dados.

Descrição do sistema do BIPM

O sistema transportável desenvolvido pelo BIPM era constituído por: Sonda criogénica com *array* Hypres de 10 V de tecnologia SIS, equipamento de micro-ondas e fonte de polarização, díodo de Gunn estabilizado por um contador EIP 578 e estabilizador ETL/Advantest. Para a visualização da curva característica do *array* foi utilizado um amplificador de isolamento entre o *array* e o osciloscópio; durante as medições o *array* estava desligado da instrumentação. Para a verificação da estabilidade dos degraus foi utilizado um voltímetro digital HP 34401A.

PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Nesta comparação, o sistema do INETI-LME foi utilizado para medir a tensão do *array* do BIPM, tal como numa normal calibração de uma referência electrónica de tensão. Durante a comparação, apenas a polaridade das fontes de polarização de ambos os *arrays* eram invertidas, mantendo o comutador de baixo ruído térmico de interligação, sempre na mesma polaridade. Ambos os sistemas mantiveram-se flutuantes em relação à terra.

A determinação do valor do *array* do BIPM foi realizada através da utilização dos módulos aplicacionais desenvolvidos no LME. Após a estabilização dos dois *arrays* em degraus de valor nominal aproximado, eram programados seis conjuntos de leituras de polaridades contrárias, a partir da determinação da média móvel dos últimos 15 pontos com uma validação 10 nV representado pelo desvio padrão daquele conjunto. É também contemplada pela aplicação, a determinação do número do degrau estabilizado e do valor da frequência de micro-ondas e respectiva potência.

MEDIÇÕES

Não foram detectadas quaisquer dificuldades em obter degraus com estabilidade suficiente para a realização das medições, quer no sistema transportável do BIPM quer no sistema instalado no INETI-LME. A interligação dos sistemas levantou a necessidade de refazer algumas ligações de pontos comuns de terras.

Bastou o conjunto de medições realizadas no primeiro dia para comprovar o desempenho do sistema instalado no INETI-LME. Aproveitaram-se os três dias subsequentes para realizar alguns melhoramentos, com resultados visíveis na evolução da componente tipo A (tabela 1), nomeadamente, i) através da introdução de

um filtro no circuito de interligação entre os dois *arrays*, por forma a diminuir o ruído provocado pelo comutador de ligação, ii) através da introdução de um condensador nos fios de ligação ao *array* INETI-LME, para aumentar a estabilidade dos degraus e iii) através de uma alteração no algoritmo implementado por forma a permitir ligar e desligar o filtro digital no detector durante o processo de medição.

Tabela 1 Evolução da diferença para o valor teórico BIPM e da componente de incerteza tipo A, face aos ajustes implementados no sistema INETI-LME, ao longo dos quatro dias de comparações.

	Δ (nV)	S (nV)
dia 1	-59,3	13,5
dia 2	-7,1	6,8
dia 3	0,4	4,6
dia 4	0,4	2,4

em que $\Delta = (U_{\text{INETI-LME}} - U_{\text{BIPM}}) / U_{\text{BIPM}}$

e S = desvio padrão experimental da média

Foi também observado que a estabilidade dos degraus do sistema INETI-LME é fortemente influenciada pela potência de micro-ondas proveniente do díodo Gunn. A possibilidade de utilizar um sistema de frequência variável, tornou possível o estudo do melhor ponto de funcionamento, na gama de 72 a 75GHz.

O estudo pormenorizado de cada conjunto de medições (figura 1) que levam à determinação de um resultado, permite verificar o valor e a estabilidade das forças electromotrizas de origem térmica (EMF). Este valor, estimado em 200 nV, é anulado pela inversão das polaridades de ambos os *arrays* durante as medições. O valor da estabilidade está incluído no cálculo da incerteza de tipo A.

