

PADRÕES DE TENSÃO BASEADOS NO EFEITO JOSEPHSON – RETROSPECTIVA E PERSPECTIVAS

Régis Pinheiro Landim, Edson Afonso, Vitor Ferreira

Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, {rplandim, eafonso, vferrreira}@inmetro.gov.br

Resumo: Este artigo tem como finalidade a apresentação de uma retrospectiva dos padrões baseados no efeito Josephson, bem como das perspectivas futuras.

Palavras chave: efeito Josephson, padrão de tensão, sistema.

1. INTRODUÇÃO

O avanço do desenvolvimento científico e tecnológico mundial está fortemente embasado no avanço da metrologia; medições mais exatas possibilitam um melhor conhecimento das grandezas físicas, levando a informações que antes passavam despercebidas.

Para assegurar a unificação mundial das medidas físicas, em 1875, alguns países (dezesete, dentre eles o Brasil) selaram um acordo diplomático, conhecido como a “Convenção do Metro”, onde os seus signatários se comprometeram a adotar e aperfeiçoar continuamente um sistema único e internacional de unidades de medida, que mais tarde passou a se chamar “Sistema Internacional de Unidades (SI)” [1]. Atualmente, mais de 60 países são signatários deste acordo (Brasil, Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, Suíça, China, Índia, Chile etc.) [2].

O SI possui sete unidades de base, a partir das quais, pode-se obter as demais unidades (chamadas derivadas). Dentre as unidades de base, o ampère é a única unidade elétrica, e é definida como a “corrente elétrica invariável que mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível e situados no vácuo a 1 metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton, por metro de comprimento desses condutores” [1] e [3].

2. O VOLT E A SUA CONSERVAÇÃO

O volt do SI, que é uma unidade derivada, é definido como “tensão elétrica entre os terminais de um elemento passivo de circuito, que dissipa a potência de 1 watt quando percorrido por uma corrente invariável de 1 ampère”. O ohm do SI (também uma unidade derivada) é definida como a “resistência elétrica de um elemento passivo de circuito que é percorrido por uma corrente invariável de 1 ampère, quando uma tensão elétrica constante de 1 volt é aplicada aos seus terminais”.

Entretanto, a realização prática do ampère, do ohm ou do volt, diretamente, segundo sua definição e com uma exatidão elevada, exige um trabalho longo e difícil [1]. Além disso, a instrumentação moderna requer medições com uma reprodutibilidade (grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição [4]) que ultrapassa a incerteza da realização do volt do SI (atualmente em 0,4 partes por milhão) [5].

Para atender a esta necessidade, os metrologistas têm desenvolvido artefatos e experimentos que geram tensões que são estáveis e reproduzíveis a um nível de aproximadamente 0,001 parte por milhão, atualmente. Estes padrões “reproduzem” o volt do SI, não sendo mais necessário realizar experimentalmente a sua definição. Estes padrões podem, inclusive, ser transportados, o que facilita bastante a disseminação e uniformização mundial do volt.

Antes de 1972, a conservação (ou manutenção) do volt era feita através de atribuições de valores a bancos de células Weston cuidadosamente estabilizadas. Entretanto, os problemas de deriva e estabilidade com estes artefatos-padrão eletroquímicos limitaram a uniformidade dos padrões de tensão ao redor do mundo, em 1 parte

por milhão. Esta uniformidade foi substancialmente melhorada quando os novos padrões baseados nas descobertas de Josephson foram desenvolvidos [5]. Com isto, o volt também pôde ser determinado a partir de medições da razão de constantes físicas fundamentais. Os padrões que utilizam a tensão Josephson, que dependem de constantes fundamentais em vez de artefatos físicos, são conhecidos como “padrões intrínsecos”.

3. OS EFEITOS JOSEPHSON CC E CA

Uma junção Josephson, em sua forma mais simples, é constituída de dois supercondutores separados por uma barreira isolante. Se a barreira é suficientemente fina, os elétrons agrupados aos pares (pares de Cooper) conseguem atravessá-la pelo efeito túnel, formando uma supercorrente. A equação de Josephson para a supercorrente através do túnel supercondutor, chamado de “efeito Josephson cc”, é dado por [5]:

$$I = I_c \sin \left[\left(\frac{4\pi e}{h} \right) \int U dt \right] \quad (1)$$

Onde: I é a corrente da junção, em A

I_c é a corrente crítica, em A

U é a tensão da junção, em V

e é a carga do elétron, $1,602177 \cdot 10^{-19}$ C;

h é a constante de Plank, $6,6260689 \cdot 10^{-34}$

J.s

Quando uma tal junção é submetida a uma tensão contínua U , a barreira isolante é atravessada por uma supercorrente alternada cuja frequência f (em Hz) se relaciona com a tensão U (em V) através da equação (2) ([5] e [7]):

$$f = \frac{2e}{h} U = K_J U \quad (2)$$

Onde K_J é a constante Josephson.

