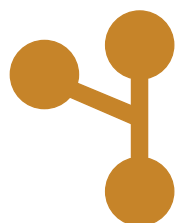


REVISTA TÉCNICO - CIENTÍFICA



robotica®

automação
controlo
instrumentação

**ARTIGO CIENTÍFICO**

- Robots em Ginecologia

INSTRUMENTAÇÃO

- Realização das unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (SI) (1.ª Parte)

AUTOMAÇÃO E CONTROLO

- Programação com LabVIEW (2.ª Parte)

ELETRÓNICA INDUSTRIAL

- Eletrónica - 12.ª Parte

PORTUGAL 3D

- Fabricação aditiva – impressão de um postigo de um molde

MESA REDONDA SOBRE ROBÓTICA

- Uma breve revisão sobre a I&DT em robótica em Portugal
- Mesa Redonda sobre Robótica

REPORTAGEM

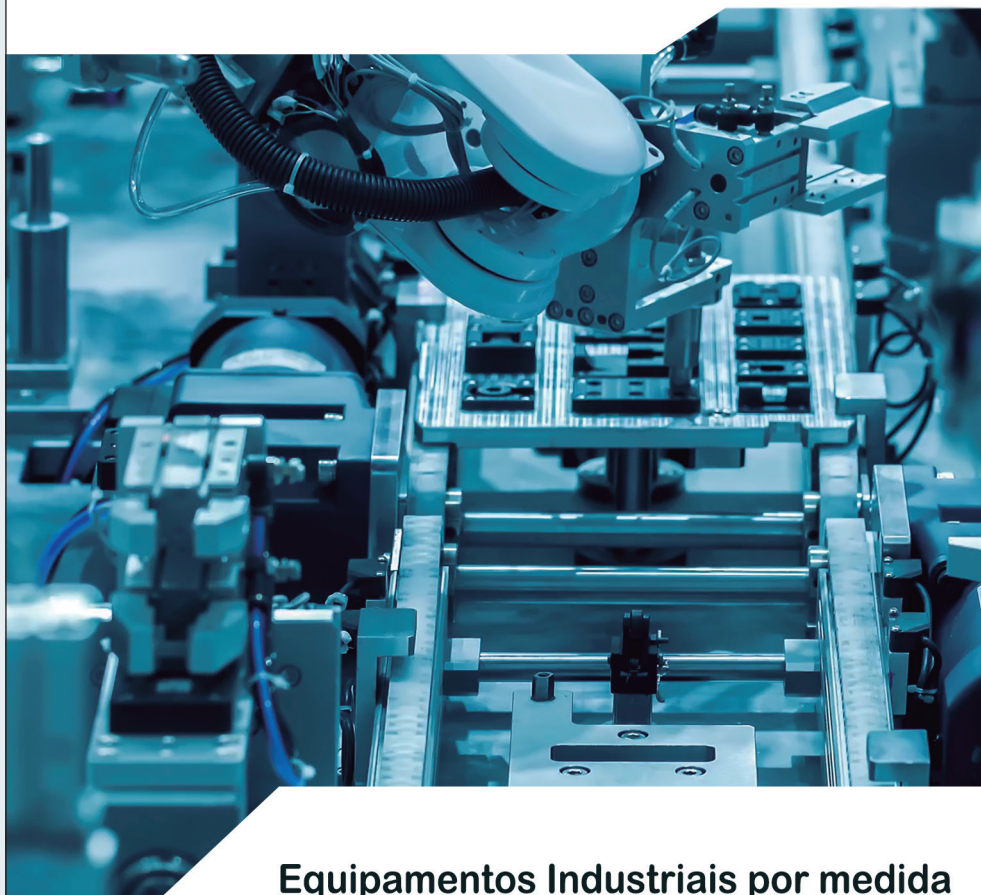
- Lançamento da Rede de Parceiros EPLAN
- myPNOZ junta o mais completo *know-how* de segurança da Pilz

ENTREVISTA

- Javier Rodriguez: GIMATIC celebra 10 anos na Península Ibérica inaugurando novas instalações
- Pablo Lo Zicchio, Weidmüller: *"sustentabilidade é um dos principais desafios que enfrentamos como sociedade"*



Robótica e Automação Industrial



Equipamentos Industriais por medida

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

1.ª Parte

Dando continuação ao artigo, "A histórica revisão do Sistema Internacional de Unidades (SI)", *Robótica* n.º114, pp. 18-19 (2019), o presente artigo e o próximo abordam a realização das definições das unidades de base do SI:

- segundo;
- metro;
- quilograma;
- mole;
- ampère;
- kelvin;
- candela.

