



IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA JOSEPHSON DE TENSÃO PROGRAMÁVEL NO INMETRO

Regis P. Landim¹, Mariella Alzamora², Vitor Ferreira³, Edson Afonso⁴

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

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

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

⁴ Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, eafonso@inmetro.gov.br

Resumo: Neste artigo, é descrita a implantação (em andamento) de um Sistema Josephson Programável no Inmetro. Com tal sistema, será possível reduzir as atuais incertezas de comparação direta entre sistemas Josephson em tensão contínua, dos atuais $1,76 \times 10^{-10}$ V/V para algumas partes em 10^{11} V/V, além de gerar tensões alternadas.

Palavras-chave: Josephson, programável, sistema-padrão, tensão.

1. INTRODUÇÃO

A unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) para força eletromotriz, ou tensão elétrica, é definida como: “O volt é a diferença de potencial elétrico que existe entre dois pontos de um fio condutor transportando uma corrente constante de 1 ampère, quando a potência dissipada entre esses pontos é igual a 1 watt”. A realização em alta exatidão do volt, diretamente, em termos de sua definição é difícil e demorada [1].

Antes de 1972, em vez da realização, muitos laboratórios costumavam atribuir valores a bancos de célula Weston cuidadosamente estabilizadas, como uma reprodução do volt. Assim, tais bancos “lembravam” o resultado da realização do volt do SI [2].

As células de Weston são dispositivos eletroquímicos que fornecem valores de tensão relativamente estáveis se certas condições são atingidas (elas devem estar em repouso, para manter o equilíbrio da solução eletroquímica, sua temperatura, umidade e pressão devem estar dentro de certos limites, e nenhuma corrente deve ser drenada delas, a fim de evitar danos permanentes). Apesar disto, os valores atribuídos precisavam ser atualizados periodicamente, devido à sua deriva. Neste caso, as células Weston precisavam ser transportadas a fim de serem calibradas, e transportadas de volta ao laboratório de origem. Tal transporte perturbava o equilíbrio eletroquímico da célula, mudando seu valor temporariamente, levando algumas semanas em repouso para nova estabilização (após cada etapa de transporte), o que tornava o processo de calibração de tais padrões bastante demorado.

Em 1962, B. Josephson, descobriu equações para a corrente e tensão através de uma junção consistindo de dois supercondutores separados por uma fina barreira isolante

[2]. De acordo com estas equações, se uma corrente de frequência f for aplicada através desta junção (chamada “junção Josephson”), a tensão V fornecida pela junção é calculada por $V = f/K_{J-90}$, onde K_{J-90} é a constante Josephson, igual a 483.597,9 GHz/V. Já que a estabilidade de tal junção é muito melhor do que a estabilidade das células Weston, no início dos anos 70, muitos Institutos Nacionais de Metrologia (INMs) passaram a usar o efeito Josephson como um padrão prático de tensão [2].

A partir das junções Josephson, foram desenvolvidos os Padrões de Tensão Josephson (JVS), tornando a calibração de padrões de tensão mais rápidas e exatas. Como pode ser visto em [2], muitas melhorias foram feitas nos JVSs, desde o JVS de junção simples (que fornecia de um a dez milivolts) até o JVS de múltiplas junções (capaz de gerar até 12 V). Cada uma destas junções, ao ser irradiada de maneira adequada por microondas, responde com a geração de alguns degraus estáveis de tensão. O circuito de polarização define quantos destes degraus serão ativados, de modo a contribuir para a tensão de saída da junção. De acordo com a escolha da corrente de polarização (positiva, nula, ou negativa), a junção apresentará nos seus terminais uma tensão positiva, nula ou negativa, respectivamente. M destas junções são ligadas em série, formando um grupo. Neste caso, a tensão fornecida por esse tipo de sistema (chamado de “JVS convencional”) é calculada por:

$$V = P \cdot \frac{n \cdot f}{K_{J-90}} \quad (1)$$

onde: n é o número de degraus ativos do grupo de junções, $n = 0, \dots, M$.