Durante cada ciclo da oscilação, um único “pacote” de fluxo magnético ($h/2e$) passa através da junção. Estas pequenas oscilações são bastante difíceis de serem medidas diretamente [5]. Entretanto, se uma corrente ac de frequência f for aplicada à junção, haverá uma corrente de polarização para a qual o pacote de fluxo magnético irá sincronizar-se com a frequência aplicada. Neste caso, a tensão média através da

junção é exatamente $h.f/(2.e)$. Este efeito, conhecido como “efeito Josephson ca”, é observado como um degrau de tensão constante em $U = h.f/(2.e)$ na curva $I-U$ da junção, como mostrado na Figura 1. Assim, em geral, tem-se que a tensão contínua U , pode assumir uma série de valores sob a forma:

$$U = n_i \cdot \frac{h}{2.e} \cdot f \quad (3)$$

Onde: n é o número do degrau da junção.

Pode-se observar que os degraus de tensão, para uma dada frequência (f) e um dado n são os mesmos, independentemente de variações construtivas na junção (Figura 1).

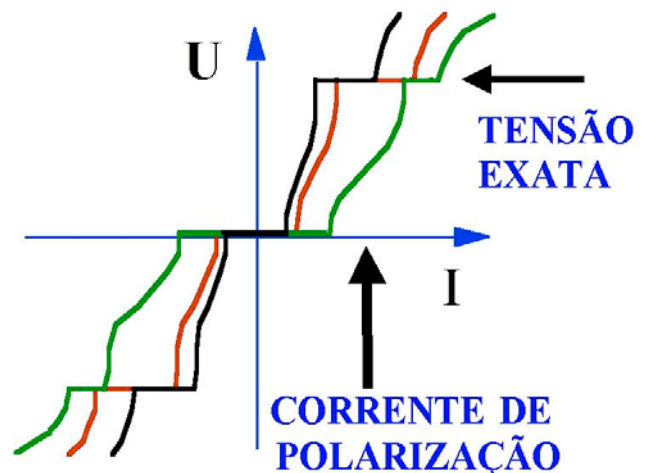


Figura 1: Características U-I para três junções diferentes, sob mesma frequência, e para $n_i=1$

4. A CONSISTÊNCIA DA CONSTANTE JOSEPHSON

A estabilidade da tensão Josephson depende apenas da estabilidade da frequência f , que pode ser facilmente de uma parte em 10^{12} , o que é muito melhor do que a estabilidade das células Weston. Assim, no início dos anos 70, muitos Institutos Nacionais de Metrologia (INMs) adotaram um valor para a constante Josephson $K_J=2.e/h$ e passaram a utilizar o efeito Josephson ca como um padrão prático de tensão [8]. Devido a pequenas diferenças nos padrões nacionais existentes, valores diferentes de K_J foram adotados em diferentes países.

Para resolver esta inconsistência, foi feita uma média ponderada das medições de realização do

volt feitas por vários INMs até 1988, dando subsídios para que o CIPM, em 1988, recomendasse a adoção, por convenção, para a constante de Josephson, o valor $K_{J-90} = 483\,579,9$ GHz/V, exatamente, a partir de 1990. A incerteza em K_{J-90} é de 0,4 partes por milhão ([1] e [5]).

Assim, os INMs passaram a utilizar padrões de referência do volt baseado no efeito Josephson, que são nitidamente mais reprodutíveis e mais estáveis que 10^{-7} , para a conservação da unidade [1]. Isto simplificou bastante o trabalho de manutenção e disseminação da unidade volt do SI, com a vantagem de melhores garantias de estabilidade a longo prazo.

Na Figura 2, pode-se ver como a concordância nas comparações da tensão dc entre os INMs melhorou nos últimos 70 anos. O eixo das ordenadas (em escala logarítmica) mostra o grau de concordância. Nota-se dois patamares significativos, que coincidem com a introdução dos padrões de tensão Josephson (Josephson Voltage Standard - JVS) de junção única, no início da década de 70, e a introdução de JVS's formados por junções Josephson dispostos em série numa rede.

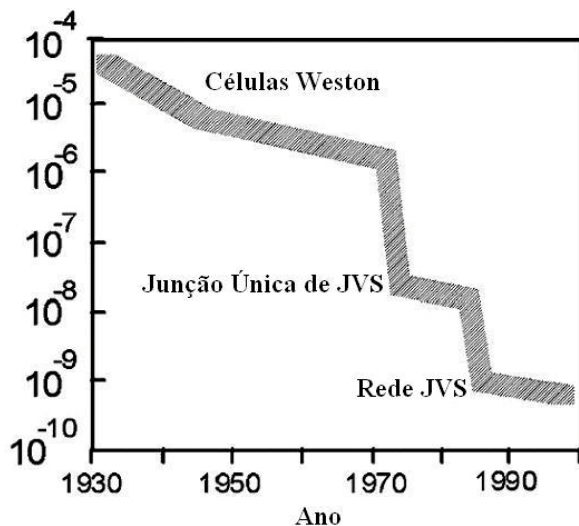


Figura 2: Grau aproximado de concordância em medições de tensão cc entre laboratórios nacionais de metrologia, através dos anos de 1930 a 2000

5. OS AVANÇOS NOS PADRÕES JOSEPHSON CC

A primeira junção única de JVS gerava tensões muito baixas (de 1 a 10 mV). As tensões de saída começaram a aumentar a partir da conexão de (aproximadamente) até 20 junções em série [9].

