

A luz na medição de distâncias

Fernanda Saraiva

Unidade Laboratório Nacional de Metrologia, Departamento de Metrologia, Instituto Português da Qualidade, Rua António Gião n.º 2, Caparica

fsaraiva@ipq.pt

Resumo

A luz foi a fonte que, durante o século XX, conduziu à rutura científica e tecnológica da definição do metro e da respetiva realização prática. O conhecimento sobre a luz veio permitir que o metro, unidade de base da grandeza comprimento, passasse, desde 1960, a ser definido a partir de propriedades da luz. Paralelamente a evolução tecnológica veio possibilitar que, desde 1983, a realização prática do metro seja efetuada através de sistemas que produzem luz monocromática, colocando no museu de metrologia a cópia n.º 10 de platina iridiada com secção em X do protótipo internacional do metro, fruto da Convenção do Metro (1875) [1] e atribuída a Portugal na 1.ª Conferência Geral dos Pesos e Medidas (1889). Atualmente as medições de qualquer comprimento a nível da ciência ou da indústria, com exatidão elevada e incerteza de medição baixa, são realizadas com tecnologias que envolvem a luz. Este artigo descreve a importância da utilização da luz na medição de comprimento, expondo alguns dos patamares de cadeias de rastreabilidade metrológica, desde a realização do padrão metro, no Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português de Qualidade (IPQ), até ao utilizador final de instrumentos de medição de comprimento.

Introdução

A tentativa de uniformização de um sistema de unidades coerente teve o seu ponto de partida com a Revolução Francesa, onde um grupo de cientistas da Academia de Ciências (a Comissão de Pesos e Medidas), no qual se incluía Lavoisier, propõem um padrão universal e a adoção da divisão decimal, como forma de eliminar as barreiras comerciais que a panóplia de sistemas de pesos e medidas de cada país e até de cada região criavam, tornando morosa a comparação entre medições. Em 1791, a Assembleia Francesa adotou o metro para unidade de comprimento, definindo-o como sendo igual à décima milionésima parte

de um arco de meridiano. Quanto ao objetivo de criação de apenas um padrão universal (uma unidade de base) a que todas as medições estariam metrologicamente referenciadas, veio a tornar-se impraticável, sendo atualmente sete as unidades de base do Sistema internacional de Unidades (SI). A grande conquista desta Comissão foi ter conduzido à adoção mundial do sistema métrico decimal que permite dividir a unidade metrológica em múltiplos e submúltiplos de dez. O metro é a única unidade de comprimento¹. A utilização dos seus múltiplos e submúltiplos de base dez (decâmetro, hectómetro, quilómetro, ... decímetro, centímetro, milímetro, ...) tornou os cálculos muito mais simples, respondendo às necessidades práticas e permitindo a comparação imediata de resultados científicos, industriais e tecnológicos.

A evolução do conhecimento científico sobre as propriedades da luz (a velocidade da luz no vácuo é uma constante fundamental e exata da física) e os trabalhos sobre interferometria óptica desenvolvidos por A. Michelson, no final do século XIX, conduziram à atual definição da unidade de comprimento: o metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vácuo, durante um tempo de $1/299\,792\,458$ do segundo [2]. Um padrão de medição deve ser reprodutível, estável ao longo do tempo, uniforme e possuir exatidão máxima. Estas propriedades tornaram-se possíveis, no caso do metro, com o aparecimento do laser (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*) e com a evolução tecnológica que levou à estabilização em frequência

¹ O sistema legal das unidades de medida em vigor em Portugal é definido no Decreto-Lei n.º 128/2010 de 3 de dezembro. Nele são apresentados os nomes, os símbolos e as definições das unidades, os prefixos e símbolos dos múltiplos e os submúltiplos dessas mesmas unidades e as recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos.

(ou comprimento de onda) da luz emitida, permitindo a sua utilização na realização de um novo padrão de comprimento e levando a que a realização prática da unidade seja agora universal [3]. A luz é assim a base da definição e da realização prática do metro. Os leitores encontram informação mais detalhada sobre esta matéria nas referências bibliográficas deste texto. É também com a luz e as tecnologias a ela associadas que se faz a disseminação do metro e a medição de distâncias com exatidão elevada, sendo pertinente a apresentação de alguns desses processos de medição e de calibração de padrões, assim como de exemplos de cadeias de rastreabilidade metrológica.

