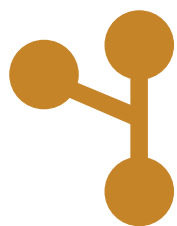


REVISTA TÉCNICO - CIENTÍFICA



robótica®

automação
controlo
instrumentação



ATÉ SEMPRE, PROFESSOR!

ARTIGO CIENTÍFICO

- Robots móveis para ambiente ambulatório (1.ª Parte)

ESPAÇO EMPREENDER E INOVAR

- Avaliar maturidade – um dos pontos-chave na operacionalização de estratégias de transformação digital

INSTRUMENTAÇÃO

- Realização das unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (SI) (2.ª Parte)

AUTOMAÇÃO E CONTROLO

- Programação Gráfica (1.ª Parte)

ELETRÓNICA INDUSTRIAL

- Eletrónica - 14.ª Parte

PORTUGAL 3D

- Poderá a impressão 3D influenciar a história do *design* das motos?

DOSSIER SOBRE MECATRÓNICA VERSUS INDÚSTRIA 4.0

- Cibersegurança na fábrica digital: o caminho ideal para uma produção inteligente
- Aprender em ambiente quase industrial
- A revolução industrial nas linhas de produção
- A tendência na Indústria 4.0 é *web-based*

REPORTAGEM

- Estratégia de digitalização da Endress+Hauser
- Power Motion i-Model iA: o autómato da FANUC
- Feira virtual mostra 168 inovações na igus
- SEW-EURODRIVE Portugal tem novas instalações
- Hands on Webinar sobre "Embalamento e Paletização com Cobots"

A tendência da Indústria 4.0 é um sistema de gestão de manutenção e ativos totalmente web-based



www.weidmuller.pt

Weidmüller

Realização das unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (SI)

2.ª Parte

1. REALIZAÇÃO DO AMPÈRE

A realização do ampère pode ser efectuada recorrendo a um de três métodos:

- à lei de Ohm $I=U/R$, à relação de unidades $A=V/\Omega$ e às realizações práticas das unidades derivados do SI o volt V e o ohm Ω , baseadas nos efeitos de Josephson e Hall quântico, respectivamente;
- ao transporte de um único electrão (SET, do inglês “*Single Electron Transport*”) ou dispositivo semelhante, à relação de unidades $A=C/s$, ao valor da carga elementar, e , apresentado na definição do ampère e à realização prática da unidade de base do SI o segundo s;
- à relação $I=C dU/dt$, à relação de unidades $A=F V/s$ e às realizações práticas das unidades derivados do SI o volt V e o farad F e da unidade de base do SI o segundo s.

Destes, apenas se detalha a realização do ampère através da lei de Ohm em que é necessário referir a realização prática do volt e a do ohm.

A realização prática do volt é conseguida através do efeito de Josephson, sendo o valor da constante de Josephson $K_J=483\,597,848\,416\,984\text{ GHz V}^{-1}$ (embora o valor adotado pelo CIPM – “*Comité International des Poids et Mesures*”, a 1 de Janeiro de 1990 seja $K_{J,90}=483\,597,9\text{ GHz V}^{-1}$).

Este valor resulta da equação $K_J=2e/h$ amplamente corroborada por variadíssimos trabalhos experimentais e teóricos e pelos valores da constante de Planck, h , e da carga elementar, e .

O efeito de Josephson foi previsto em 1962 por Brian Josephson¹ e traduz-se no facto de que quando se interpõe uma camada de separação isolante muito fina entre dois materiais supercondutores², inesperadamente, surge uma corrente eléctrica contínua de amplitude condicionada pelas características dos materiais supercondutores. É exatamente a esta bolacha superconductor-isolante-superconductor que se atribui a designação de junção de Josephson.

Quando um material adquire propriedades de superconductor, os electrões formam pares de Cooper^{3,4} e condensam-se sob a forma de uma onda quântica colectiva única. Se o material isolante eléctrico que separa os dois supercondutores for suficientemente fino (com apenas alguns nanómetros), a onda quântica pode sair do superconductor, permitindo aos pares de Cooper (pares de electrões acoplados) atravessarem o primeiro, devido ao efeito de tunelamento quântico, sem serem quebrados. Os pares de Cooper de cada lado da junção podem ser representados por uma função de onda semelhante a uma função de onda de partícula livre, sendo cada superconductor caracterizado por uma quantidade chamada fase. No efeito Josephson CC surge na junção uma corrente eléctrica proporcional à diferença de fase das funções de onda, mesmo na ausência de uma tensão eléctrica.