P é a polaridade da corrente de polarização.

O JVS convencional, no entanto, tem duas desvantagens importantes: (1) o número de degraus não pode ser rapidamente definido para um valor desejado e (2) o ruído eletromagnético pode causar transições espontâneas entre os degraus [2]. A fim de solucionar estes problemas, uma das soluções propostas foi um JVS Programável (PJVS), que pode produzir tensões cc estáveis e programáveis. Neste caso, são usadas junções não-histeréticas. Cada uma destas junções, ao ser irradiada de maneira adequada por microondas, responde com a geração de três degraus estáveis de tensão (+1, 0 e -1, figura 1). De acordo com a escolha da corrente de polarização (+I, 0 ou -I), a junção apresentará nos seus terminais uma tensão positiva, nula ou

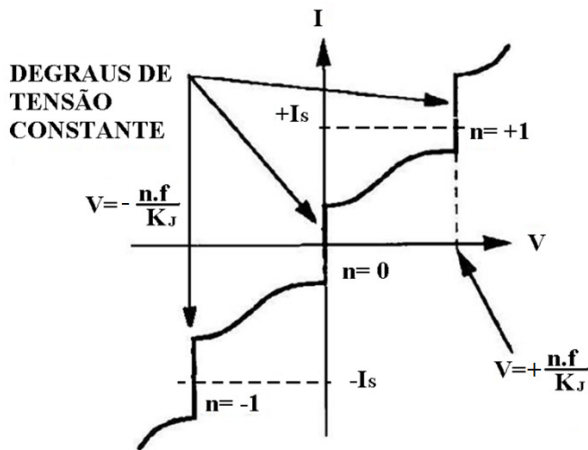


Figura 1: Curva I-V de uma junção única com a potência de microondas ajustada para equalização da amplitude dos degraus $n = 0$ e $n = \pm 1$ [2]

negativa, respectivamente. M destas junções são ligadas em série, formando um grupo, que é dividido em pequenos subgrupos de junções. A tensão de saída de cada um destes subgrupos também é dada pela eq. 1. Como cada um desses subgrupos é ligado em série e podem ser independentemente polarizados nos degraus +1, 0 ou -1, a tensão de saída pode ser programada, adicionando ou subtraindo-se a tensão de cada subgrupo. Assim, uma combinação dos degraus +1, 0 ou -1 de cada subgrupo (ou um "estado" dos subgrupos) pode ser programada e irá resultar em uma dada tensão de saída (figura 2).

Se uma sucessão muito rápida desses estados for programada, o PJVS pode gerar uma sucessão de tensões cc, sintetizando tensões ca. Tal característica dos PJVS tem sido usada para muitas outras aplicações, como comparações cc de reversão rápida entre as fontes cc Josephson e conversores térmicos de tensão, e depois como gerador de formas de onda senoidais para medições altamente exatas de medições de diferença ac-dc em frequências até 1 kHz, assim como aplicação de técnicas de sintetização de formas de onda a partir de degraus de tensão, para o desenvolvimento de padrões de potência quânticos [2].

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) é o INM brasileiro responsável pela manutenção, realização e disseminação das unidades do SI, bem como pela guarda, preservação e rastreabilidade dos padrões nacionais das grandezas relacionadas. Com relação à tensão elétrica contínua, de acordo com a nova estrutura da Diele, a realização do volt é responsabilidade do Laboratório de Resistência (Lares), da Divisão de Metrologia Elétrica (Diele), que faz parte da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial (Dimci) do Inmetro. Nesta nova estrutura, o Lares passará a se chamar de "Laboratório de Metrologia Elétrica Quântica (Lameq). Mais detalhes da mudança estrutural na Diele podem ser vistos em [3].

