

Método Comparativo de Calibração de Sistema por Interferometria a laser para medição Linear

Wellington Santos Barros¹, Gregório Salcedo Munõz²,

¹ Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil

² ITUC-PUC, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo:

O presente trabalho descreve o método para calibração de sistema de medição linear por interferometria laser por meio de comparação a um outro sistema laser de referência. O referido método é considerado mais simples que a calibração por componentes realizada atualmente e, conforme demonstrado no trabalho, apresenta confiabilidade metrológica que atende a exatidão necessária para as aplicações dos lasers em metrologia dimensional, vindo suprir uma necessidade metrológica dos laboratórios credenciados pelo Inmetro e do parque industrial brasileiro, usuários destes sistemas de medição. Foi utilizado um sistema laser de referência calibrado no Inmetro, com rastreabilidade a padrões nacionais, com as menores incertezas possíveis. O método de medição implantado realiza a calibração de um sistema laser por comparação a outro utilizando medições feitas a partir do deslocamento da mesa onde é apoiado o prisma óptico. São apresentadas a metodologia de calibração, cálculos das correções, fontes de erros e cálculos da incerteza de medição para a comparação de sistemas lasers de medição linear.

Palavras chave: Metrologia dimensional, sistema laser de medição, laser interferométrico.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais padrões metrológicos na área de metrologia dimensional é o sistema de medição linear por interferometria laser, ou simplesmente sistema laser de medição, que é muito utilizado para avaliação de máquinas-ferramenta e MMCs devido a sua versatilidade na medição de comprimento, o que pode ser feito com grande exatidão e rapidez. Portanto, esse sistema é um importante padrão metrológico, responsável pela disseminação na área de metrologia dimensional, e é absolutamente necessário assegurar a sua rastreabilidade a padrões nacionais de metrologia.

Uma das formas de disseminação da grandeza comprimento no país é a calibração de fontes laser, por meio da comparação direta a um laser He-Ne estabilizado de referência, padrão primário do Laboratório de Interferometria pertencente ao Inmetro.

A fonte laser é parte de um sistema de medição composto por componentes ópticos e eletrônicos que possibilita a medição de comprimento por processo interferométrico. Faz parte deste sistema, também, uma

unidade de compensação composta por sensores que monitoram a temperatura e umidade relativa do ar, a temperatura do objeto a calibrar e a pressão atmosférica. A finalidade dessa unidade é realizar correções dos desvios, devido às variações das condições ambientais e da temperatura do objeto a calibrar, em relação às condições ambientais de referência.

Atualmente, no Brasil, a fonte laser e os sensores de monitoramento das condições ambientais e de temperatura do objeto a calibrar são calibrados separadamente em diferentes laboratórios, o que torna a manutenção da rastreabilidade do sistema mais demorada e a calibração dispendiosa. Um outro problema importante é que, devido a limitações no software do fabricante, a correção dos erros sistemáticos dos sensores das condições ambientais e da temperatura do objeto a calibrar, provenientes das suas respectivas calibrações, em geral não pode ser realizada. Sendo assim, os usuários dos sistemas laser de medição apenas verificam se os erros dos sensores estão em conformidade com as especificações do fabricante ou seguem algum critério próprio de aceitação.

A calibração do sistema laser de medição (aqui abreviado para sistema-objeto) é feita por comparação a um padrão similar (aqui denominado sistema laser de medição de referência e abreviado para sistema-referência) utilizando-se uma bancada para comparação de lasers, na qual os componentes ópticos de ambos sistemas laser de medição (objeto e referência) são deslocados simultaneamente, possibilitando a comparação entre comprimentos indicados por cada um deles. O sistema-referência é composto pela fonte laser, barômetro digital, higrômetro digital e termômetros de referência, todos calibrados no Inmetro com as menores incertezas possíveis.

2. MÉTODO E RESULTADOS

2.1 Descrição do Processo de Calibração

Neste procedimento a comparação entre os lasers é realizada variando-se os comprimentos de medição simultaneamente no mesmo sentido, usando-se uma bancada de medição com deslocamento retilíneo, conforme figura 1. Os eixos de medição do sistema-objeto e do sistema-referência (sistema laser de referência) devem ser suficientemente coincidentes e paralelos ao sentido do movimento do dispositivo de deslocamento, para assim eliminar o erro conhecido como erro Abbe e erro co-seno.

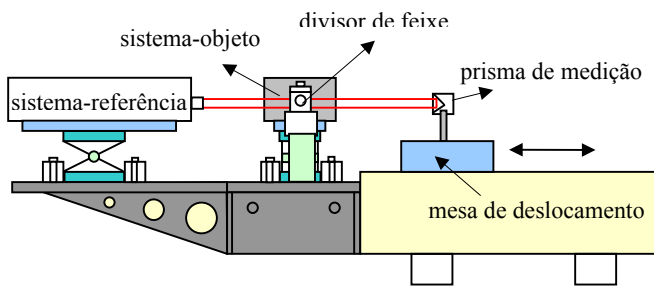


Figura 1 - Esquema de montagem do sistema de medição

Os incrementos (frações de comprimentos de onda) medidos pelos sistemas lasers são indicações dos comprimentos calculados e corrigidos que são registradas simultaneamente em um intervalo de tempo.

