

Calibração de Sistemas Laser Interferométricos em Distância no Laboratório de Comprimento

F. Saraiva, R. Dias, S. Gentil

Laboratório Central de Metrologia, Instituto Português da Qualidade
Rua António Gião 2, 2829 – 519 Caparica, Portugal; e-mail: fsaraiva@mail.ipq.pt;
rdias@mail.ipq.pt ; sgentil@mail.ipq.pt

Resumo

O Laboratório de Comprimento (LCO) do Laboratório Central de Metrologia (LCM), ao longo dos anos, tem procurado identificar e satisfazer adequadamente as necessidades, actuais e futuras, dos seus clientes, Laboratórios Acreditados em Metrologia Dimensional e Industria Nacional. Com vista à satisfação das mesmas implementou novos serviços de calibração prestados no campo da medição com sistemas Laser interferométricos.

Da convergência de estudos, formação e trabalho laboratorial, o LCO implementou em 2006 os seguintes serviços de calibração: Sistemas Laser Interferométricos em Distância; Ópticas de rectitude; Ópticas angulares e Esquadro ópticos.

O trabalho desenvolvido assume uma importância adicional visto que vem permitir a realização global do processo de calibração de sistemas Laser interferométricos no LCO, que até à data, só efectuava a calibração em comprimento de onda.

O presente artigo incide sobre os estudos e aplicações necessários à implementação da calibração de sistemas Laser interferométricos em distância, nomeadamente no que diz respeito à descrição do conjunto de etapas a implementar no laboratório, correcções teóricas a efectuar, balanço de incerteza e consequente emissão de um certificado de calibração.

Palavras chave: Interferometria, medição de distâncias, comprimento de onda, lasers.

Sistema Laser Interferométrico

Os sistemas Laser interferométricos podem ser referidos como padrões secundários ou de trabalho com resolução da ordem da centésima do micrómetro e são frequentemente utilizados em calibrações na área de Metrologia Dimensional. A rastreabilidade destes sistemas, à realização prática da definição do metro [1] é conseguida através da calibração em frequência (ou comprimento de onda) por comparação com os sistema Laser Padrão (Laser de He-Ne estabilizados com uma célula de iodo) cujo valor do comprimento de onda ou da frequência, pode ser utilizado com a incerteza explicitada no Certificado de Calibração correspondente e com as especificações e as boas práticas de laboratório a ser seguidas. Por este processo é determinada a frequência e ou o comprimento de onda do feixe emitido. Este tipo de sistemas Laser interferométricos, para além das medições lineares em distância, têm a possibilidade de medir desvios angulares, rectitude e perpendicularidade, possuindo para o facto acessórios ópticos correspondentes aos parâmetros a avaliar.

Assim, uma calibração completa destes sistemas envolve a calibração em comprimento de onda, em distância, em ângulo (ópticas angulares) e do esquadro óptico.

Como referido anteriormente este documento incide exclusivamente na implementação da calibração de sistemas Laser interferométricos em distância.

Entre outras aplicações, os sistemas Laser interferométricos são dos mais utilizados a nível nacional para a calibração de máquinas ferramentas.

Princípio Teórico de um Laser Interferométrico

De uma forma resumida pode descrever-se o princípio de medição de um sistema Laser interferométrico que utiliza duas frequências distintas (“Heterodyne”), da seguinte forma:

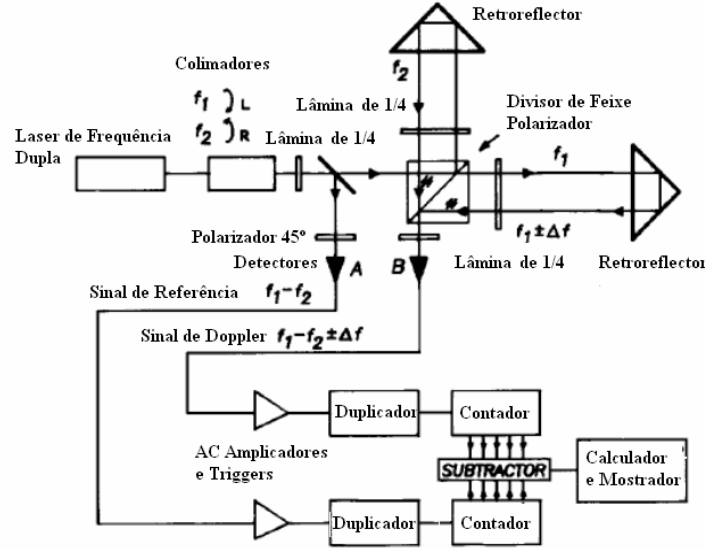


Figura 1. Princípio teórico

Na unidade Laser, um Laser de He-Ne emite um feixe sobre o qual é aplicado um campo magnético axial, dividindo-o em dois feixes com frequências f_1 e f_2 por efeito de Zeeman. A diferença de frequência entre estes, é da ordem dos 2 MHz e ambos os feixes têm polarização circular, com direcções opostas. Uma lâmina de atraso (de $\lambda/4$), colocada no percurso destes, transforma as polarizações circulares das frequências f_1 e f_2 em polarizações lineares ortogonais entre si, uma no plano horizontal e outra no plano vertical. Antes do feixe laser ser emitido pela unidade de controlo uma parte deste é desviado por um divisor de feixe e detectado por um fotodetector A (fig.1). A amplitude de modulação deste sinal, com frequência f_1-f_2 , é detectada e transmitida ao contador. Os dois feixes, com polarização linear e ortogonais emitidos, f_1 e f_2 , são separados por um divisor de feixe polarizador que, no caso da montagem interferométrica representada na fig.1 são transformados em feixes com polarização circular, em virtude de passarem por outra lâmina de atraso ($\lambda/4$). Após a reflexão nos cubos retroreflectores (que correspondem aos extremos dos braços do interferómetro), os feixes passam novamente pelas lâminas de atraso, onde são convertidos outra vez em feixes com polarização linear e ortogonal. Após a recombinação dos feixes no divisor de feixe, um polarizador a 45° coloca as componentes dos feixes sobre esse plano. O sinal é detectado pelo fotodetector B. A amplitude de modulação com frequência $f_1-f_2-\Delta f$ é enviada para o outro contador. A variação de frequência, Δf , é devida ao efeito Doppler e é gerada pelo deslocamento do cubo retroreflector móvel. Os dois sinais são então comparados, sendo a frequência obtida dada por:

$$\Delta f = -2f_2 n \frac{v}{c} = -2 \frac{v}{\lambda_2} \quad (1)$$

Ou seja

$$v = -\frac{\lambda_2 \Delta f}{2} \quad (2)$$

onde λ_2 é o comprimento de onda correspondente à frequência f_2 e v é a velocidade de propagação do feixe.

Por integração em função do tempo, é determinado o valor do deslocamento, L , do cubo retroreflector móvel [5]:

$$L = \int_{t_0}^{t_1} v \, dt = -\frac{\lambda_2}{2} \int_{t_0}^{t_1} \Delta f \, dt \quad (3)$$

Esquema de Montagem do Laser de referência

A medição de distâncias lineares é efectuada usando os dois cubos retroreflectores e um divisor de feixe, para além da unidade Laser [8]. O divisor de feixe é colocado entre a unidade Laser e os cubos retroreflectores, sendo um dos cubos fixo e em contacto com o divisor de feixe, enquanto o outro se desloca ao longo do eixo de medição. O valor medido pelo sistema Laser interferométrico é apresentado no mostrador digital do sistema interferométrico, corresponde à distância percorrida pelo cubo retroreflector móvel ao longo do eixo de medição, em relação ao divisor de feixe. A figura 2 apresenta a montagem do sistema Laser interferométrico para medição de distâncias no Laboratório de Comprimento.

