

O laser na realização prática da definição do metro

Fernanda Saraiva, Liliana Eusébio, Sílvia Gentil, Eduarda Filipe

Unidade de Metrologia Científica e Aplicada - Laboratório Central de Metrologia, Instituto Português da Qualidade (IPQ)

fsaraiva@mail.ipq.pt

Resumo

O papel fundamental dos lasers no estado actual de desenvolvimento da realização prática da definição do metro, unidade de base da grandeza comprimento, do Sistema Internacional de Unidades (SI), os métodos de medição de frequências ópticas (e/ou comprimento de onda) e uma breve descrição da evolução histórica da definição e realização prática do metro, são os temas de fundo deste artigo.

Introdução histórica

Desde o início do século XX – pouco após Albert Michelson, em 1887, propor o uso de interferómetros para a medição da grandeza comprimento – que a interferometria é utilizada como técnica para medição de distâncias. O interferómetro de Michelson (interferómetro de espelhos) baseia-se na interferência de dois feixes de luz provenientes da mesma fonte. Esta emite um feixe de luz que, ao atravessar um divisor de feixe, é separado em dois, sendo cada um enviado por um trajecto diferente. Após a sua reflexão em espelhos colocados a meio dos trajectos, os feixes são recombinados no divisor, gerando-se um padrão de interferência composto por franjas regularmente espaçadas. Se a distância de um dos trajectos for mantida fixa, quando o outro espelho se afasta de metade do valor do comprimento de onda do feixe, cada franja desloca-se de uma inter-franja e ocupa o lugar da franja adjacente. Contando o número de franjas numa dada posição de referência, é possível determinar a distância percorrida pelo espelho móvel. O comprimento de onda (ou frequência) do feixe de luz constitui o valor de referência da distância percorrida, pelo que o seu valor tem de ser conhecido com a exactidão máxima permitida pela evolução da tecnologia.

Como consequência destes trabalhos, em 1960 o metro passou a ser definido em função de um número de comprimentos de onda da luz. Esta redefinição (ver caixa) a partir de um comprimento de onda ia ao encontro das aspirações da metrologia no sentido de definir uma grandeza que pudesse ser realizada em qualquer local sem alteração da incerteza associada. Com a utilização da lâmpada de cripton na realização prática desta definição, apenas se conseguiu uma redução de aproximadamente dez vezes o valor da incerteza relativa quando comparada com a realização feita com recurso ao protótipo internacional do metro. As limita-

ções das lâmpadas de cripton (alcance de medição limitado, baixo contraste e dificuldades de utilização prática) e o avanço da tecnologia laser deixavam antever uma nova definição do metro.

Na década de 60 surge o laser que, pelas suas propriedades, despertou o interesse dos metrologistas. De imediato iniciaram-se estudos de investigação e desenvolvimento de técnicas de estabilização de frequência, de modo a permitir que o laser fosse utilizado como sistema para a realização prática da definição do metro. Contudo, nos primeiros lasers gasosos a frequência emitida podia variar de algumas centenas de megahertz, a que correspondia uma incerteza relativa que inviabilizava a sua utilização para este fim. De forma a resolver este problema, foram desenvolvidas pesquisas no melhoramento das técnicas de estabilização da frequência emitida pelos lasers, tendo surgido uma grande variedade de lasers estabilizados com capacidade de produzir uma frequência com incerteza relativa abaixo dos 10^{-10} , muito além do valor obtido com a lâmpada de cripton. Uma das técnicas de estabilização consiste na introdução de uma célula de absorção no interior da cavidade de ressonância, associada a um circuito de estabilização, na unidade de controlo do laser. Esta evolução tecnológica levou à actual definição do metro.

O metro

Em 1983, no Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) durante a 17^a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) foi estabelecida (Resolução n^o1), a definição actual do metro [1]:

“O metro é o comprimento do trajecto percorrido pela luz, no vazio, durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ do segundo.”

Esta definição encontra-se ligada a uma constante fundamental e exacta da física, a velocidade da luz no vácuo c_0 (CODATA¹), tornando a sua realização prática universal. Na sequência da 17^a CGPM, o

Comité Internacional de Pesos e Medidas estabeleceu as recomendações para a realização prática da definição do metro [2,3].