Nesta 1.ª Parte apresentam-se as realizações do segundo, do metro, do quilograma e da mole, deixando-se para a 2.ª Parte as realizações do ampère, do kelvin e da candela.

Todas as definições das unidades de base do SI estão separadas das suas realizações, *i.e.* em vez das primeiras dependerem de sistemas de medida, sujeitos a tornarem-se obsoletos com a passagem do tempo e de cada vez que os avanços tecnológicos permitam conceber novos sistemas de medida mais exactos, estas definições estão unicamente relacionadas com constantes físicas da natureza.

Recordamos a distinção feita pelos metrologistas entre a "definição de uma unidade" e a "realização de uma unidade". A "definição" de cada unidade de base do SI é concebida de modo a ser única e a fornecer uma base teórica sólida, sobre a qual se possam efectuar as medidas mais exatas e mais reprodutíveis. Por outro lado, a "realização" da definição de uma unidade é o procedimento através do qual essa definição poderá ser utilizada para estabelecer o valor e a incerteza associada de uma quantidade, com a mesma natureza da unidade em questão.

1. REALIZAÇÃO DO SEGUNDO

Esta realização recorre ao uso de um relógio atómico, como o que se mostra na Figura 1.

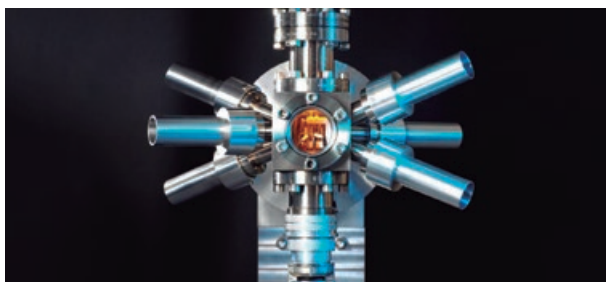


Figura 1. Exemplo de relógio atómico à base do átomo de ^{133}Cs , usado na realização do segundo do SI.

Num laboratório suficientemente pequeno para permitir que os efeitos da não-uniformidade do campo gravitacional sejam negligenciados, quando comparados com as incertezas da realização do segundo, este é obtido após a aplicação da correcção relativística especial para a velocidade do átomo de ^{133}Cs no laboratório, não sendo correto corrigir o campo gravitacional local. Na definição do segundo, quando se refere o átomo de ^{133}Cs não perturbado, entende-se o átomo livre de qualquer perturbação, em repouso e a zero kelvin.

Os relógios atómicos à base do átomo de ^{133}Cs utilizam, como ponto de referência, as transições electromagnéticas na estrutura hiperfina deste átomo. No laboratório são projectados e construídos padrões primários de frequência com uma incerteza muito baixa, capazes de produzirem, sob excitação de micro-ondas, oscilações eléctricas resultantes da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de ^{133}Cs , as quais ocorrem exactamente à frequência de 9 192 631 770 quando expressa na unidade Hz, que é igual a s^{-1} .

Para estes padrões primários de frequência, os vários deslocamentos de frequência (incluindo os que são devidos ao efeito Doppler¹ relativista ligado ao movimento atómico), a radiação térmica do ambiente (deslocamento do corpo negro) e vários outros efeitos relacionados ao projecto e operação do relógio, têm de ser estimados e corrigidos.

O melhor destes padrões primários produziu, em 2013, o segundo do SI com uma incerteza padrão relativa de algumas partes em 10^{16} . Claramente, para se obter este nível de precisão, o efeito da não-uniformidade do campo gravitacional sobre o tamanho do dispositivo não pode ser ignorado, sendo o padrão considerado no âmbito da relatividade geral, a fim de fornecer o tempo adequado num ponto específico, *e.g.* um conector.

2. REALIZAÇÃO DO METRO

Atualmente existem duas realizações distintas para o metro: o tempo de voo e a interferometria².

Na realização do tempo de voo envia-se um pulso de luz ao longo da distância que se pretende medir. O tempo que o pulso de luz leva a percorrer essa distância, em segundos, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo, $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$, indica o comprimento em metros. Como a velocidade da luz é muito elevada, este método é de mais fácil aplicação em distâncias longas. No entanto, devem-se ter em conta os efeitos do campo gravitacional ao medirem-se distâncias astronómicas. Na realização através da inter-

1 Christian Andreas Doppler, físico austríaco, 1803–1853.

2 A técnica de interferometria permite que uma distância seja medida em termos do comprimento de onda da luz.

ferometria, usando uma fonte de luz de comprimento de onda conhecido e estável, é possível medir diretamente distâncias até 100 metros com uma precisão de até uma parte em alguns milhões.