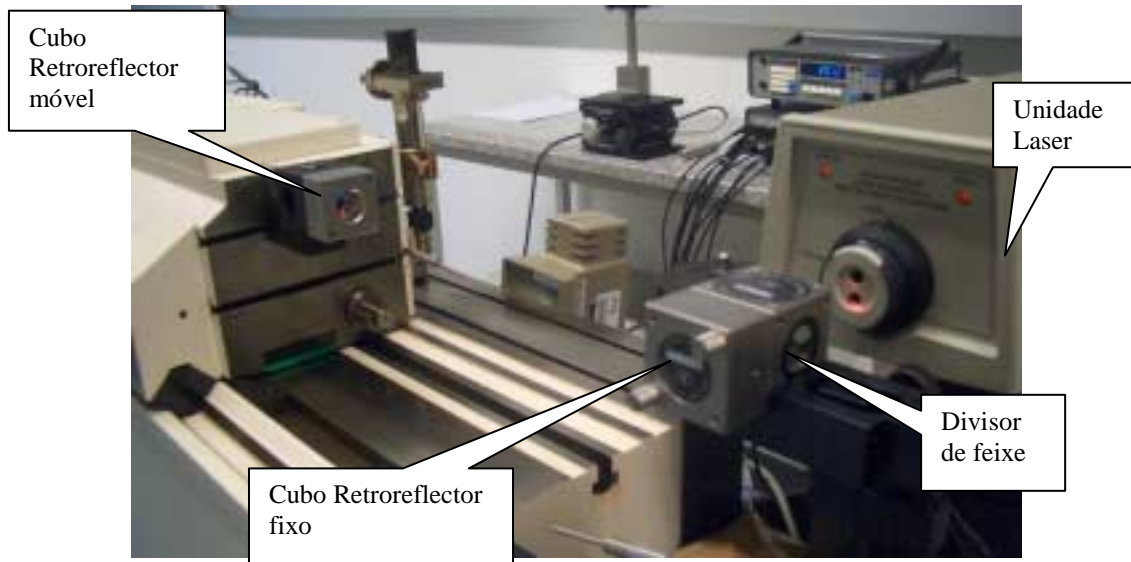


Figura 2. Sistema Laser interferométrico

Calibração de Sistemas Laser Interferométricos em Distância

O esquema de montagem de calibração consiste na utilização de um só conjunto de sistemas ópticos (cubos retroreflectores e divisor de feixe), partilhado pelos dois sistemas interferométricos Laser, o de referência e o a calibrar. A Fig.3 apresenta o esquema teórico da montagem.

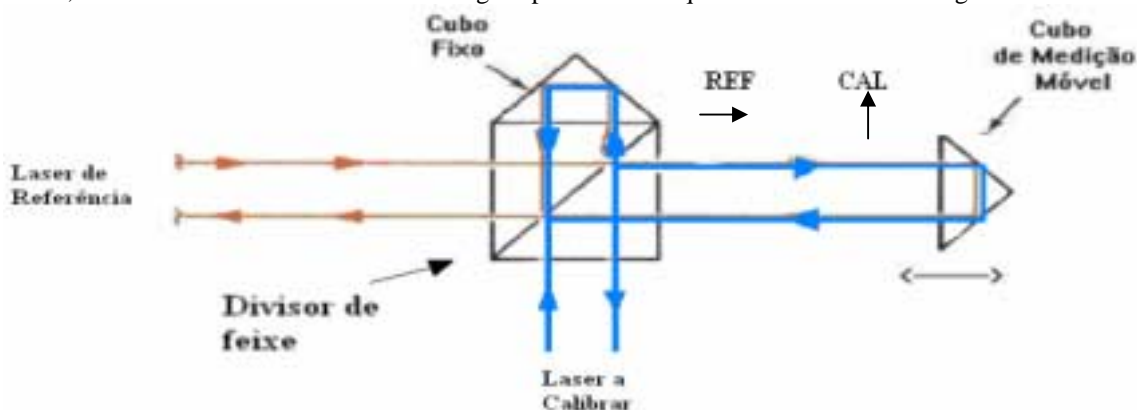


Figura 3. Configuração de Montagem

Os dois feixes laser incidem sobre o divisor de feixe perpendicularmente entre si. Como o divisor de feixe é polarizador, transmite os feixes com polarização vertical e reflecte os com polarização horizontal.

Assim, a polarização vertical do Laser de referência é transmitida pelo divisor de feixe em direcção ao cubo retrorreflector móvel, e a polarização horizontal é reflectida em direcção ao cubo retrorreflector fixo. Para o feixe Laser a calibrar, que incide perpendicularmente sobre o divisor de feixe em relação ao eixo de deslocamento, a componente vertical é transmitida pelo divisor de feixe para o cubo retrorreflector fixo, sendo a outra componente da polarização reflectida para o cubo retrorreflector móvel. Este facto, permite que em cada braço do interferómetro, os dois feixes Laser (Laser a calibrar e Laser de referência) se propaguem com polarizações ortogonais entre si, o que garante a não existência de interferências entre os dois feixes, em cada um dos braços do interferómetro.

Contudo o divisor de feixe não reflecte totalmente a polarização horizontal. Com base nas experiências realizadas, o divisor de feixe permite a transmissão da componente horizontal em cerca de 10%, e reflecte cerca de 10% da polarização vertical. Assim, cerca de 10% de polarização vertical e 10% da polarização horizontal do Laser de Referência é direccionado para o Laser a Calibrar, o mesmo se passando no caso contrário.

Para colmatar esta situação, procede-se ao ajuste do alinhamento do Laser de referência de modo a que esses 10% não incidam sobre a porta de entrada da unidade Laser a calibrar.