Medição com frações do comprimento de onda da luz

No final do século XIX, Albert Michelson, cientista americano inventor do interferómetro que recebeu o seu nome, instrumento capaz de medir pequenas distâncias em função do comprimento de onda da luz, propõe o uso de interferómetros ópticos para medir comprimento. A luz produz um fenómeno designado interferência que representa a sobreposição de uma ou mais ondas num ponto ou posição de referência, criando no espaço franjas de interferência. Entre 1892 e 1893, Michelson e Benoit efetuaram medições de padrões do metro (barra de platina iridiada) no Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) em função do comprimento de onda da linha vermelha de uma lâmpada de cádmio [4]. Estes trabalhos foram o início da relação luz – medição de distância, tendo contribuído para a atribuição a Michelson do Prémio Nobel da Física em 1907 [5,6].

Luz, laser-padrão de comprimento e interferómetro

A luz é a radiação eletromagnética de uma pequena região do espectro correspondente à radiação que o olho humano deteta, com comprimentos de onda variando aproximadamente de 400 nm a 700 nm. Como cada radiação é caracterizada pelo seu comprimento de onda (λ) e sendo o laser um equipamento capaz de emitir luz quase monocromática, torna-se evidente a sua utilização em metrologia dimensional. A estabilização em frequência de lasers He-Ne veio permitir a emissão de luz monocromática, ou seja, com apenas um comprimento de onda e com incertezas da ordem dos 2,5 kHz. Este tipo de lasers, estabilizados com células de iodo ($^{127}\text{I}_2$) (Figura 1), possui características metrológicas que dão resposta ao especificado pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) para a realização do metro (incertezas relativas em comprimento de onda ou frequência da ordem dos $2,1 \times 10^{-11}$) [7], sendo por isso designados normalmente de laser-padrão de comprimento. A determinação com elevada exatidão da frequência (ou comprimento



Fig. 1 - Laser-padrão IPQ3 em alinhamento e após a substituição do tubo de He-Ne. Este sistema laser é constituído por uma cavidade de ressonância formada por dois espelhos, estando um solidário com o topo do tubo laser e o outro solidário com um piezoelétrico, e por uma célula de iodo colocada no interior da cavidade de ressonância do laser. A unidade de controlo deste sistema laser permite o controlo do comprimento da cavidade e a fixação do mesmo, conseguindo-se a emissão de um feixe de luz monocromático e estabilizado de acordo com as recomendações do CIPM para a realização prática da definição do metro: $f_{\text{IPQ3}} = 473\,612\,353\,601,5$ kHz; $\lambda_{\text{IPQ3}} = 632\,991\,212,6$ fm.

de onda) é obtida por comparação com uma frequência-padrão de um sintetizador de frequências ópticas (SFO), sendo este último o padrão atual do topo da cadeia metrológica de comprimento. Na prática, os lasers-padrão He-Ne, estabilizados com células de iodo, são ainda os sistemas internacionais mais utilizados para a realização prática e disseminação do metro.

O avanço tecnológico dos lasers veio substituir as lâmpadas que Michelson utilizou no seu interferómetro, mantendo-se contudo o princípio de medição através de frações de franja de interferência. O padrão de interferências – sucessão contínua de franjas claras e escuras – gerado por um interferómetro do tipo Michelson é caracterizado pelo comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida pela fonte de luz utilizada. Os interferómetros laser são atualmente utilizados para medir distâncias com exatidão elevada e com baixas incertezas de medição. Para que estes objetivos sejam atingidos, o valor do comprimento de onda da radiação laser tem de ser conhecido, sendo obtido através da calibração do laser do interferómetro. Nestas calibrações, os resultados de medição do padrão são comparados com os do equipamento em calibração, estabelecendo-se uma relação entre os valores do padrão de referência, neste caso os do laser-padrão de He-Ne, com os resultados de indicação do equipamento em ensaio, ou seja, com os do laser do interferómetro. Este processo de calibração é levado a cabo nos laboratórios nacionais de metrologia e constitui um dos primeiros patamares da disseminação do metro.

A luz na medição do comprimento de blocos-padrão

Os blocos-padrão têm rastreabilidade metrológica à definição do metro porque são calibrados por interferometria óptica e são um elo de ligação da cadeia de rastreabilidade metrológica para a indústria. Os blocos-padrão são padrões de comprimento de topo, isto é, definem um comprimento-padrão entre duas faces opostas, planas e paralelas (valor nominal l). Os mais comuns são de aço, de secção retangular 9 mm x 30 mm, podendo também ser fabricados com outros materiais (ex: cerâmica ou liga de tungsténio e



Fig. 2 - Conjunto de blocos-padrão de aço. Regra geral, os conjuntos são constituídos por 88, 111 ou 122 blocos, podendo fabricar-se outros para resposta a calibrações de equipamentos de medição específicos como é o caso do micrómetro (ISO 3611:2010) e com classes de exatidão diferentes.

carbono) [8]. O acabamento superficial das suas faces de medição, com tolerâncias de planeza da ordem dos 50 nm (para os de classe de exatidão k), permite a aderência entre si formando pilhas, com comprimentos variáveis, de modo a satisfazer os requisitos dos utilizadores. Um conjunto básico de blocos-padrão é constituído por 111 blocos, com valores nominais de 0,0005 mm a 100 mm em que a primeira série de nove blocos, de 1,001 mm a 1,009 mm, tem um passo de 1 μm (Figura 2).