Entretanto, as tensões geradas ainda eram muito baixas, porque a heterogeneidade entre as junções exigia que se fizesse a polarização individual de cada uma delas, o que tornava impraticável agrupar um número maior de junções em série.

Uma solução para este problema foi proposta por Levinson e outros [10], mostrando que as junções com capacitância C e resistência R altas, poderiam gerar uma curva I-U com degraus de tensão constante, como os mostrados na Figura 3.

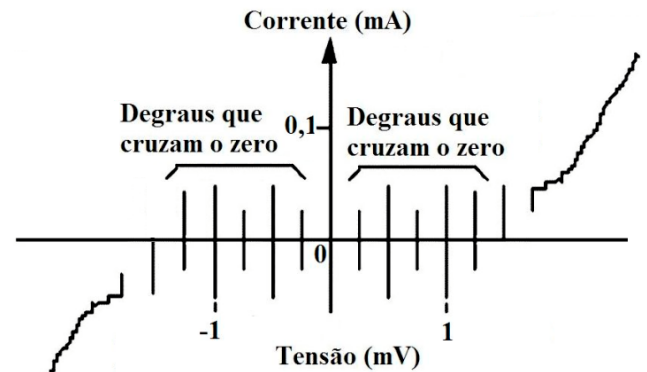


Figura 3: Curva I-U mostrando os "degraus que cruzam o zero"

Assim, um número bem maior de junções poderia ser agrupado em série, distribuídas em uma "rede" (array), ao longo de uma linha de transmissão supercondutora (Figura 4). Desde que cada junção na rede esteja em um degrau de tensão constante, os "degraus que cruzam o zero" permitem que uma única corrente de polarização seja suficiente para todas as junções.

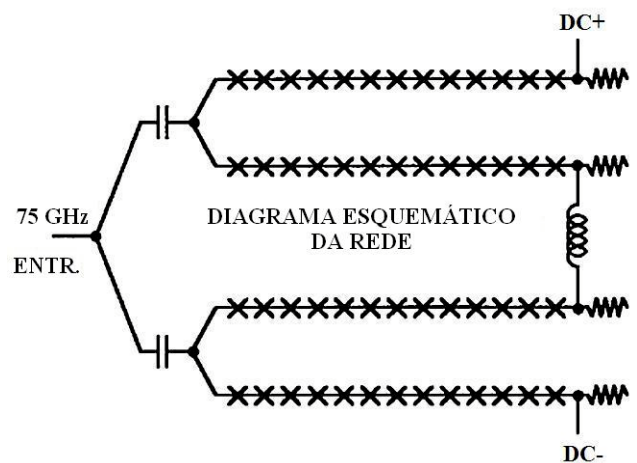


Figura 4: Circuito elétrico típico de uma rede de JVS

A Figura 5 mostra um diagrama simplificado do circuito de polarização. No circuito, o computador ajusta a tensão de polarização U_s com

um conversor digital-analógico (DAC) e utiliza um segundo DAC para controlar a resistência de polarização R_s . O DAC controla o acendimento dos LEDs que, por sua vez, controlam R_s através da modulação de resistores fotocondutores.

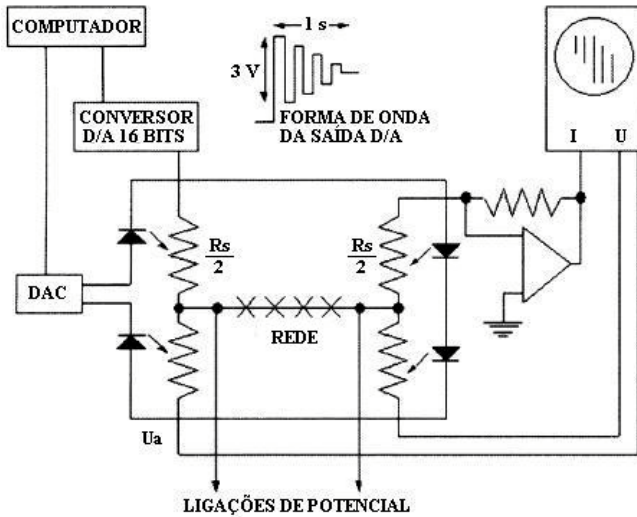


Figura 5: Circuito de polarização para uma rede de junções Josephson

Na Figura 6, pode-se visualizar uma solução gráfica para o ponto de operação estável da rede. Nota-se que o controle de U_s define qual será o degrau de tensão a ser utilizado, enquanto que o controle de R_s define a inclinação da linha de carga. O ponto de intersecção entre a linha de carga e o degrau de tensão define o ponto de operação. Este processo pode ser feito em poucos segundos, e o ponto de operação pode se manter estável por muitas horas [5].