Modos de funcionamento do interferómetro

Para avaliação das características e exactidão dos interferómetros são utilizados três métodos para avaliação da distância medida em função da correcção do índice de refração do ar, i.e. são utilizados três modos de funcionamento do Sistema Interferométrico Laser a calibrar, designados por:

Modo A : Os sensores das condições ambientais previstos pelo construtor do sistema Laser são conectados à unidade de controlo deste que efectua automaticamente a correcção do índice de refração.

Modo B : São utilizados sensores externos ao sistema interferómetro Laser, sendo introduzidos os valores da temperatura, pressão e humidade na unidade de controlo do laser interferométrico. Pode haver casos em que a unidade de controlo do interferómetro não permita a introdução destes valores, nesses casos é possível introduzir o factor de correcção (VOL), dado por:

$$VOL = \left(\frac{1}{n} - 0,999 \right) \cdot 10^6 \quad (4)$$

onde n é o índice de refração do ar. Neste modo de funcionamento os sensores do interferómetro são desligados.

Modo C : Desligando a compensação automática do Laser em estudo, ou seja, o interferómetro opera com valores padrão estabelecidos pelo fabricante, sendo normalmente, $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013,25 \text{ mbar}$ e $H = 50\%$, e utilizando as fórmulas de Edlen [2] é calculada a compensação a introduzir sobre a distância medida.

O erro de indicação da comparação dos dois sistemas interferométricos é dado por: $e = d - D$, onde d é a distância indicada pelo interferómetro a calibrar e D é a distância indicada pelo interferómetro de referência [5].

Incerteza da Medição

Avaliação da Incerteza de Medição: $u_c(l)$

Grandezas de entrada e incerteza-padrão associada:

- Repetibilidade (Avaliação “Tipo A”);
- Resolução do interferómetro de referência;
- Índice de refração do ar :

A correcção do valor do comprimento medido devido à variação do comprimento de onda no ar é função do índice de refração do ar. Esta correcção é efectuada pela medição dos parâmetros do ar (temperatura, pressão, e humidade) e calculada pela equação d’Edlen.

Na publicação do seu trabalho em 1966, Bengt Edlen deu a conhecer as relações que permitem calcular o índice do refração do ar em função da radiação utilizada e nas condições ambientais [2]. A avaliação do índice de refração do ar (nas condições ambientes) utilizando os valores de t , p , H (temperatura (°C), pressão (torr) e humidade(%), respectivamente) é dada pela equação (5), conhecida por equação de Bengt Edlen [3]:

$$n = 1 + \frac{1}{10^8} \frac{p}{96095,43} \left(8343,05 + \frac{2406294}{130 - \frac{1}{0,633^2}} + \frac{15999}{38,9 - \frac{1}{0,633^2}} \right) \times \left(\frac{1 + 10^{-8} (0,601 - 0,00972 \cdot t) p}{1 + 0,003661t} \right) - \frac{H}{10^{10}} (1910,1 + 145,0t) \cdot \left(3,7345 - \frac{0,0401}{0,633^2} \right) \quad (5)$$

Tendo em conta o desvio padrão dos valores médios da temperatura, pressão atmosférica e humidade presente no laboratório, a resolução dos equipamentos de medição e o erro associado à equação, determina-se o balanço de incerteza associado a este parâmetro (Tabela 1);

- Erro do Coseno: Um erro de alinhamento do eixo de medida do feixe Laser em relação ao eixo da deslocação do “carrinho” do banco de ensaios que suporta o cubo retroreflector introduz um erro de medida ΔL ;
- “Death Path”: é necessário efectuar a correcção na distância medida pelo sistema interferométrico devido ao índice de refração. No entanto, o sistema interferométrico só faz a compensação sobre o percurso percorrido pelo cubo retroreflector móvel, e não sobre o percurso efectuado pelo feixe Laser. Isto é, quando é iniciada uma medição, o cubo retroreflector móvel pode estar já a uma distância x do divisor de feixe. Essa distância x não é compensada pelo sistema interferométrico (“Death Path”), sendo apenas compensado o percurso efectuado pelo cubo retroreflector iniciado em x ;
- Desvios no deslocamento- Rectitude Vertical: o elemento móvel que suporta os cubos retroreflectores do interferómetro pode ao longo do percurso efectuado, sofrer um desvio angular perpendicular ao eixo de deslocamento, rectitude vertical Com base em estudos anteriormente realizados de rectitude, efectuados em relação ao banco de ensaios SIP, foi detectado um desvio angular máximo de $1,36 \times 10^{-5}$ radianos.

Incerteza-padrão da grandeza de saída:

$$u_c(l) = \sqrt{\sum_{i=l_n, l_{Co}, l_{RV}, l_{REF}} \left(\frac{\partial l}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (6)$$

A incerteza de medição expandida é dada por:

$$U = k \cdot u_c(l)$$

com $k=2$

Na Tabela 1 é apresentado o balanço de incerteza do processo de calibração.