A radiação do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo é actualmente o sistema mais utilizado internacionalmente para a realização prática desta definição. A utilização deste sistema, com uma incerteza relativa baixa, ou de outro sistema laser calibrado por comparação com este, permitem a medição de comprimento, l , em função de um número b de comprimentos de onda, $l = \lambda \times b$, por interferometria.

O laser He-Ne na realização prática da definição do metro

A Figura 1 representa o esquema típico de um laser He-Ne estabilizado com uma célula de absorção de iodo utilizado na realização prática da definição do metro. A cabeça do laser consiste num tubo de plasma de He-Ne e numa célula de absorção de iodo montada no interior da cavidade de ressonância formada por dois espelhos acoplados em actuadores piezoeléctricos (PZT).

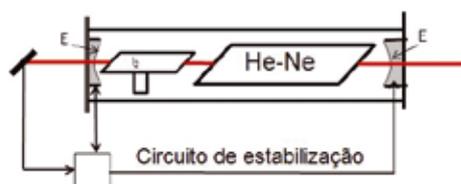


Fig. 1 - Esquema de um laser He-Ne estabilizado. No interior da cavidade de ressonância formada pelos dois espelhos de topo (E) encontra-se o tubo de plasma de He-Ne e a célula de iodo I_2 . O circuito de estabilização permite o controlo da frequência emitida pelo laser, ao regular os actuadores piezoeléctricos solidários com os espelhos, fixando o comprimento da cavidade de ressonância.

Num sistema laser deste tipo, a radiação quase monocromática interage com um conjunto de átomos, iões ou moléculas (meio absorvente) fornecendo riscas de absorção que são utilizadas como referência para a estabilização de frequência (Figura2). A frequência do laser é ajustada em função do comprimento da cavidade de ressonância, transferindo parte da energia da radiação laser para o meio absorvente, sendo detectada uma curva de absorção característica que é função da frequência do laser.

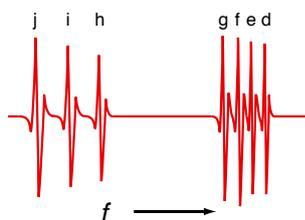


Figura 2 - Curva de emissão característica do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular. Os picos do gráfico correspondem às riscas das componentes hiperfinas da transição R(127) do I_2 . A separação entre as componentes d, e, f, g, é de aproximadamente 13 MHz e a largura a meia altura do valor máximo de cada risca é de 5 MHz.

O circuito de estabilização converte o sinal de absorção num sinal de erro que é usado para controlo dos PZT permitindo a estabilização da frequência do laser, conseguindo-se uma incerteza relativa padrão para o valor da frequência emitida da ordem de $2,1 \times 10^{-11}$, ao fixar o comprimento da cavidade de ressonância [4]. A reprodutibilidade destes sistemas laser é avaliada pela medição da frequência emitida em função dos parâmetros de funcionamento dos mesmos e através de comparações de lasers de diferentes Laboratórios Nacionais de Metrologia [5]. As comparações entre lasers estabilizados têm mostrado que a frequência da maioria dos lasers He-Ne coincide em aproximadamente 12 kHz, para os parâmetros de funcionamento definidos nas especificações da 17ª CGPM [6].

Dadas as características de estabilidade e reprodutibilidade destes sistemas laser, a radiação (frequência) correspondente à transição R(127) 11-5 componente $a_{16}(f)$ da molécula $^{127}I_2$, ($f = 473\,612\,353\,604$ kHz; $\lambda = 632\,991\,212,58$ fm), é uma das radiações recomendadas pelo BIPM para a realização prática da definição do metro.

O laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo, $^{127}I_2$, é usado em muitos laboratórios como padrão de referência para medições interferométricas de comprimento e calibrações de outros lasers por comparação, utilizando o método de batimento de frequência.