Em 1998, o Inmetro implementou o seu primeiro sistema JVS convencional, capaz de fornecer 1,018 V, em colaboração com o National Institute of Standards and Technology (NIST). Atualmente, o Inmetro utiliza um segundo JVS, que trabalha até 12 V, para fornecer rastreabilidade em tensão cc ao SI (figura 3).

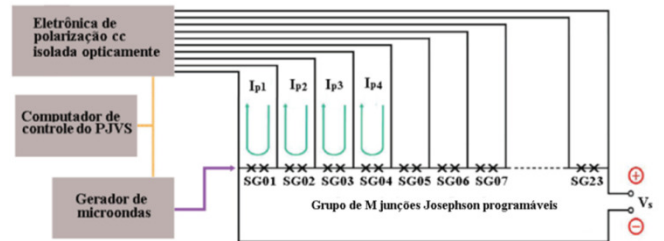


Fig. 2. Sistema Josephson de Tensão Programável (adaptado de [4])

O sistema JVS do Inmetro é usado rotineiramente para calibrar padrões do tipo Zener, e é projetado para funcionar de forma totalmente automática, uma vez que o operador tenha ajustado os parâmetros do sistema (a frequência e o nível de potência de microondas). Os padrões de trabalho Zener também fazem parte do Sistema de Calibração de Padrões de Referência de Tensão cc, utilizado para calibrar Zeners de clientes do Inmetro (figura 3).

Em colaboração com o NIST, o Inmetro está implantando um sistema PJVS no país. Com isto, será possível reduzir as atuais incertezas de comparação direta em tensão contínua entre o sistemas Josephson do Inmetro e o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), dos atuais $1,76 \times 10^{-10}$ V/V para a ordem de algumas partes em 10^{11} V/V. Além disso, espera-se utilizá-lo em calibrações de pilhas (reduzindo o tempo das calibrações, por fornecer tensões mais estáveis do que o JVS) e em pesquisas em aplicações cc e ca.

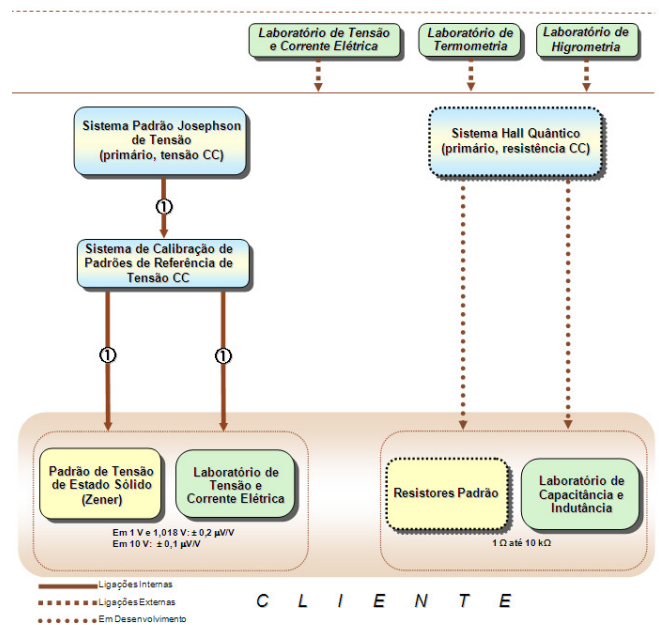


Fig. 3. Diagrama de Rastreabilidade do - Lares (Lameq)

2. O SISTEMA JOSEPHSON DE TENSÃO PROGRAMÁVEL DO INMETRO

O PJVS do Inmetro, quando estiver totalmente implantado, será composto por um chip de 10 V do NIST (montado na parte inferior de uma ponta de provas criogênica, dentro de uma blindagem magnética no final da mesma) dentro de um cilindro criogênico (Dewar) contendo hélio líquido, uma fonte de corrente programável (para

polarizar as junções Josephson), uma fonte de microondas (com indicador da potência e frequência aplicadas), um nanovoltímetro digital (para medições das tensões geradas pelo PJVS e para uso como detector de nulo), quatro padrões de tensão Zener (para serem usados como padrão de checagem), um scanner (para ligações automáticas entre o PJVS e os Zeners) e um computador com um programa de controle (para controle automático do sistema, elaboração de relatórios etc.). A referência de 10 MHz é fornecida por um relógio atômico de céσιο.