3. REALIZAÇÃO DO QUILOGRAMA

As normas eléctricas quânticas para a tensão (efeito de Josephson³) e para a resistência (efeito de Hall⁴ quântico), baseadas na constante de Planck⁵ h e na carga elementar e , respectivamente, são tão estáveis que permitem realizar o quilograma por comparação, usando uma balança Kibble⁶ (anteriormente designada por balança watt de bobina móvel), em que o peso de uma massa é equilibrado por uma força electromagnética (a Figura 2 mostra a balança Kibble utilizada pelo NIST, “*National Institute of Standards and Technology*”). Esta força é criada por uma bobina percorrida por uma corrente, enquanto suspensa num campo magnético estacionário produzido por dois ímanes permanentes.



Figura 2. Exemplo de balança Kibble, usada na realização do quilograma do SI (cortesia do NIST).

Através da medição da intensidade do campo magnético e da corrente que percorre a bobina é possível medir-se indirectamente o quilograma. Para tal, a balança Kibble funciona em dois modos de medição distintos: o modo velocidade e o modo pesagem.

No modo velocidade mede-se a f.e.m. induzida na bobina, enquanto esta é movida a uma velocidade constante através do campo magnético produzido pelos ímanes permanentes. Nestas condições, medindo a f.e.m. induzida, conhece-se a intensidade do campo magnético estacionário. No modo pesagem faz-se percorrer a bobina por uma corrente, transformando-a num electroímã que interage com o campo magnético estacionário, produzindo-se uma força vertical proporcional à corrente. Quando esta toma o valor que origina uma força igual, mas de sentido contrário, à do peso de uma determinada massa que se pretende conhecer, atinge-se o equilíbrio. Como a f.e.m. induzida e a corrente são medidas usando normas eléctricas quânticas, o quilograma pode ser definido em termos do valor fixo da constante de Planck h , juntamente com as definições existentes do segundo (associada a $\Delta\nu_{Cs}$) e do metro (associada a c e a $\Delta\nu_{Cs}$).

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

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

5 Max Karl Ernst Planck, físico teórico alemão vencedor do Prémio Nobel da Física em 1918, 1858–1947.

6 Bryan Peter Kibble, físico e metrologista britânico, 1938–2016.

Uma segunda abordagem, não tanto concorrente à anterior, mas antes complementar, relaciona o quilograma com uma massa atómica, de modo a que o primeiro possa ser definido como a massa de um número fixo de átomos. Explorando o facto de a definição da constante de Avogadro⁷ N_A depender da massa de uma determinada substância é possível relacionar-se esta constante com o quilograma. Para uma melhor compreensão desta abordagem leia-se a descrição da realização da mole, a seguir.

Em conjunto com a balança Kibble, este método permite determinar com elevada precisão a constante de Avogadro N_A e a constante de Planck h .


4. REALIZAÇÃO DA MOLE

A realização da mole resulta, desde 1990, da colaboração internacional entre diversos institutos de investigação, tendo sido adotada uma abordagem baseada na contagem do número de átomos existentes num único cristal de silício⁸, recorrendo-se ao método de difracção de raios X (XRCD, do inglês “*X-Ray-Crystal-Density*”).

Para tal, é utilizado um cristal uniforme de ^{28}Si maquinado sob a forma de uma esfera quase perfeita com uma massa de 1 kg. Esta esfera, como a representada na Figura 3, de elevadíssima pureza⁹ e com um diâmetro de 94 mm, é considerado o objecto mais redondo do mundo. Este grau de pureza permite simplificar os cálculos necessários à contagem do número de átomos de ^{28}Si , uma vez que assegura que a maioria destes tem massa idêntica e que a estrutura cristalina é constituída por um padrão previsível de espaçamento entre estes mesmos átomos.



Figura 3. Exemplo de cristal de ^{28}Si de elevada pureza isotópica de 99,9995 %, em forma de esfera quase perfeita, usada na realização da mole do SI (cortesia do NIST).

O número de átomos no cristal esférico uniforme de ^{28}Si , que permite calcular a constante de Avogadro N_A , é contado medindo-se o volume da esfera e dividindo-o pelo volume ocupado por um único átomo. O volume da esfera de ^{28}Si é calculado através da medição do seu diâmetro por meio de interferómetros, com uma precisão de nanómetros. Por outro lado, a estrutura do cristal de ^{28}Si é obtida recorrendo a técnicas de difracção de raios X. 

7 Amedeo Carlo Avogadro, cientista italiano ligado à teoria molecular, 1776–1856.

8 É utilizado o isótopo de silício mais comum: ^{28}Si (14 prótons e 14 neutrões). Este isótopo possui uma abundância na natureza de 92,23%.

9 Num valor de 99,9995%.