Lasers femtosegundo, um novo impulso na realização prática da definição do metro

O desenvolvimento conjugado da tecnologia de estabilização de lasers, de lasers ultra-rápidos e da técnica do bloqueamento dos modos de funcionamento, conduziu ao controlo do espectro óptico. Os trabalhos nesta área foram levados a cabo pela equipa de John Hall e Theodor Hänsch, tendo-lhes sido atribuído o prémio Nobel da Física em 2005 [7]. O sistema, denominado Sintetizador de Frequências Ópticas (SFO), é o resultado deste trabalho, permitindo a geração de qualquer frequência do espectro óptico (em vez de apenas uma, como a emitida por um laser He-Ne), com uma incerteza relativa próxima da do oscilador de céσιο, com que se realiza a unidade de base do SI da grandeza tempo, o segundo. O SFO faz assim a conexão de uma frequência óptica a uma microonda (10 MHz) emitida pelo oscilador de céσιο [8].

Os componentes principais do SFO são: um laser femtosegundo, uma fibra óptica não linear microestruturada, um oscilador de céσιο, conjuntos ópticos e componentes electrónicos.

O laser femtosegundo gera impulsos ultra-rápidos (alguns fs), regularmente espaçados (também designados de pente de frequências), ao estabelecer uma relação de fase fixa ao longo do espectro de frequência [9,10]. Para que o laser femtosegundo tenha aplicabilidade metrológica é necessário conhecer o espaçamento das riscas do pente de frequências f_{rep} (frequência de repetição) e a sua posição f_0 (frequência de offset) (Figuras 3 e 4).

¹ CODATA (Committee on Data for Science and Technology): Valores internacionalmente recomendados para as Constantes Fundamentais da Física e da Química, disponível em: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/international.html>

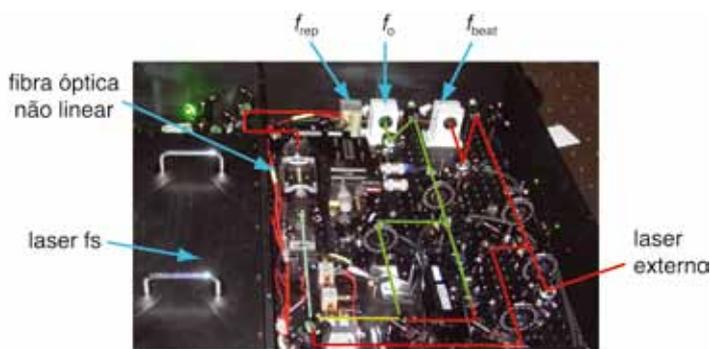


Fig. 3 - Componentes do SFO (Laboratório de Comprimento, IPQ). As frequências f_{rep} e f_0 são grandezas a medir e controlar e a frequência f_{beat} é a mensuranda em avaliação no processo de calibração de lasers e disseminação da unidade

A medição de f_{rep} é directa, através de um fotodíodo. Já a de f_0 requer uma abordagem interferométrica, pois envolve medição de diferenças de fase das ondas de pulso para impulso. O laser femtosegundo, ao atravessar a fibra óptica não linear microestruturada, dá origem a novas frequências ópticas. A duplicação do valor da frequência (isto é, de f para $2f$) de uma risca com um dado índice n (sendo $f_n = f_{rep} + f_0$), da parte inferior do espectro óptico, correspondente à região do infravermelho próximo, produz uma frequência $2fn = 2nf_{rep} + 2f_0$ próxima da risca do pente de frequências situada na parte mais elevada do espectro óptico de índice $2n$, dada por $f_{2n} = 2nf_{rep} + f_0$. A frequência de batimento entre $2f_n$ e f_{2n} permite a medição da frequência de offset f_0 (Figura 4): $2f_n - f_{2n} = 2(nf_{rep} + f_0) - (2nf_{rep} + f_0) = f_0$.

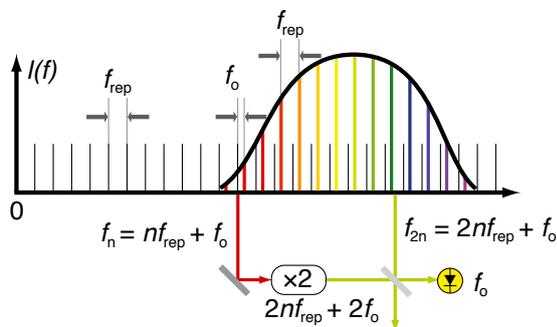


Fig. 4 - Esquema de determinação da frequência de offset.