No efeito Josephson CA, se se aplicar uma diferença de potencial eléctrico constante entre os dois supercondutores, surgirá uma corrente eléctrica alternada como reacção às variações de fase. Este efeito que liga uma tensão contínua a uma corrente alternada não é comum. Em particular porque a frequência de correntes alternadas não depende do tamanho dos supercondutores nem das suas propriedades (temperatura crítica e composição química). Esta frequência, designada por frequência de Josephson, f_J , é proporcional à tensão eléctrica aplicada através da junção, ΔU , e depende de constantes da física como a carga elementar, e , e a constante de Planck, h ,

$$f_J = \frac{2e\Delta U}{h} = K_J \Delta U \quad (1)$$

Como podemos medir frequências com elevada precisão graças aos relógios atómicos, a junção de Josephson foi adoptada como o padrão de medida da tensão eléctrica. Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de um sistema experimental compacto para realização do padrão da tensão de Josephson.

¹ Brian David Josephson, físico teórico galês vencedor do Prémio Nobel da Física em 1973, 1940–.

² Qualquer material cuja resistência caia abruptamente para zero quando a temperatura é inferior a um valor crítico e que repele campos de fluxo magnético exteriores.

³ O comportamento dos supercondutores é indicativo de que pares de electrões se vão acoplando num intervalo de centenas de nanómetros (três ordens de grandeza maior do que o espaçamento da rede cristalina). Estes electrões acoplados podem assumir o carácter de um bóson e condensarem-se no estado fundamental, aquele em que a densidade de probabilidade não varia com o tempo.

⁴ Leon Cooper, físico norte-americano vencedor do Prémio Nobel da Física em 1972, 1930–.



Figura 1. Sistema experimental compacto para realização do padrão da tensão de Josephson (cortesia do NIST).

Os padrões de junção de Josephson podem gerar tensões com precisão de uma parte em 10^{10} . O NIST – “National Institute of Standards and Technology”, produziu um circuito integrado com 19 000 junções em série capaz de medir tensões da ordem dos 10 volts com a referida precisão.

A realização prática do ohm pode ser obtida de uma de duas formas:

- através da resistência quântica de Hall^{5,6}, caracterizada pelos seus valores quantizados

$$\begin{cases} R_H = \frac{R_K}{i}, & i = 1, 2, 3, \dots \\ R_K = \frac{h}{e^2} \end{cases} \quad (2)$$

sendo $R_K = 25\,812,807\,459\,3045\ \Omega$ a constante de von Klitzing⁷, apenas dependente da constante de Planck, h , e da carga do electrão, e (fenómeno descoberto por von Klitzing em 1980). Ou seja, a resistência quântica de Hall, R_H , é uma fracção inteira i da constante de von Klitzing, R_K .

Enquanto as resistências convencionais dependem do material e das suas dimensões geométricas, sofrem alterações ao longo do tempo com a temperatura e com a pressão atmosférica, sendo ainda sensíveis ao choque mecânico, a resistência quântica de Hall depende única e exclusivamente de constantes fundamentais, sendo imutável e reproduzível com elevada precisão. O quociente h/e^2 e, conseqüentemente a constante de von Klitzing, R_K , pode ser calculado com qualquer número de algarismos, no entanto, o valor apresentado com 15 algarismos significativos corresponde ao recomendado, conduzindo a um erro de menos de uma parte em 10^{15} , irrelevante na grande maioria das aplicações. Nos raros casos em que este erro não pode ser desprezado, devem ser utilizados algarismos adicionais. A vantagem de recomendar para uso prático um determinado valor para a constante de von Klitzing, R_K , é garantir que as realizações do ohm com base na resistência quântica de Hall utilizam exactamente o mesmo valor.

Devido às suas propriedades exclusivas, a resistência quântica de Hall tornou-se no principal padrão de metrologia de re-

sistência em todo o mundo. Por questões meramente práticas, a resistência quântica de Hall usualmente considerada corresponde à quantização originada por $i=2$.

- ou através da comparação de uma resistência desconhecida com a impedância de um condensador de capacidade eléctrica conhecida usando, por exemplo, uma ponte de Sauty (uma série de duas resistências num ramo em paralelo com outro ramo constituído por uma série de dois condensadores, ambos alimentados por uma fonte de tensão alternada sinusoidal) em que o valor da capacidade eléctrica foi previamente determinado recorrendo a um condensador calculável⁸ e ao valor da constante permitividade eléctrica do vácuo $\epsilon_0 = 8,854\,187\,8 \times 10^{-12}\ \text{F m}^{-1}$.