Os caminhos geométricos percorridos, segundo Sparrer [1], por cada feixe dos lasers, de referência e sistema-objeto, são mostrados na figura 2.

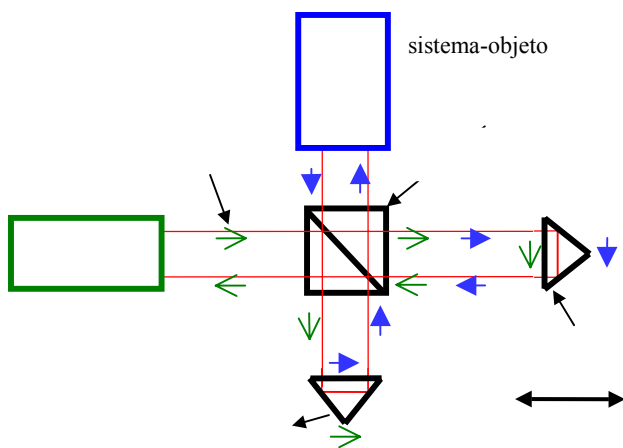


Figura 2 – Caminho geométrico percorrido pelos feixes

2.2 Condições Ambientais da Calibração

Os parâmetros ambientais como temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e a temperatura do objeto a calibrar, para o caso do sistema-objeto, foram registradas pelos seus próprios sensores de monitoramento. Para o sistema-referência foram utilizados sensores externos ao sistema, com exatidão superior aos do próprio sistema.

A condição para que a calibração seja possível é que as influências ambientais e a temperatura do objeto a calibrar sejam suficientemente estáveis em função do tempo, para que assim possam ser determinadas e compensadas com exatidão suficiente.

Uma vez que os sistemas lasers possuem sensores de temperatura para colocação na superfície do objeto a ser calibrado ou a ter seu comprimento determinado, esses sensores devem, forçosamente, estar acoplados à superfície de algum material durante a comparação dos dois sistemas mesmo que, a rigor, nenhum objeto esteja sob medição.

Como material para contato dos sensores foi utilizado um único bloco-padrão, que simulou um objeto sendo calibrado pelos dois sistemas lasers. O objetivo foi comparar a leitura dos sensores, submetidos a condições

idênticas de temperatura, durante o procedimento de comparação dos sistemas lasers em si.

2.3 Compensação dos erros de medição

É fundamental que se faça uma análise sobre os fatores que contribuem para a incerteza, porque as equações de cada um deles auxiliarão na determinação da incerteza de medição. As fontes de erros conhecidos são apresentadas a seguir, onde são definidas e descritas as formulações de suas correções, quando possível, para assim serem utilizadas como contribuições para a determinação da incerteza de medição.

2.3.1 Índice de refração

Em geral, nas medições de comprimento por interferometria as condições ambientais diferem das condições ideais. Os comprimentos de onda da luz são determinados para a condição de vácuo. Portanto a influência do índice de refração do ar no comprimento de onda deve ser corrigida.

As correções podem ser realizadas manualmente ou automaticamente. Nestas medições é necessário conhecer o índice de refração nas condições de temperatura, pressão e umidade em que são realizadas as calibrações.

O índice de refração do ar é definido pela seguinte relação:

$$\lambda_{vac} = \eta \lambda_{ar} \quad (1)$$

sendo,

η índice de refração do ar,

λ_{vac} comprimento de onda da luz no vácuo;

λ_{ar} comprimento de onda da luz no ar.

Existem duas técnicas para determinação do índice de refração do ar. Ele pode ser medido diretamente por um refratômetro ou o valor pode ser calculado através da equação de Edlén [2].

Para determinar o índice de refração nas condições ambientais padronizadas (η_s) é necessário utilizar a seguinte equação da dispersão de Edlén:

$$\eta_s = C_1 + C_2 + \left(\chi - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}} \right)^2 \right)^{-1} + C_3 \left(\varepsilon - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}} \right)^2 \right)^{-1} + 1 \quad (2)$$

Sendo que os valores ε , χ , C_1 , C_2 e C_3 são constantes da equação da dispersão na revisão de Birch e Downs [3].

Para obtenção do índice de refração do ar para as diversas condições ambientais de pressão, temperatura e umidade, a equação de Edlén foi generalizada, resultando na seguinte expressão:

$$\eta = \left[p \times \frac{(\eta_s - 1)}{K_1} \right] \times \frac{(1 + 10^{-8} \times (K_2 + K_3 T) \times p)}{(1 + K_4 T)} - f \times \left[K_5 + K_6 \times \left(\frac{1}{\lambda_{vac}} \right)^2 \right] \times 10^{-10} + 1 \quad (3)$$

onde :

p pressão atmosférica em Pa;

f umidade relativa do ar em Pa;

T temperatura de medição °C;

Sendo que os valores K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 e K_6 são constantes da equação na revisão segundo Birch e Downs.