Para a estabilização do pente de frequências do laser femtosegundo, f_{rep} e f_0 são controladas e fixas na frequência de 10 MHz, proveniente do oscilador de céσιο, o que permite a calibração absoluta de frequências ópticas com incertezas relativas inferiores a 10^{-13} , ou seja, com elevada exactidão, colocando o SFO no topo da cadeia hierárquica de padrões de comprimento [11].

O batimento de frequências f_{beat} entre uma frequência do espectro óptico do SFO, e a frequência de um laser externo, por exemplo de um laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo, permite a determinação da frequência do laser externo e a disseminação da unidade SI de comprimento [12].

Em conclusão o SFO, para além permitir a realização prática da definição do metro, garante a disseminação da unidade SI de comprimento.

Breve evolução histórica da definição e realização prática da definição do metro

Em 1792, em plena Revolução Francesa, foi adoptado o Sistema Métrico Decimal. Neste sistema, o metro é definido como sendo “igual à décima milionésima parte de um quarto do meridiano terrestre”. De Junho de 1792 até final de 1798, os astrónomos Delambre e Méchain efectuaram as medições do arco de meridiano entre Dunquerque e Barcelona, que conduziram à determinação de um comprimento geodésico de 1 metro. Em 1799, este comprimento é transferido para um protótipo, o “Mètre des Archives” e a realização prática desta definição é a de que o “metro é igual à distância entre topos da barra de secção rectangular de platina”.

A difusão internacional do sistema métrico decimal avança e em 20 de Maio de 1875 é assinada a “Convenção do Metro” – tratado diplomático assinado por 17 países, entre os quais Portugal, com a intenção de internacionalmente criar as unidades e os padrões e divulgar o Sistema Métrico Decimal. Como consequência, é formado o Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), sob a autoridade da CGPM e é criado o BIPM, entidade científica com o objectivo de estabelecer e manter o Sistema Métrico Decimal e realizar investigação científica aplicada à metrologia. Esta entidade é instalada no Pavillon de Breteuil, em Sèvres (Paris) em 1875 [13]. De 1878 a 1889 foram fabricados protótipos, com secção em X, sendo um seleccionado como Protótipo Internacional M do metro e depositado no BIPM, representando tanto a definição como a realização prática do metro. Os restantes protótipos foram sorteados, na 1ª CGPM, pelos países signatários da Convenção do Metro tendo cabido a Portugal a cópia nº 10 (Figuras 5 e 6) [14].

Em 1889, o metro passa a ser definido pela “distância, a 0°, entre dois traços médios marcados na régua de secção em X de platina iridiada”. Michelson trabalhou no BIPM entre 1892 e 1893, onde construiu um dos seus interferómetros e realizou medições do Protótipo Internacional M utilizando a luz de uma lâmpada de cádmio. A partir deste ponto são realizadas investigações com vista a identificar uma fonte óptica que permita a introdução de uma nova definição do metro baseada numa constante fundamental, que possa ser realizada universalmente, seja reproduzível, estável ao longo do tempo e com a máxima exactidão. Em 1952 o CIPM decide investigar a possibilidade de redefinir o metro em função do comprimento de onda da luz, e cria para esse fim o *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*. Em 1960, na 11ª CGPM, é aprovada a redefinição do metro e este passa a ser definido como “o comprimento igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda no vazio da radiação correspondente à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$, do isótopo de cripton Kr-86”. Esta definição não incluía recomendações sobre como realizar este comprimento de onda, pelo que sistemas como lâmpadas espectrais ou feixes atómicos podiam ser usados para gerar esta radiação.

A dificuldade de manuseamento das lâmpadas de cripton, o aparecimento dos lasers, e o rápido desenvolvimento de técnicas de estabilização da

frequência laser e da metrologia óptica, abriram as portas para a evolução da definição e realização prática da actual definição do metro.