2. REALIZAÇÃO DO KELVIN

O CIPM tem vindo a adoptar uma série de Escalas Internacionais de Temperatura (ITS – “International Temperature Scale”). A primeira em 1927, seguindo-se a adopção de novas escalas em 1948, 1968 e 1990 (ITS-90), com pequenas revisões ocasionais nos anos entre escalas. Em 2000 foi adoptada a Escala de Baixa Temperatura Provisória (PLTS – “Provisional Low Temperature Scale”) para temperaturas abaixo de 1 K (PLTS-2000).

De salientar que as temperaturas de ponto fixo atribuídas numa ITS são exactas relativamente à respectiva temperatura da escala (não há incerteza atribuída) e fixas (o valor permanece inalterado durante a vigência da escala). Em consequência, a definição do kelvin no SI, em termos da constante de Boltzmann, não tem efeitos sobre os valores de temperatura ou sobre as incertezas da realização das ITS, apenas se liberta de restrições materiais e tecnológicas, permitindo o desenvolvimento de novas técnicas mais exatas, em especial em extremos da temperatura.

Desde 1954 que o kelvin foi adotado pela CGPM – “Conférence Générale des Poids et Mesures”, como unidade de temperatura termodinâmica do SI e a sua realização feita recorrendo ao ponto triplo da água. Ponto em que uma formulação particular da água existe simultaneamente nos estados sólido, líquido e gasoso, desde que haja equilíbrio térmico (*i.e.* quando a água não tem ganho nem perda de calor). O ponto triplo da água tem servido como padrão universal de temperatura já que, quando esta água é submetida a um determinado valor de pressão, por definição, ele ocorre sempre exactamente à mesma temperatura. Na verdade, o ponto triplo da água não realiza 1 kelvin, mas antes 273,16 kelvins.

Embora o ponto triplo da água já não defina o kelvin, continua a ser uma forma conveniente e prática de calibrar termómetros. Para tal, utiliza-se uma célula de ponto triplo da água (como a que se representa na Figura 2): um cilindro de vidro vedado por pressão, quase cheio de água. A célula é evacuada com uma bomba de vácuo até a pressão interna atingir os

⁵ Resulta da versão quantizada do efeito de Hall observada em sistemas de electrões bidimensionais submetidos a baixas temperaturas e fortes campos magnéticos, nos quais a resistência de Hall R_H exhibe planaltos de valores quantizados num determinado nível.

⁶ Edwin Herbert Hall, físico norte-americano, 1855–1938.

⁷ Klaus von Klitzing, físico alemão vencedor do Prémio Nobel de Física em 1985, 1943–.

⁸ O condensador calculável é baseado num teorema da electrostática – A. Thomson e D. Lampard, “A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance”, Nature 177, 888 (1956) – que permite o cálculo da capacidade eléctrica de um tipo especial de condensador directamente a partir de uma medição unidimensional, rastreável à unidade de comprimento do SI.

611,657 pascais (cerca de 0,6% da pressão do ar ao nível do mar). Ao longo do eixo central da célula existe uma câmara tubular aberta ao ar, chamada poço do termómetro, correspondente ao espaço onde os materiais de arrefecimento serão colocados e, posteriormente, será introduzido um termómetro.



Figura 2. Célula de ponto triplo da água usada na realização do kelvin do SI (cortesia do NIST).

Uma vez que pequenas variações nas concentrações dos isótopos de hidrogénio e de oxigénio que constituem a água podem afetar a temperatura do seu ponto triplo, a comunidade científica mundial acordou uma formulação muito específica de água, denominada “*Vienna Standard Mean Ocean Water*”. Esta designação refere-se à composição química da água destilada do oceano e à capital austríaca Viena, por ser a sede da Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA – “*International Atomic Energy Agency*”) que promulgou a formulação.

A célula de ponto triplo é arrefecida colocando-se material como gelo seco no poço do termómetro, originando a formação de um manto de gelo com alguns milímetros de espessura na água em redor do poço do termómetro. Este manto inicial tem defeitos e fissuras que podem afetar a sua temperatura, sendo necessário permitir que o manto arrefeça lentamente, durante pelo menos dez dias. Para tal, a célula é colocada num banho de água de temperatura logo abaixo da do ponto triplo, até que as deformações e as fissuras desapareçam.

Imediatamente antes da medição final ser feita, insere-se por breves instantes no poço do termómetro uma vareta de vidro à temperatura ambiente ou outro dispositivo similar. Este procedimento tem como efeito a formação de uma camada interna derretida e extremamente fina, entre a parede de vidro do poço do termómetro e o manto de gelo de modo a que este possa girar livremente em redor do primeiro.