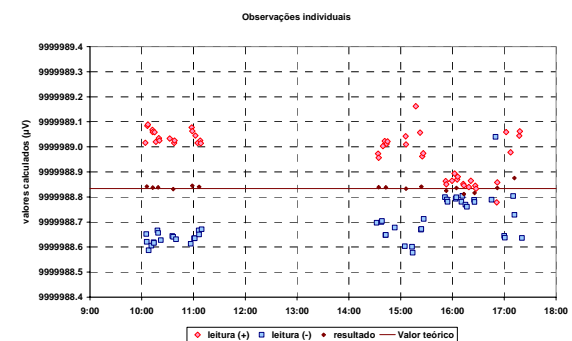


Figura 1 Gráfico da análise pormenorizada às observações individuais realizadas no dia 4

INCERTEZAS E RESULTADOS

Para esta comparação, foram consideradas como fontes de incerteza de tipo B [7]: os valores absolutos de frequência medidos pelos contadores, resistências de fuga nos circuitos e ganhos e linearidades do detector. Como se pode ver na tabela 2, as resistências de fuga

são as que têm maior contribuição. Os efeitos que advêm da não linearidade do detector, estabilidade da frequência, bem como os efeitos de origem térmica no circuitos, estão contabilizados na incerteza de tipo A das medições. Uma vez que ambos os sistemas utilizaram a mesma referência de frequência de 10 MHz, proporcionada pela referência de frequência disciplinada por GPS, as incertezas dos contadores não foram incluídas.

Tabela 2 Componentes para a estimativa da incerteza de tipo B.

	Incerteza / nV	
	INETI-LME	BIPM
Frequência	0,2	0,2
Resistência de fugas	3,6	0,4
Detector	2,9	-
Total	4,6	0,4

A figura 2, mostra os desvios para o valor teórico de referência, representado pelo valor do BIPM, associados a barras de erro que representam os desvios padrão para cada observação. O tracejado [—] representa o desvio padrão experimental da média (com um valor de 2,6 nV) e o tracejado [- -] o desvio padrão das medições (14,4 nV), ambos a 1σ .

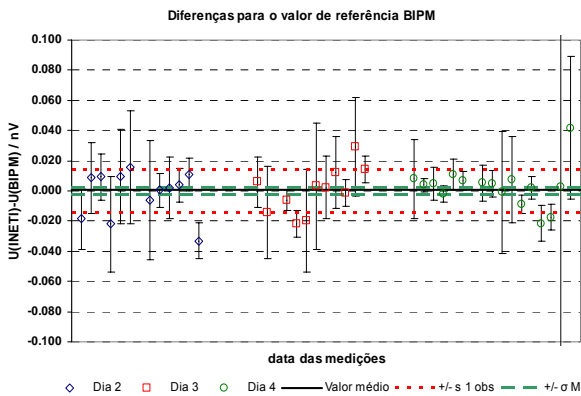


Figura 2 Gráfico global dos resultados obtidos

O resultado final da comparação contemplando todas as leituras efectuadas, pode ser expresso em termos da diferença relativa entre os valores que seriam atribuídos ao array Josephson de 10 V pelo INETI-LME ($U_{INETI-LME}$), e o seu valor teórico (U_{BIPM}).

$$(U_{INETI-LME} - U_{BIPM}) / U_{BIPM} = 0,8 \times 10^{-10}$$

e

$$u_c / U_{BIPM} = 4,6 \times 10^{-10}$$

em que u_c é a incerteza padrão combinada.

ENQUADRAMENTO INTERNACIONAL

Os resultados de todas as comparações chave, nas diversas áreas metrológicas, alimentam uma base de dados, de consulta livre, no sítio do BIPM (<http://kcdb.bipm.org>), suporte do Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA) de padrões Nacionais e dos certificados de calibração emitidos pelos Institutos Metrológicos Nacionais (NMI's).

Os resultados da comparação aqui apresentada, fazem parte de um conjunto de comparações com outros laboratórios primários, cujos dados integram uma comparação chave na área de tensão DC, de valor nominal de 10 V com a referência BIPM.EM-K10.b, coordenada pelo BIPM.

A figura 3 mostra os graus de equivalência determinados para cada laboratório participante, tendo como referência chave de comparação, o valor atribuído pelo BIPM ao padrão circulante.

O grau de equivalência de cada laboratório em relação ao valor de referência é dado pelo par de termos [D_i , U_i], ambos expressos em nV, em que $D_i = x_i$ associado à sua incerteza expandida ($k=2$) e $U_i = 2u_i$, com x_i representando a medição levada a cabo por cada laboratório participante e u_i representando a incerteza combinada de x_i .