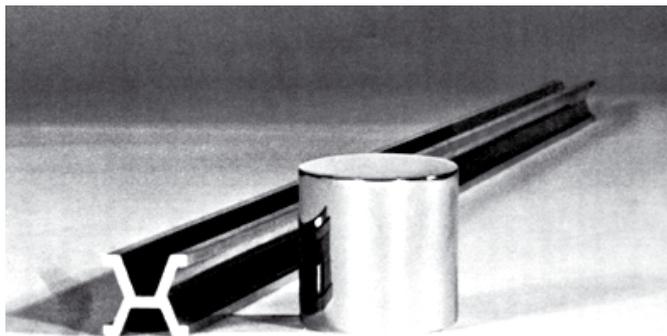


Fig. 5 - Padrões protótipos internacionais do metro e do quilograma de 1889 [13].



Fig. 6 - Topos da cópia nº 10 (Museu de Metrologia; IPQ)

- 1 BIPM Comptes Rendus 17 Conf. Gén. Poids et Mesures, 1983, 45-49 e 97-98.
- 2 BIPM Proc. Verb. Com. Int. Poids et Mesures (1983) 51, 25-28, Recommendation 1, CI-1983; Documents Concerning the New Definition of the Metre, Metrologia 19, 163-177 (1984).
- 3 T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of optical frequency standards (2001)", Metrologia 40, 103-133 (2003).
- 4 J. Helmcke, "Realization of the metre by frequency-stabilized lasers", Meas. Sci. Technol. 14, 1187-1199 (2003).
- 5 E. Prieto, F. Saraiva, J.-M. Chartier, "International comparison of stabilized He-Ne lasers by the saturated absorption of $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ involving the CEM (Spain), the IPQ (Portugal) and BIPM", Metrologia 32, 379-384 (1995).
- 6 "Key and supplementary comparisons - Results-BIPM.L-K11 and APMP.L-K11", http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbi-mages/bipm.l-k11/1-k11_big_graph_aug07.gif
- 7 "Laser-based precision spectroscopy and optical frequency comb techniques", http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf
- 8 S. T. Cundiff, Jun Ye, J. L. Hall, "Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers", Review of Scientific Instruments 72(10), 3749-3771 (2001).
- 9 F. Saraiva *et al.*, "Transverse disciplines in metrology", French College of Metrology, 183-191 (2009); ISBN 978-184-821-048-6.
- 10 S. A. Diddams *et al.*, "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb", Physical Review Letters 84, 5102-5105 (2000).
- 11 D. J. Jones *et al.*, "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked laser and direct optical frequency synthesis", Science 288 (5466), 635 (2000).
- 12 T. H. Yoon, J. Ye, J.L. Hall, J.-M. Chartier, "Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm", Appl. Phys. B 72, 221-226 (2001).
- 13 "L'Aventure du Mètre", Catálogo da exposição, CNAM-Musée National des Techniques, Paris (1989); ISBN 290-820-701-X.
- 14 António Cruz, "Pesos e Medidas em Portugal", Instituto Português da Qualidade, 2007, ISBN 978-972-763-098-1.



Fernanda Saraiva é licenciada em Física Tecnológica pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Desde 1992 desenvolve a sua actividade no Departamento de Metrologia do IPQ, sendo actualmente responsável pelos Domínios de Comprimento e Rugosidade.



Eduarda Filipe é licenciada em Engenharia Electrotécnica - Ramo Telecomunicações e Electrónica pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, e Mestre em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Desde 1984 desenvolve a sua actividade no Departamento Metrologia do IPQ, sendo actualmente Directora deste Departamento.



Sílvia Gentil é licenciada em Ciências da Engenharia - Engenharia Mecânica, pelo Instituto Superior Técnico. Actualmente desenvolve a sua actividade no Departamento de Metrologia do IPQ, nos Domínios Metrológicos Comprimento, Rugosidade e Ângulo, sendo responsável por este último.



Liliana Eusébio é licenciada em Engenharia Física (licenciatura pré-Bolonha) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Desde 2008 desenvolve a sua actividade no Domínio Metrológico de Comprimento no Departamento de Metrologia do IPQ.