Método de medição

O interferómetro para a calibração de blocos-padrão é constituído por dois lasers estabilizados e calibrados, que funcionam como padrões de referência do processo. O processo de medição é baseado no método de fração de franja, desenvolvido por Michelson e Benoit, que aplica o princípio de um determinado comprimento poder ser expresso por um único conjunto de ordens de interferência, para cada comprimento de onda (λ_{ar}). O conjunto óptico constituído por espelhos, divisores de feixe e detetores é alinhado segundo o esquema do interferómetro de tipo Michelson (Figura 3). Nos topos dos braços do interferóme-

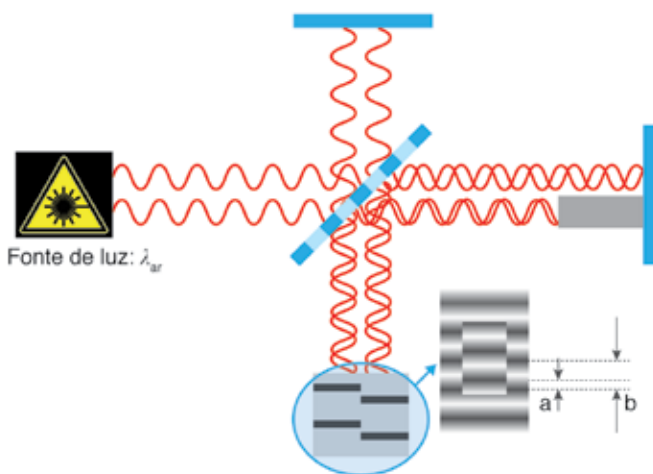


Fig. 3 - Esquema de um interferómetro para a medição de blocos-padrão. O comprimento de cada bloco-padrão é determinado medindo-se a fração de franja (a/b) entre o padrão de interferências formado no topo do bloco e o padrão de interferência formado no topo da superfície do prato.

tro existem duas superfícies refletoras, sendo uma constituída pelo conjunto prato mais bloco-padrão (Figura 4) e a outra por um espelho 100 % refletor.

A fração de franja a/b , determinada a partir do padrão de interferências gerado (onde a é a diferença entre a franja no prato e no bloco e b a distância entre franjas, função do λ_{ar} da radiação utilizada), permite obter o erro de medição do comprimento do bloco-padrão, h , através da Equação 1.

$$h = \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda_{\text{ar}}}{2} \quad (1)$$

O valor de medição, v_m , do comprimento de cada bloco-padrão é dado pela soma do valor nominal, l com h .

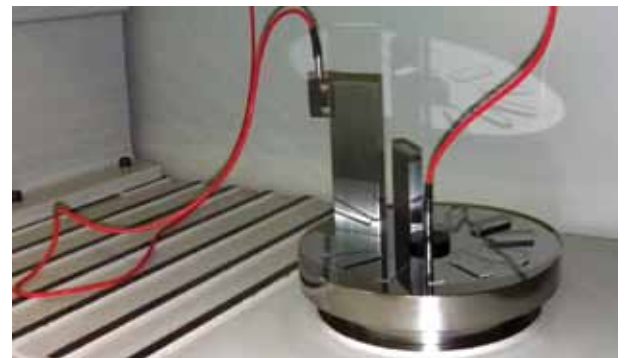


Fig. 4 - Conjunto de blocos-padrão aderidos ao prato de referência na cabine do interferómetro, prontos para medição dos respetivos comprimentos por interferometria.