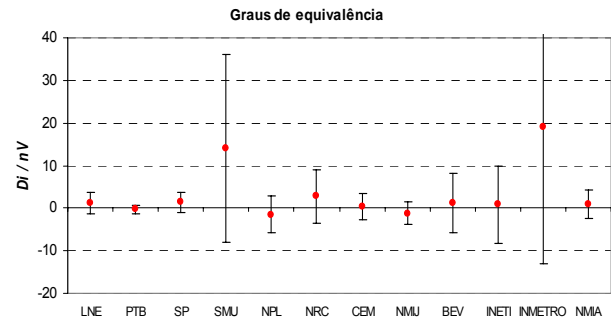


Figura 3 Graus de equivalência associado à incerteza expandida para cada laboratório participante na comparação chave BIPM.EM-K10.b

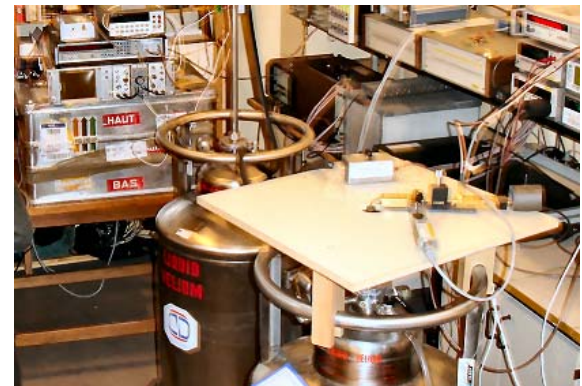


Figura 4 Montagem dos sistemas em comparação

CONCLUSÕES

A possibilidade de realizar uma medição directa com outro sistema Josephson, permitida por esta comparação bilateral, foi determinante na correcção de pequenos detalhes de ordem técnica, nomeadamente no ajuste de parâmetros de trabalho e no algoritmo implementado, no sistema do INETI-LME. A necessidade destes pequenos ajustes só deste modo eram passíveis de ser evidenciados, dadas as limitações impostas pelos níveis de estabilidade das referências electrónicas de tensão.

Questões como o estudo da melhor frequência do trabalho do *array*, optimização do filtro digital usado no detector, minimização de resistências de fuga nos circuitos de ligação utilizados, são parâmetros para os quais estão agora criadas condições de investigação e evolução, com vista à optimização do sistema.

Os resultados desta comparação, para além de demonstrarem a capacidade e adequação do sistema do INETI-LME para realizar medições ao nível dos 10 V, vão permitir actualizar a base de dados do MRA no que concerne às Capacidades de Medição e Calibração (CMC's).

AGRADECIMENTOS

Os autores, Mário Nunes e Luís Ribeiro, agradecem a disponibilidade e o empenho dos co-autores Dominique Reymann e Stéphane Solve, nas ajudas técnicas que levaram à optimização do sistema e permitirão desenvolvimentos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] *Josephson Voltage Standards – Recommended Intrinsic/Derived Standards Practice*, RISP-1, January 2002, available from the National Conference of Standards Laboratories, USA.
- [2] Pöpel, R., *The Josephson Effect and Voltage Standards*, Metrologia, 1992, 29, 153-174.
- [3] Reymann R., Solve S., Nunes M.C., Ribeiro L.F., *Comparison of the Josephson voltage standards of the INETI and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K10.b)*, <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/rapportBIPM/2006/03.pdf>, 11 pp.
- [4] Ribeiro, L., Nunes, M., *Implementação do Efeito de Josephson no Laboratório Primário Português para as Grandezas Eléctricas*; 6º Seminário Internacional de Metrologia Eléctrica, Setembro de 2005, Rio de Janeiro, Proceedings, 38-41.
- [5] Behr, R., Schulze, H., Müller, F., Kohlmann, J., Niemeyer, J., *Josephson Arrays at 70 GHz for Conventional and Programmable Voltage Standards*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 2, pp. 270-273, April 1999.
- [6] Janssen, J-T, Williams, J *Isolated Programmable Bias Source (IPBS001 – User's Guide)* Manual version 002, 27/10/2003.
- [7] EA-4/02 *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, December-1999.

AVISO LEGAL - Alguns equipamentos, instrumentos ou materiais são identificados neste documento por forma a especificar os procedimentos experimentais. Tal identificação não implica que sejam os mais adequados ao propósito descrito nem qualquer recomendação ou aprovação por parte dos autores.