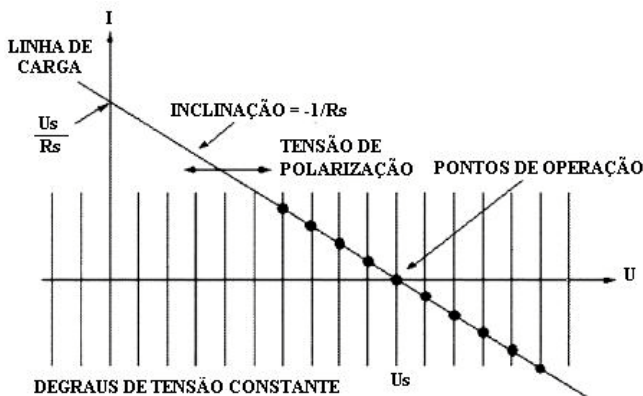


Figura 6: Uma solução gráfica para o ponto de operação da rede

A tensão gerada pela rede (U_a) é igual à soma das tensões individuais geradas pelas junções. Considerando-se que todos os degraus estão ativados, a tensão máxima é dada por:

$$U_a = \frac{n.M.f}{K_J} = \frac{N.f}{K_J} \quad (4)$$

Onde: n é o número de degraus de cada junção;
 M é o total de junções em série na rede;
 f é a frequência da supercorrente alternada;
 K_J é a constante de Josephson;
 N é o número total de degraus da rede.

Para gerar tensões intermediárias, basta ativar um número intermediário de degraus. Neste caso, é possível gerar N tensões quantizadas, dadas por:

$$U_a = \frac{N_i.f}{K_J} \quad (5)$$

Onde $N_i = 1, \dots, N$

Com isto, em 1985 produziu-se os primeiros padrões Josephson de 1 V [11]. Os avanços tecnológicos nos circuitos integrados supercondutores permitiram que, em 1987, fosse atingida a geração de 150 000 tensões quantizadas espalhadas na faixa de -10 a $+10$ V, com um chip de 14.484 junções [12]. Os sistemas JVS que utilizam esta tecnologia são chamados de “JVS convencionais”.

Na Figura 7, pode-se ver o layout de um chip Josephson.

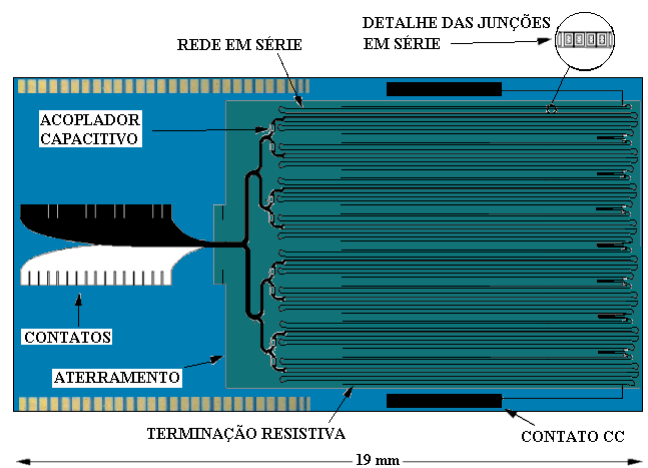


Figura 7: Layout de um chip de rede Josephson de tensão padrão de 10 V, com 20 208 junções

Na Figura 8, pode-se observar o diagrama de blocos de um sistema JVS convencional moderno, onde uma rede JVS é utilizada para medir uma tensão desconhecida, através da comparação entre a rede JVS e os sinais de tensão desconhecidos, que são ligados alternadamente a um

nanovoltímetro, através de um scanner. O chip de uma rede de Josephson está montado dentro de uma blindagem magnética de alta permeabilidade no final de uma ponteira criogênica que faz a transição entre o hélio líquido (armazenado do dispositivo térmico “dewar”) e a temperatura ambiente. Existem três pares de condutores de cobre ligados à rede: um par fornece a corrente de polarização; outro par monitora a tensão da rede com um osciloscópio; o terceiro par fornece a tensão da rede ao sistema de calibração. Todos os condutores passam através de um filtro de interferência de radiofrequência (RFI). A potência em microondas é fornecida através de um guia de ondas circular. Um oscilador por travamento de fase (PLO) operando na frequência próxima 75 GHz fornece potência de microondas ao chip. A frequência de referência para o PLO é obtida através de um clock de césio ou de um receptor GPS (Global Positioning System). Tipicamente, a incerteza total de um sistema JVS é de uns poucos nanovolts [5].