Resultado de medição de um bloco-padrão

Para concluir a calibração de um bloco-padrão, falta ainda a determinação de uma das parcelas fundamentais do resultado de medição, a incerteza de medição expandida, U [9]. A cada medição está sempre associada uma incerteza de medição. A grandeza [10] que pretendemos medir (resultado de medição do comprimento do bloco) é expressa através de $l_{vn} = v_m \pm U$. O método de medição utilizado e os parâmetros de influência no valor medido levam a que se tenha de ter em conta, no mínimo, as seguintes fontes de incerteza: comprimento de onda no vazio das radiações utilizadas, medição da fração de franja, temperatura do bloco-padrão, espessura do filme de aderência, erros de frente de onda, erros de alinhamento resultantes do desenho e alinhamento óptico, índice de refração do ar, temperatura, pressão e humidade do ar e incerteza do valor do coeficiente de expansão linear dos blocos-padrão [11]. O tratamento estatístico de todas as fontes de incerteza, incluídas no processo de calibração levado a cabo no laboratório de comprimento do IPQ, conduziu ao valor de $U=(26+0,28l)$ nm (para l de 0 mm a 100 mm). Os

resultados de medição expressos no certificado de calibração estão assim rastreados à realização prática do metro, permitindo a disseminação da unidade ao serem utilizados como valores de referência nos patamares seguintes da cadeia de rastreabilidade, quando na indústria os blocos-padrão são utilizados para a calibração de equipamentos de medição dimensional correntes, por exemplo: no caso dos micrómetros e paquímetros [12].

Cadeias de rastreabilidade metrológica

Os processos acima apresentados descrevem os patamares de uma cadeia de rastreabilidade metrológica de comprimento, iniciada com a realização prática da definição do metro através dos sistemas SFO e laser-padrão de He-Ne, e a sua disseminação com processos de calibração de padrões secundários de comprimento, que incluiu os lasers dos interferómetros, os blocos-padrão e os micrómetros. Nesta cadeia, o interferómetro de tipo Michelson utilizado é o de franjas estacionárias. No entanto, outro tipo de configuração óptica do interferómetro permite gerar franjas dinâmicas, sendo aplicado para medir longas distâncias com exatidão elevada. Este tipo de interferómetro, com apenas um laser calibrado por comparação com o laser-padrão de comprimento, é utilizado para a calibração de medidas materializadas de traços (escalas, fitas métricas e sondas), bancos de ensaio e máquinas ferramenta com controlo numérico.

Devido à evolução científica e tecnológica, o metro é realizado em qualquer ponto do mundo com a mesma exatidão. O rastreabilidade metrológica dos resultados das medições à realização prática do metro, através da calibração dos equipamentos de medição utilizados na investigação científica, é o garante para a comparação e aceitação, a nível universitário e internacional, dos resultados de medição. Por outro lado, o fabrico de componentes e acessórios em diferentes locais e destinados a serem montados num único conjunto ou sistema, é produzido e controlado por equipamentos de medição rastreados à realização do metro, permitindo criar critérios de aceitação/rejeição de peças baseadas em valores de medição exatos, com grandes vantagens económicas e funcionais, na produção e transação de bens.

Referências

1. *Convention du Mètre*. <http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention/>
2. *BIPM Compte Rendus 17th Conf. Gén. Poids et Mesures*, p. 45-49, p. 97-98 (1983).
3. F. Saraiva e outros, "O LASER na realização prática da definição do metro", *Gazeta de Física* 34(1), 8-11 (2011).
4. *The former Prototype Metre*. <http://www.bipm.org/en/measurement-units/history-si/former-prototype-metre.html>
5. *Nobel Lectures, Physics 1901-1921*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, (1967).
6. *Albert A. Michelson - Nobel Lecture: Recent Advances in Spectroscopy*. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1907/michelson-lecture.html.
7. *Practical realizations of the definitions of some important units: Recommended values of length standard frequencies*. <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
8. ISO 3650:1998 - (GPS) - *Length Standards - Gauge Blocks*.
9. *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections).
10. *Vocabulário Internacional de Metrologia- Conceitos fundamentais e gerais e termos associados*, 1.ª edição Luso-Brasileira, (2012).
11. J. E. Decker, J. Rr. Pekelsky, "Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry", *Metrologia* 34, 479-493 (1997).
12. F. Saraiva, "Paquímetro - Conceitos Metrológicos Associados", Poster. <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Pages/MatDidat.aspx>



Fernanda Saraiva é licenciada em Física Tecnológica pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa em 1991 e é técnica superior no Departamento de Metrologia do IPQ desde 1992. Atualmente é responsável pelos domínios de Comprimento e Ângulo e Gestora da Qualidade da Unidade Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ. Integra e desenvolve trabalhos em projetos de investigação metrológica internacionais e é coordenadora técnica dos ensaios de comparação de padrões a nível nacional, nas áreas de comprimento e ângulo. Sócia e membro dos corpos sociais da Academia de Amadores de Música, sócia da Sociedade Portuguesa de Metrologia e da Sociedade Portuguesa de Física.