Nesta fase, a célula de ponto triplo da água devidamente preparada terá uma temperatura interna de quase exactamente 273,16 K⁹. Por fim, insere-se um termómetro na célula e espera-se até este atingir o equilíbrio térmico. A leitura do termóme-

⁹ Para as células de nível laboratorial, a variação no intervalo de medida dos valores reais de temperatura do ponto triplo da água é muito pequena, aproximadamente 50 µK, ou 50 milionésimos de um kelvin.

tro é comparada com a temperatura conhecida da célula e os resultados são usados para calibrar o instrumento de medição.

De um modo geral as calibrações são realizadas em termómetros de resistência de platina padrão (SPRT – “*Standard Platinum Resistance Thermometer*”), usados para medirem temperaturas entre os -200 °C e os 1000 °C.

Outras possíveis realizações do kelvin passam pelas seguintes técnicas:

- termometria de gás acústico – explora a relação entre a velocidade do som num gás ideal no limite da frequência zero e a temperatura desse mesmo gás, envolvendo a constante de Boltzmann, k ;
- termometria radiométrica de banda espectral (≥ 1235 K) – a equação básica para esta técnica é a lei de Planck, que relaciona a radiância de um corpo negro ideal com a temperatura;
- termometria fotónica – a temperatura afecta tanto as dimensões físicas dos objectos quanto as suas propriedades ópticas, *i.e.* variações de temperatura alteram a velocidade da luz num meio como o ar ou a água por via do efeito termo-óptico; os termómetros fotónicos detectam variações na frequência da luz, as quais podem ser medidas com elevada precisão;
- termometria de ruído Johnson¹⁰ – é baseada na agitação térmica dos portadores de carga dentro de um condutor eléctrico e no teorema de flutuação-dissipação¹¹; o ruído de Johnson representa a pequena flutuação da voltagem numa resistência, produzida pelo movimento térmico aleatório dos portadores de carga (principalmente electrões); quanto maior for a amplitude da flutuação da voltagem, mais elevada será a temperatura, numa relação direta e independente do material específico usado ou da sua geometria.

Das abordagens descritas, apenas o tempo ditará qual a técnica que permitirá realizar o kelvin com maior exatidão.

3. REALIZAÇÃO DA CANDELA

A definição da candela, enquanto unidade da quantidade fotométrica intensidade luminosa, relaciona unidades fotométricas com unidades radiométricas e, como tal, a sua realização e a das unidades derivadas fotométricas resulta, quase sempre, da realização de unidades radiométricas.

O Comité Consultivo para a Fotometria e a Radiometria (CCPR – “*Consultative Committee for Photometry and Radiometry*”) do CIPM, e formalmente adotado pelo mesmo CIPM, elaborou uma brochura onde propõe diferentes realizações para a definição da candela. Estas diferentes realizações da candela

¹⁰ John Bertrand Johnson, engenheiro electrotécnico e físico norte-americano de origem sueca, 1887–1970.

¹¹ O teorema de flutuação-dissipação ou da relação de flutuação-dissipação é uma poderosa ferramenta da física estatística que permite prever o comportamento de sistemas que obedecem ao equilíbrio detalhado, *i.e.* para sistemas cinéticos decompostos em processos elementares (colisões, escalões, ou reacções elementares), quando em equilíbrio, cada processo elementar está em equilíbrio com seu processo reverso.

incluem métodos baseados na fotometria, na radiometria e em quantidades baseadas em número de fótons (quantidades de radiação óptica expressas em termos de um conhecido número de fótons ou fluxo de fótons). Devido ao duplo aspecto da radiação eletromagnética, as quantidades fotométricas e/ou raiantes espectrais também podem ser expressas em termos de quantidades baseadas no número de fótons.

As realizações referidas são as de mais fácil implementação e/ou as que conduzem às menores incertezas, sendo ainda oficialmente reconhecidas pelo CCPR como métodos primários. Pela grande diversidade e por não se pretender apresentar uma listagem completa e exaustiva, apenas será apresentada a realização baseada na fotometria. Na figura 3 apresenta-se uma bancada para realização de unidades fotométricas utilizada pela PTB – “Physikalisch-Technische Bundesanstalt”.



Figura 3. Bancada para realização de unidades fotométricas utilizada pela PTB (cortesia da PTB).