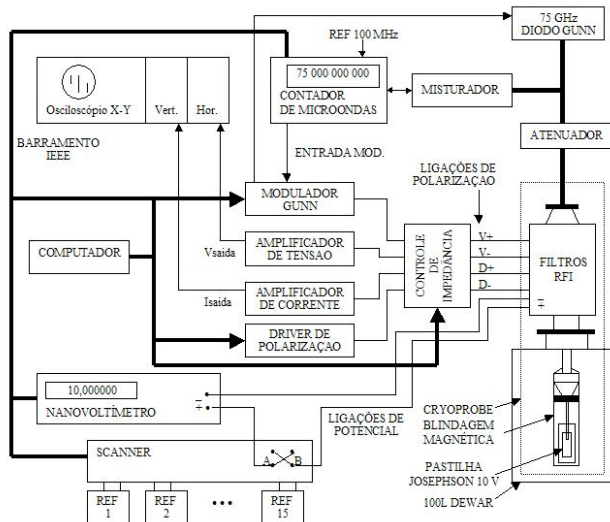


Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema JVS convencional moderno

Embora os “degraus que cruzam o zero” tenham possibilitado a tecnologia para os JVS convencionais, eles possuem duas características (inerentes) indesejáveis:

- É difícil selecionar rapidamente degraus específicos de tensão;
- Algum ruído pode induzir a transições espontâneas entre os degraus.

O problema da transição indesejada entre os degraus requer que a largura de banda de todas as ligações ao chip seja extremamente restringida, de

modo a filtrar o ruído. No caso das medições de clássicas, estes são inconvenientes menores, que podem ser contornados através de software. Os problemas de seleção e estabilidade dos degraus, bem como da largura de banda impedem medições que utilizem análise automática rápida de conversores analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC), bem como a síntese de formas de onda com valores rms computáveis. A solução destes problemas tem sido o maior desafio dos metrologistas, nos últimos 15 anos [5].

A fim de resolver estes problemas, foi proposto um novo padrão capaz de produzir tensões de programáveis e estáveis. Este novo padrão, aqui chamado de JVS programável (PJVS) tem uma tensão de saída dada por:

$$U_a = \frac{n_i \cdot M_i \cdot f}{K_J} \quad (6)$$

Onde: $n_i = 1, \dots, n;$

n é o número de degraus de cada junção;

$M_i = 1, \dots, M;$

M é o total de junções série na rede;

f é a frequência da supercorrente alternada;

K_J é a constante de Josephson.

A tensão de saída (U_a) é definida através da divisão do total de junções em série na rede (M) em segmentos menores, com polarização programável independente, seguida da programação digital do degrau da junção n_i para as junções em cada segmento [13].

A chave para este novo padrão Josephson foi o uso da capacitância C baixa, nas junções, o que leva ao problema inicial da necessidade de correntes de polarização individual para cada junção (da década de 70). Entretanto, devido aos avanços tecnológicos na fabricação das junções (o que permitiu a construção de redes com milhares de junções mais uniformes entre si), bem como no projeto de microondas (o que permitiu uma distribuição bem uniforme da potência, mesmo nas grandes redes), foi possível obter redes com milhares de junções, sendo cada uma polarizada tipicamente nos degraus $n_i = -1$, $n_i = 0$ ou $n_i = +1$ (Figura 9).

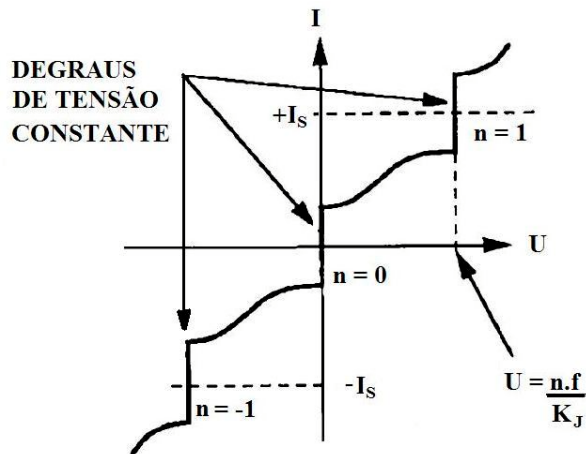


Figura 9: Curva I-U de uma junção única com a potência de microondas ajustada para equalização da amplitude dos degraus $n_i = 0$ e $n_i = \pm 1$

O PJVS possui um tempo de acomodação rápido e é inerentemente estável nos degraus de tensão, o que o torna potencialmente superior ao JVS convencional, nas medições dc.

6. OS AVANÇOS NOS PADRÕES JOSEPHSON CA

As técnicas apresentadas até agora referem-se à grandeza tensão cc. Para a tensão ca, torna-se necessário utilizar uma etapa de transferência ca-cc, o que aumenta a incerteza do sistema. Embora o PJVS também possa gerar degraus que se aproximam de uma senóide, através da seleção apropriada dos mesmos, a indefinição de tensão durante as transições entre os degraus introduz uma incerteza demasiadamente grande.

De acordo com a equação (6), a tensão da rede Josephson pode ser controlada através da mudança do degrau de número n_i . Pode-se observar que o mesmo poderia ser obtido através da mudança em f . Entretanto, no caso de uma excitação senoidal, a amplitude dos degraus cai rapidamente para zero, à medida que a frequência diminui, o que limita o controle a uma faixa muito pequena de frequência.