Componente da incerteza padrão $u_c(e)$	Fonte de incerteza	Incerteza Padrão $u(x_i)$	$ c_{x_i} \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$u_i(e) \equiv c_{x_i} u(x_i)$ [μm] com L [mm]
	Incerteza tipo A:			
	Repetibilidade	110 nm	1	110 nm
	Incerteza Tipo B:			
$u_c(l_a)$	Índice de refração do ar	$0,25 \times 10^{-6}$	L	$0,25 \times 10^{-6} L$
$u(l_{REF})$	Leitura na unidade de controlo do Laser de Referência	2,9 nm	1	2,9 nm
$u(l_{CAL})$	Leitura do sistema a calibrar	2,9 nm	1	2,9 nm
	Geometria do Sistema:			
$u(l_{coREF})$	Erro do Coseno do Laser de Referência	$0,05 \times 10^{-6}$	L	$0,05 \times 10^{-6} L$
$u(l_{coCAL})$	Erro do Coseno do Laser a Calibrar	$0,05 \times 10^{-6}$	L	$0,05 \times 10^{-6} L$
$u(l_{SV})$	Rectitude Vertical	28 nm	1	28 nm
Incerteza Padrão combinada: $u_c(e) = 0,11 \mu\text{m} + 0,26 \times 10^{-6} L$				
Incerteza expandida com um factor de expansão k=2: $U = 0,22 \mu\text{m} + 0,54 \times 10^{-6} L$				

Tabela 1. Balanço de incerteza.

Resultados

No laboratório foram realizadas medições utilizando como referência o Laser Hewlett Packard e como Laser interferómetro a calibrar o Laser Spindler&Hoyer.

Foram efectuadas aquisições para 5 valores nominais (500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm e 2500 mm).

Os valores médios da temperatura, pressão e humidade durante as medições foram os seguintes:

$$t = (20,61 \pm 0,20) ^\circ\text{C}$$

$$p = (101120 \pm 145) \text{ Pa}$$

$$H = (46,5 \pm 2) \%$$

Foi calculada a média dos valores obtidos para cada distância nominal e para cada um dos modos de funcionamento dos Lasers e efectuada a avaliação da diferença entre esses respectivos valores. Os resultados finais são apresentados na Tabela 2.

Modo de Funcionamento do Laser em estudo	Distância Nominal (mm)	$e=d-D$ (μm)	Desvio Padrão Incerteza do “Tipo A” (μm)
A	500,00	0,76	0,03
	1000,00	1,51	0,04
	1500,00	2,32	0,07
	2000,00	3,10	0,05
	2500,00	3,83	0,07
B	500,00	0,12	0,05
	1000,00	0,24	0,01
	1500,00	0,29	0,06
	2000,00	0,40	0,04
	2500,00	0,48	0,07
C	500,00	0,08	0,04
	1000,00	0,23	0,03
	1500,00	0,31	0,03
	2000,00	0,47	0,01
	2500,00	0,51	0,05

Tabela 2. Apresentação dos resultados.

Conclusão

A realização do processo de calibração de sistemas Lasers interferométricos em distância foi implementado de acordo com a norma NP EN ISO/ IEC 17025. Com esse fim, foi concluído o procedimento de calibração número 1011406503, o balanço de incertezas e um certificado de calibração para o Sistema Laser Interferométrico Spindler&Hoyer pertencente ao LCO.

Bibliografia

- [1]. T.J. Quinn, “International report - Practical realization of the definition of the meter, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) *Metrologia*, 2003, **40**, nº2, 103-133.
- [2]. Bengt Edlén, “The Refractive Index of Air” *Metrologia*, 1966, Vol.2, nº2, 71-80.
- [3]. K.P. Birch and M.J. Downs, “Correction of the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air”, *Metrologia*, 1994, nº31, 315-316.
- [4]. Eugene Hecht “Óptica” 2ª Edição, Fundação Caloust Gulbenkian.
- [5]. Genevière Lipinski, “Measures dimensionnelles par interférométrie laser”, Techniques de l’Ingénieur, traité Measures et Contrôle.
- [6]. Jennifer E. Decker and James R. Pekelsky, “Uncertainty for the Measurement of the Gauge Blocks by Optical Interferometry”, 1996 NRC nº40001.
- [7]. “Guia para a expressão da incerteza de medição no laboratórios de Calibração” IPQ, Maio (1998).
- [8]. “5528A Laser Measurement System –User Guide”, Hewlett Packard.