A realização da candela é teoricamente possível recorrendo a uma lâmpada de referência monocromática estável, emitindo num comprimento de onda $\lambda_a = 555,017$ nm, em ar normalizado, correspondente à frequência de 540×10^{12} Hz especificada na definição da candela. Esta lâmpada é montada num banco fotométrico a uma distância conhecida d da abertura limitadora (de área A) de um radiómetro medidor do fluxo radiante Φ_e , sendo o cálculo da intensidade radiante para este comprimento de onda obtido através da relação $I_e(\lambda_a) = \Phi_e(\lambda_a) / \Omega$, em que $\Omega = A/d^2$ representa a aproximação do ângulo sólido para grandes distâncias. A intensidade luminosa da lâmpada é por fim obtida usando a relação $I_v = K_{cd} V(\lambda_a) I_e(\lambda_a)$, onde intervém a eficácia luminosa de uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz, K_{cd} . A função $V(\lambda_a)$ representa a eficiência luminosa espectral para a visão humana fotópica definida pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE – “Commission Internationale de l’Éclairage”) no intervalo de medida de comprimento de onda entre os 360 nm e os 830 nm, a intervalos de 1 nm, e cujo valor máximo ocorre quando $\lambda = 555$ nm.

Esta realização é de pouca utilidade em medições de fontes luminosas correntes, normalmente de banda larga, sendo a realização prática da candela predominantemente realizada por intermédio de um dos dois métodos a seguir descritos:

- **Método A** – usando uma fonte policromática suficientemente pequena para fornecer um campo de radiação quase isotrópico na direção da medição, geralmente uma fonte incandescente que se aproxima da distribuição de potência espectral relativa do iluminante padrão CIE A¹². Para a utilização de uma lâmpada como referência de intensidade

luminosa é necessária uma caracterização espectral. Essa intensidade radiante espectral, $I_e(\lambda)$, numa determinada direção é tipicamente medida a uma distância, d , suficientemente grande, recorrendo a uma série de radiómetros calibrados que atuam como filtros de referência com capacidade de resposta de irradiância conhecida em alguns comprimentos de onda discretos, nomeadamente os comprimentos de onda no intervalo de medida do visível, entre os 360 nm e os 830 nm, ou usando um espectrorradiómetro com uma óptica de entrada de irradiância, exclusivamente calibrada para responder a essa mesma irradiância. Para a correcta realização destas medições, a lâmpada deverá ser ajustada de acordo com as condições operacionais especificadas (orientação da lâmpada, direcção da medição e corrente na lâmpada) e a distância, d , da fonte até à limitativa área de abertura, A , do detetor deverá ser conhecida e controlada com precisão. A intensidade radiante da fonte policromática é medida em todo o intervalo de medida de comprimento de onda visível, diretamente em intervalos estreitamente espaçados ou num número suficiente de comprimentos de onda discretos que permitam a interpolação e a extrapolação para outros comprimentos de onda, usando um modelo físico apropriado. Esses valores podem ser multiplicados pela função de eficiência luminosa espectral CIE desejada e integrados espectralmente, de modo a fornecerem a intensidade luminosa correspondente. A título de curiosidade refere-se que é este o método utilizado pelo NIST para a realização da candela.

- **Método B** – usando um medidor de iluminância de referência, i.e. um radiómetro filtrado cuja responsividade espectral relativa é projectada de modo a corresponder da forma mais ajustada possível às características espectrais da função de eficiência luminosa espectral CIE desejada. Este radiómetro, actuando como filtro, é geralmente usado em conjunto com uma abertura de precisão para fornecer uma responsividade de iluminância (nas unidades $A \text{ m}^{-2}$) conhecida, sendo a sua calibração referenciada a um radiómetro absoluto. A calibração é necessária para que a responsividade espectral absoluta à irradiância (nas unidades $A \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ nm}^{-1}$) do radiómetro seja em comprimentos de onda discretos, juntamente com medições face a outros detectores de referência (e.g. armadilhas de silício ou PQED – “Predictable Quantum Efficient photoDiodes”), permitindo a interpolação em intervalos regulares dos comprimento de onda, ao longo do intervalo de medida do visível. Os valores espectrais são convertidos em responsividade de iluminância (para uma fonte específica) através da integração matemática entre os 360 nm e os 830 nm. Este medidor de iluminância de referência calibrado pode agora, por sua vez, ser utilizado como referência para a intensidade luminosa numa direção específica de uma lâmpada padrão. Os dispositivos são instalados numa bancada fotométrica, permitindo o rigoroso controlo da distância, d , da fonte até à limitativa área de abertura, A , do medidor de iluminância, do alinhamento da lâmpada e da direcção da medição. A calibração espectral da fonte de luz poderá também ser necessária para corrigir a incompatibilidade espectral entre o medidor de iluminância e a função de eficiência espectral luminosa fotóptica CIE necessária. ❗

¹² Representa a iluminação doméstica típica por filamentos de tungsténio. A sua distribuição de potência espectral relativa é a de um radiador planckiano a uma temperatura de aproximadamente 2856 K.