Por outro lado, se substituirmos a excitação senoidal por uma excitação em pulsos, então a amplitude do degrau torna-se praticamente independente da frequência dos pulsos. Além disso, para gerar tensões negativas, basta inverter a polaridade dos pulsos. Uma fonte de tensão programável, baseada nesta idéia consiste em uma rede de N junções distribuídas em uma linha de transmissão de banda-larga. Um trem de pulsos de

frequência f propagando-se através das linhas, produz uma tensão nos terminais da rede, dada por:

$$U_a = \frac{N_i \cdot f}{K_J} \quad (7)$$

Uma forma de onda complexa pode ser gerada através da modulação do trem de pulsos com um gerador de palavras digital.

Na Figura 10 (a), pode-se ver o diagrama de blocos do processo utilizado para gerar uma forma de onda senoidal com boa exatidão, de frequência f_l (ou qualquer outra forma de onda periódica), a partir de pulsos Josephson quantizados [14]. $S(t)$ é a forma de onda desejada, que passa pelo bloco do algoritmo modulador (na verdade, um algoritmo delta-sigma que digitaliza o sinal de entrada, na frequência de amostragem f_s), que gera o sinal S_D . Este sinal, por sua vez, é misturado à corrente de polarização senoidal (de frequência f) através de um acoplador direcional ("C"). O sinal resultante é utilizado como corrente de polarização do quantizador de pulsos Josephson (que pode ser uma única junção, ou uma rede de junções). Um filtro passa-baixas é utilizado para remover qualquer ruído de quantização indesejado do espectro do sinal de saída quantizado $S_j(t)$, deixando a forma de onda desejada $S'(t) \approx S(t)$.

A rede Josephson de pulsos tem potencial para ser tanto um padrão de tensão dc como um padrão de tensão ac com uma largura de banda de 1 MHz ou mais [5].

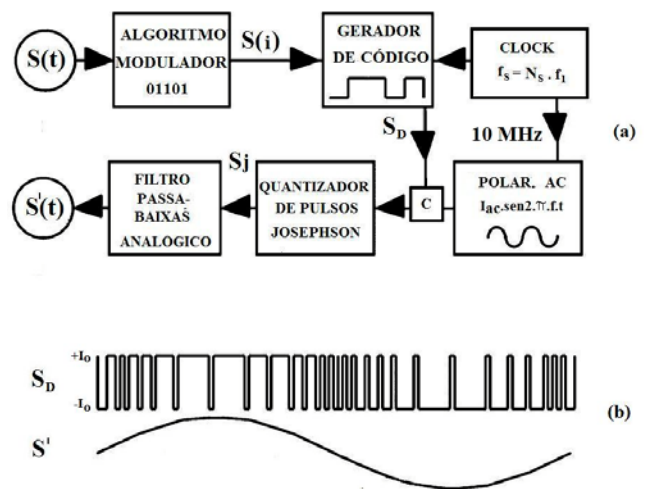


Figura 10: (a) Diagrama de blocos de um sintetizador bipolar de tensão, baseado numa junção de Josephson quantizadora de pulsos (b) Corrente de polarização bipolar

S_D correspondente ao código digital de uma forma de onda senoidal sintetizada S'

Embora os resultados do sintetizador de formas de onda arbitrária Josephson sejam satisfatórios, ainda existem muitos desafios para torná-lo um prático JVS ca (ACJVS). Muitos esforços têm sido focalizados, primeiramente, no aumento da tensão de saída a níveis práticos: avanços recentes no projeto de circuitos e fabricação de circuitos supercondutores integrados têm possibilitado a obtenção de formas de onda de 242 mV de pico [5].

A fim de que o sistema ACJVS realmente possa ser chamado de um padrão “intrínseco” ca e cc, deve haver uma faixa finita para cada parâmetro de polarização dentro da qual a tensão de saída não mude perceptivelmente [15]. Esta “região estável” nas margens de operação precisa ser confirmada todas as vezes que o sistema ACJVS for utilizado para medições precisas, para cada forma de onda de saída sintetizada, gerada pela rede Josephson. Cada parâmetro de polarização deve ter uma faixa na qual a tensão de saída não mude no nível de partes por 10^7 . Tal região foi recentemente encontrada para o ACJVS utilizando um padrão de transferência térmico. Entretanto, ela não foi encontrada para a tensão de saída máxima [5].

Uma outra frente de pesquisa, no que se refere à obtenção de tensões de saída cada vez maiores, nos PJVS e ACJVS, é a utilização de redes concentradas. Como citado anteriormente, as tecnologias atuais de fabricação de junções utilizam redes distribuídas, onde as junções são distribuídas ao longo de uma linha de transmissão supercondutora cujo tamanho é de alguns comprimentos de onda da frequência da microonda de entrada. O desempenho destas redes distribuídas é degradado pela atenuação da microonda nas junções e pelas ondas refletidas. Uma rede é dita concentrada quando todas as junções são dispostas na linha de transmissão dentro de $1/8$ a $1/4$ do comprimento de onda da maior frequência da microonda de entrada [5]. Em 2001, Benz e outros ([16]) desenvolveram junções em nanoescala, para o desenvolvimento de redes concentradas. Acredita-se que redes concentradas cuja impedância total seja igual aos 50Ω de impedância da linha de transmissão seriam

capazes de gerar tensões de saída de 1 V (ACVJS) e de 10 V (PJVS) [5].