A figura 2 mostra um esquema simplificado do PJVS. Um grupo de 265.113 junções é dividido em 23 subgrupos (SG01 a SG23). Quando as junções são irradiadas por microondas, os seus respectivos três degraus (+1, 0 e -1) aparecem e se superpõem nos seus respectivos subgrupos. A tensão de saída de cada subgrupo é definida através das suas respectivas correntes de polarização (I_{p1} , I_{p2} , ..., I_{p23}). Assim, para uma corrente de polarização nula, a tensão do subgrupo será nula; para uma corrente de polarização no sentido da seta, a tensão do subgrupo será positiva; para uma corrente de polarização no sentido oposto ao da seta, a tensão do subgrupo será negativa. A tensão de saída é dada pela soma algébrica das tensões geradas por cada um dos 23 subgrupos.

Em cada ponto de operação do chip, composto pela frequência e pela potência de microondas irradiada, os subgrupos reagem de forma um pouco diferente. Isto significa que a corrente crítica das junções (e, conseqüentemente, dos subgrupos) varia com o ponto de operação, bem como a largura dos três degraus (+1, 0 e -1, quando da irradiação de microondas). Assim, os valores das correntes de polarização variam, para cada situação. Por este motivo, é necessário fazer a medição das larguras de cada um dos três degraus, para cada um dos subgrupos, para um determinado ponto de operação. A partir das larguras destes degraus, calcula-se os valores das correntes de polarização dos respectivos subgrupos (de forma que elas fiquem na metade dos degraus). Este é o processo de caracterização do sistema, e deve-se fazer isto no início de sua operação. Isto é feito automaticamente pelo sistema PJVS. O sistema CJVS, por outro lado, exige o ajuste manual do seu ponto de operação (potência e frequência), demandando um operador mais experiente neste tipo de ajuste. Mais detalhes sobre o sistema podem ser vistos em [4].

2.1. Geração de Tensões CC

Uma vez caracterizado o sistema, pode-se utilizá-lo para gerar vários níveis de tensão cc, desde algo em torno de 100 μ V até algo em torno de 10,5 V. Como os subgrupos estão todos ligados em série, a tensão gerada por cada um deles é somada, resultando na tensão de saída do grupo.

O conjunto de polarização de cada subgrupo é chamado de “estado” do subgrupo. Para uma dada frequência, cada estado está relacionado a uma única tensão de saída. Entretanto, um mesmo valor de tensão pode ser gerado por mais de um estado, para uma dada frequência. O programa de controle do PJVS utiliza um algoritmo de dois níveis para fazer a seleção do estado que irá gerar a tensão desejada. No primeiro nível, o programa cria duas tabelas (uma com os bits menos significativos e outra com os bits mais

significativos) que contêm todas as combinações possíveis e seus respectivos resultados (o número líquido de junções). Caso surja mais de um estado para gerar o mesmo número líquido de junções, o algoritmo escolhe o estado que polariza o menor número de junções. Uma vez montadas as duas tabelas, o programa está pronto para a utilização das mesmas no segundo nível. Neste caso, a partir do valor desejado de tensão de saída e a frequência de microondas utilizada, o programa seleciona, nas duas tabelas, o estado que gerará a tensão mais próxima da desejada. Para aproximar ainda mais a tensão gerada da tensão desejada, o programa permite uma pequena variação na frequência de microondas. Este método permite que a parte mais demorada no processo de seleção dos estados (primeiro nível do algoritmo) seja feita *off-line*, acelerando bastante o tempo de estabilização da tensão na saída do PJVS.