Observa-se que o campo de pesquisa sobre o efeito Josephson é bastante amplo, e ainda há muito a ser feito. Convém salientar que a CGPM, desde 1991 já possuía esta percepção, visto que a 19ª CGPM (1991) recomendou a continuidade das pesquisas relativas à teoria fundamental do efeito Josephson [1].

7. CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE TENSÃO UTILIZANDO-SE JVS

A calibração de padrões de tensão utilizando-se padrão de tensão Josephson (JVS) é feita, normalmente, através do método diferencial, que consiste na utilização de um detector de nulo (U_d) e do padrão sob teste (U_{ref}) ligados em série e em oposição ao padrão JVS (U_a) (Figura 11). Este método é mais exato e proporciona mais resolução do que a medição direta.

A tensão do JVS é dada por:

$$U_a = \frac{N_i \cdot f}{K_J} \quad (8)$$

Onde $N_i = 1, \dots, N$

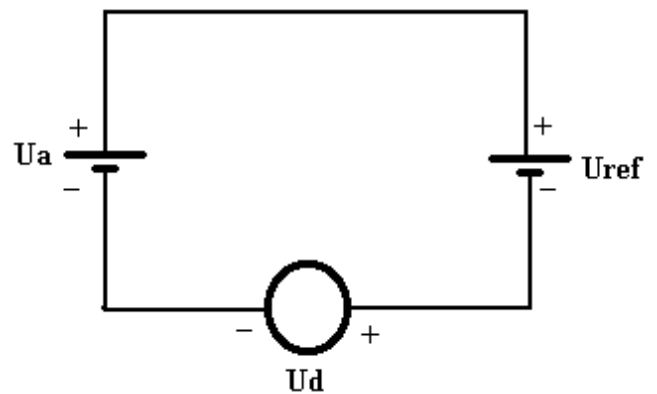


Figura 11: Diagrama de blocos de um sistema de calibração diferencial

Da Figura 11, tem-se:

$$U_a = U_d + U_{ref} \quad (9)$$

Fazendo-se $U_a = 0$ na eq. (9), obtém-se uma estimativa de U_{ref} (U_e), dada por:

$$U_e = -U_d \quad (10)$$

A partir das eq. (9) e (10), tem-se:

$$U_a \approx U_d + U_e \quad (11)$$

A partir das eq. (8) e (11), obtém-se:

$$N_i = \text{round} \left[(U_d + U_e) \cdot \frac{K_J}{f} \right] \quad (12)$$

Onde: N_i é o número de degraus ativos.

A tensão do padrão sob calibração é, então, dada por:

$$U_{ref} = \frac{N_i \cdot f}{K_J} - U_d \quad (13)$$

O número de degraus ativos calculado de acordo com a eq. (12) é sensível a variações de 70 μV . Este fato, associado ao método diferencial utilizado, permite que o JVS tenha uma incerteza da ordem de 10^{-8} V.

8. O PADRÃO JOSEPHSON NO BRASIL

Competindo ao Inmetro, dentre outras coisas, a realização ou reprodução da tensão elétrica, a manutenção e conservação dos padrões de tensão elétrica, bem como o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao assunto, ele não poderia ficar à margem dos avanços tecnológicos relacionados ao efeito Josephson. Por este motivo, em 1997 o Inmetro iniciou um projeto de cooperação com o National Institute of Standards and Technology – NIST (o INM dos Estados Unidos), para o desenvolvimento de um sistema de padronização primária do volt em 1 V e 10 V, contínuos, no Inmetro, do tipo JVS convencional.

Um padrão primário é aquele que é designado ou amplamente reconhecido como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza [4]. Isto é bastante estratégico para o Inmetro e para o Brasil, pois implica independência internacional (ou seja, não é necessário recorrer aos INMs de outros países, para garantir a rastreabilidade da tensão contínua) e economia de tempo e dinheiro (pois não é mais necessário enviar os padrões de referência em tensão contínua do laboratório para calibrar no exterior, o que normalmente é caro, e envolve questões alfandegárias), dentre outras vantagens.

Este sistema está, atualmente, em operação, sendo possível gerar tensões contínuas de 1 V

com uma incerteza associada de 0,5 μV e 10 V com uma incerteza associada de 0,05 μV .

Para que o Inmetro pudesse garantir que estava medindo estes valores de tensão contínua com confiabilidade metrológica, foi necessário participar de programas de comparações-chave de medidas utilizando-se o sistema Josephson do Inmetro. Estas comparações são coordenadas no âmbito do BIPM, em nível mundial, e no do SIM (Sistema Interamericano de Metrologia), para os países das Américas. Em 1999, o Inmetro participou de uma comparação bilateral com o NIST, em 1 V contínuo, cujos resultados obtidos demonstraram que o sistema JVS do Inmetro opera satisfatoriamente [17].

Recentemente (abril/2006), o Inmetro participou de uma comparação-chave com o BIPM, em 10 V contínuos, cujos resultados ainda estão em análise. Além disso, já está programada mais uma comparações-chave, ainda em 2006, com o NIST, também em 10 V contínuos.

O Inmetro, atualmente, está investindo na melhoria do desempenho do sistema de medição de tensão Josephson cc (JVS), com a compra de novos equipamentos, de modo a obter um PJVS. Com isto, poderá melhorar a repetitividade das medidas de tensão dc e, conseqüentemente, melhorar a confiabilidade metrológica deste sistema, capacitando o Inmetro a participar de comparações-chave no âmbito do BIPM e obter a equivalência a padrões internacionais na ordem de 10^{-10} V, em tensão contínua. Além disso, fazem parte dos planos futuros do Inmetro, o desenvolvimento de um sistema de padronização primária do volt, do tipo ACJVS.

9. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um histórico sobre os efeitos Josephson cc e ca, sua aplicação na padronização primária do volt, metodologia de calibração, as perspectivas futuras para o ACJVS e o padrão Josephson no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a cooperação dos Dr. Yi-Hua Tang e Clark Hamilton no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Inmetro, CNI, SENAI. “Sistema Internacional de Unidades”. 8ª edição. Brasília, 2203, 116p.
- [2] www.bipm.fr
- [3] CONMETRO. “Quadro Geral de Unidades de Medida”. Resolução nº 12/1998.
- [4] Inmetro, CNI, SENAI. “Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia”. 2ª edição. Brasília, 2000, 75p.
- [5] Samuel P. Benz e Clark A. Hamilton. “Application of the Josephson Effect to Voltage Metrology”. In Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 10, October 2004.
- [6] B. D. Josephson. “Possible New Effects in Superconducting Tunneling”, Phys. Lett., vol. 1, pp. 251-253, 1962.
- [7] Maurício Nogueira Frota e Pierre Ohayon (editores). “Padrões e Unidades de Medida – Referências Metrológicas da França e do Brasil”. Rio de Janeiro: Qualimark Ed., 1999.
- [8] B. F. Field, T. F. Finnegan, and J. Toots, “Volt Maintenance at NBS via $2e/h$: A New Definition of the NBS volt”, Metrologia, vol. 9, pp.255-166, 1973.
- [9] T. Endo, M. Koyanagi, e A. Nakamura, “High-accuracy Josephson Potentiometer”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-32, pp267-271, Mar. 1983.
- [10] M. T. Levinson, R. Y. Chiao, M. J. Feldman, e B. A. Tucker, “Na Inverse ac Josephson Effect Voltage Standard”, Appl. Phys. Lett., vol. 31, p. 776, 1977.
- [11] C. A. Hamilton, R. L. Kautz, R. L. Steiner, e F. L. Lloyd, “A Practical Josephson Voltage Standard at 1 V”, IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-6, p. 623, Dec. 1985.
- [12] F. L. Lloyd, C. A. Hamilton, J. A. Beall, D. Go, R. H. Ono e R. E. Harris. “A Josephson array voltage standard at 10 V”, IEEE Electron Device Lett., vol. 8, pp. 449-450, Oct. 1987.
- [13] C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, e R. L. Kautz, “Josephson D/A converter with fundamental accuracy”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 44, pp. 223-225, Apr. 1995.
- [14] S. P. Benz, C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, e T. E. Harvey, “AC and dc bipolar voltage source using quantized pulses”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, pp. 266-269, Apr. 1999.
- [15] C. J. Burroughs, S. P. Benz , P. D. Dresselhaus, e Y. Chong, “AC Josephson voltage standard error measurements and analysis”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 52, pp. 542-544, Apr. 2003.
- [16] S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, e C. J. Burroughs, “Nanotechnology for Next Generation Josephson Voltage Standards”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, pp. 1513-1518, Dec. 2001.
- [17] E. Afonso, Y. Tang, G. M. Rocha, “Intercomparison of Josephson Voltage Standards Between Inmetro and Nist”, Metrologia 2000, São Paulo. Anais do II Congresso Brasileiro de Metrologia, 2000.
- [18] <http://kcdb.bipm.org/appendixC>
- [19] Y. Chong, C. J. Burroughs, Jr, P. D. Dresselhaus, N. Hadacek, H. Yamamori, e S. P. Benz, “2.6-V High-Resolution Programmable Josephson Voltage Standard Circuits Using Double-Stacked MoSi₂-Barrier Junctions”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, pp. 616-619, Apr. 2005.
- [20] C. J. Burroughs, S. P. Benz , P. D. Dresselhaus, e Y. Chong, “Precision Measurements of AC Josephson Voltage Standard Operating Margins”, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, pp. 624-627, Apr. 2005.