Na tabela 1, pode-se ver um exemplo de um estado dos subgrupos de junções PJVS, para gerar 10 V na frequência de 19,200 221 542 GHz. Neste caso, os subgrupos de M junções têm o seguinte estado: “0ppnnnp0ppppppppppppppp”, onde “p” representa +1 e “n” representa -1, referente à polaridade dos subgrupos (SG) 1 a 23, respectivamente, da esquerda para a direita. A tensão de cada subgrupo (V_{SG}) é dada pela eq. 1 e, somadas, resultam na tensão de saída $V_S=10,000000000$ V.

Tabela 1. Exemplo de um estado do subgrupo de junções PJVS, para frequência de, aproximadamente, 19,2 GHz

SG	Polaridade	n	V_{SG} (V)
23	+1	16800	0,667008111
22	+1	16800	0,667008111
21	+1	16800	0,667008111
20	+1	14958	0,593875436
19	+1	16797	0,666889003
18	+1	16800	0,667008111
17	+1	16800	0,667008111
16	+1	16800	0,667008111
15	+1	16800	0,667008111
14	+1	16800	0,667008111
13	+1	16800	0,667008111
12	+1	16800	0,667008111
11	+1	16800	0,667008111
10	+1	16800	0,667008111
9	+1	16800	0,667008111
8	0	8400	0,000000000
7	+1	6	0,000238217
6	-1	18	-0,000714652
5	-1	54	-0,002143955
4	-1	162	-0,006431864
3	+1	486	0,019295592
2	+1	1458	0,057886775
1	0	4374	0,000000000
V_S (V)			10,000000000

2.1. Geração de Tensões CA

O PJVS pode construir uma forma de onda alternada arbitrária através da geração de sucessivos e rápidos valores de tensão CC. Para isto, deve-se definir o tipo de forma de onda desejada na saída (valor de tensão rms ou de pico, frequência do sinal de saída, número de degraus que construirão a tensão). Com estas informações, o programa monta uma tabela com todos os estados (para cada um dos degraus), dentre os estados obtidos pelo algoritmo de seleção de estados visto na subseção anterior, e a envia para a memória da fonte de polarização. Esta fonte irá gerar, sequencialmente, as correntes necessárias para ajustar os subgrupos nos estados desejados.

A figura 4 mostra a forma de onda na saída do PJVS gerando uma senóide de 10 V de pico e 1 kHz.

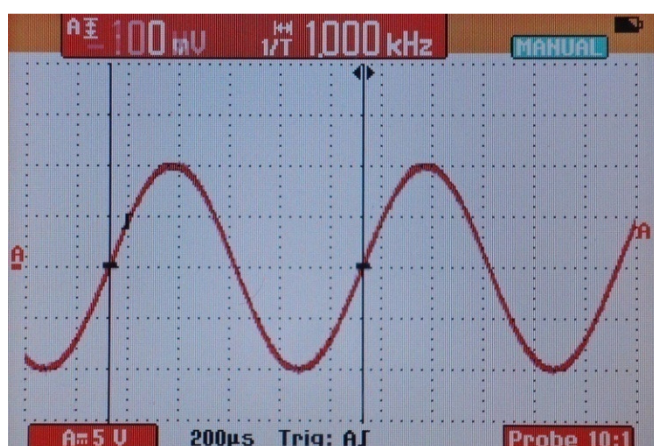


Figura 4: Tensão de saída de um PJVS gerando uma senóide de 10 V p, 1 kHz.

Além de formas de onda senoidal, pode-se gerar formas de onda triangular, quadrada ou arbitrárias.

A figura 5 mostra o sistema PJVS (na parte superior do rack) e o sistema JVS convencional (na parte inferior do rack). Desta forma, pode-se utilizar um ou outro sistema alternadamente, ou ambos os sistemas ao mesmo tempo (numa comparação intralaboratorial entre os mesmos, por exemplo).

3. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentada a implantação (em andamento), em colaboração com o NIST, de um Sistema Josephson Programável no Inmetro. Os resultados preliminares do PJVS foram bastante satisfatórios, sendo possível gerar tensões senoidais, triangulares, quadradas, arbitrárias, até 10,5 V p, desde cc até 1 kHz. Com este sistema, será possível reduzir as atuais incertezas de comparação direta em tensão contínua entre o sistemas Josephson do Inmetro e o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), dos atuais $1,76 \times 10^{-10}$ V/V para algumas partes em 10^{-11} V/V. Além disso, espera-se utilizá-lo em calibrações de pilhas (reduzindo o tempo das calibrações, por fornecer tensões mais estáveis do que o JVS) e em pesquisas em aplicações cc e ca.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer S. Benz, C. Burroughs, P. Dresselhaus, A. Rufenacht e R. P. Miloski pelas importantes contribuições técnicas, e ao conselho nacional de pesquisa e desenvolvimento CNPQ/PROMETRO, pelo suporte financeiro.

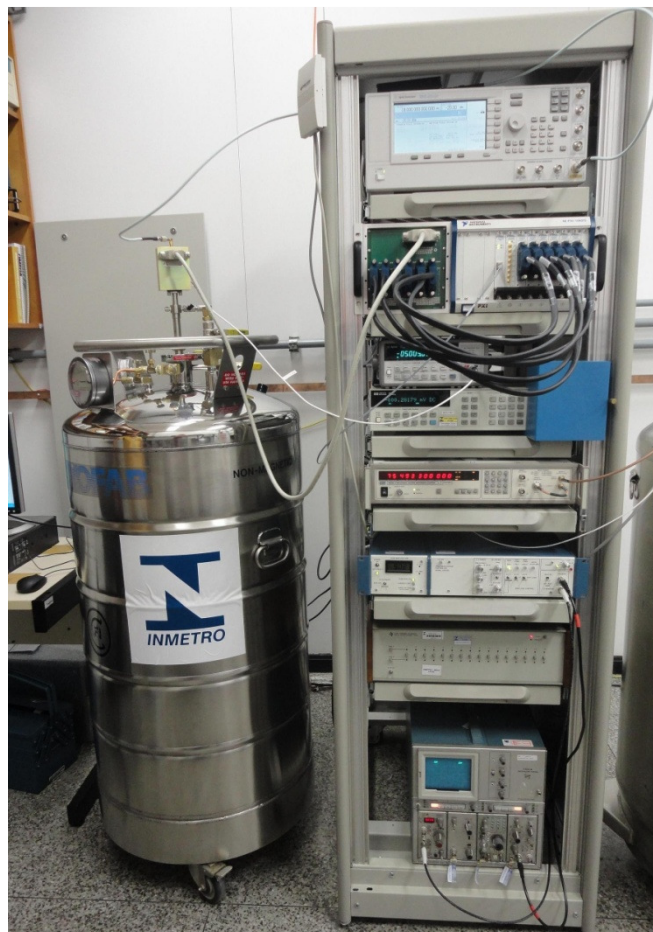


Fig. 5. Sistemas PJVS (parte superior do rack) e CJVS (parte inferior) do Inmetro

REFERÊNCIAS

- [1] "The International System of Units (SI)", Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) brochure, 8th ed., 88 pp., 2006.
- [2] S. P. Benz, C. Hamilton, "Application of the Josephson Effect to Voltage Metrology", Proceedings of the IEEE, v. 92, issue 10, pp. 1617-1629, 2004.
- [3] E. Afonso, J. R. B. da Silva, M. de F. de B. Cyrillo, M. Lira, "Uma Nova Estrutura para a Divisão de Metrologia Elétrica do Inmetro", aceito para publicação no XVIII IMEKO TC4 Symposium e no IX Semetro, 2011.
- [4] A. Rufenacht, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, and M. M. Elsbury, "A 10 Volt 'Turnkey' Programmable Josephson Voltage Standard for DC and Stepwise-Approximated Waveforms, CD proc. of NCSLI, 26-30 July 2009.