A correção do índice de refração, conforme a equação, depende da pressão atmosférica, temperatura do ar, pressão parcial do vapor de água (umidade do ar) e ainda do comprimento de onda da luz no vácuo.

2.3.2 Compensação do comprimento “morto”

Entende-se por comprimento “morto” aquele comprimento entre o divisor de feixe e o prisma de medição na sua posição inicial. O sistema laser não interpreta esse comprimento como passível de correção quanto às condições ambientais, o que pode vir a acarretar erros quando as mesmas não forem idênticas àquelas padronizadas.

A correção é calculada pela seguinte equação:

$$\varpi_o = L_{l_0} \times \alpha \times \Delta T \quad (4)$$

ϖ_o = erro de comprimento “morto” devido a dilatação térmica do objeto a calibrar;

α = coeficiente de dilatação térmica do objeto a calibrar ;

ΔT = desvio da temperatura do objeto em relação 20 °C;

L_{l_0} = comprimento antes da variação de temperatura do objeto

2.3.3 Erro devido ao Alinhamento “Erro Co-seno”

A ausência de alinhamento no trajeto do feixe do laser em relação ao eixo do dispositivo de deslocamento resulta em um erro entre o comprimento medido e o comprimento deslocado. Este erro é chamado erro co-seno, pois a dimensão deste é proporcional ao co-seno do ângulo do desalinhamento.

O erro co-seno pode ser calculado pela relação entre o comprimento medido e o comprimento verdadeiro.

Uma outra forma de se calcular o erro co-seno é baseada na seguinte relação :

$$\xi = \frac{S^2}{8L^2} \quad (5)$$

onde ,

ξ o erro co-seno;

S distância entre os feixes de referência e de medição no alvo do cabeçote do laser;

L comprimento medido.

3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Na análise das fontes de erros de medição, são mencionados os prováveis erros sistemáticos que, embora não possam ser eliminados, podem ser reduzidos. Como os erros sistemáticos mencionados originam-se de efeitos conhecidos devido à montagem do sistema de medição e a grandezas de influência, isso tem consequência direta no resultado de medição.

Como o processo de medição é comparativo, os efeitos sistemáticos também são minimizados através da comparação dos lasers e a correção através dos cálculos.

3.1 Modelo Matemático da Medição

O modelo matemático é elaborado através da equação da propagação de erros, que inclui as repetições das medições e as várias grandezas de influência conhecidas e não exatamente conhecidas, para a determinação do resultado de medição. As contribuições para a incerteza provêm da falta de conhecimento destas grandezas, das variações nas repetições e as várias outras incertezas associadas às correções dos erros sistemáticos.

A expressão que relaciona o valor do mensurando, ou seja, o comprimento verdadeiro em função do índice de refração η (que é função da temperatura do ar T , da pressão parcial do vapor d'água f e da pressão atmosférica p e também do comprimento de onda do laser λ), da temperatura do objeto a calibrar T_o e do coeficiente de dilatação térmica α é apresentada a seguir:

$$L_R = L_{R_\eta} \times \frac{1}{1 + \alpha \times (T_m - T_o)} \quad (6)$$

sendo;

$$L_{R_\eta} = \frac{\eta_0 \times L_0}{\eta} \quad (7)$$

onde,

L_0 indicação do comprimento no sistema-referência nas condições ambientais padronizadas ($T = 20$ °C, $p = 101325$ Pa, $f = 1150$ Pa);

η_0 índice de refração do ar nas condições ambientais padronizadas;

η índice de refração do ar nas condições ambientais de medição;

L_{R_η} comprimento medido pelo sistema-referência, corrigido para as condições ambientais de medição;

L_R comprimento do objeto a calibrar, medido pelo sistema-referência, corrigido para a temperatura de 20 °C;

α coeficiente de dilatação térmica

T_m temperatura de medição do objeto a calibrar;

T_0 temperatura de referência de 20 °C.

O modelo matemático da equação da propagação das incertezas para o sistema-objeto é dado por:

$$\varepsilon = L_X - L_R - \Delta_{E_1} - \Delta_{E_2} - e_{R_1} - e_{R_2} - e_{f_1} - e_{f_2} - \Delta\varpi_o \quad (8)$$

logo;

$$\varepsilon = L_x - \frac{\eta_0 \times L_0}{\eta} \times \frac{1}{1 + \alpha \times (T_m - T_o)} - \Delta_{E_1} - \Delta_{E_2} - e_{R_1} - e_{R_2} - e_{f_1} - e_{f_2} - \Delta\varpi_o \quad (9)$$

sendo que,

ε erro de indicação do sistema-objeto;

L_x indicação no sistema-objeto do comprimento do objeto a calibrar corrigido para temperatura de 20 °C;

Δ_{E_1} erro devido ao alinhamento do sistema-objeto;

Δ_{E_2} erro devido ao alinhamento do sistema-referência;

e_{R_1} erro de resolução do sistema-objeto;

e_{R_2} erro de resolução do sistema-referência;

e_{f_1} erro de instabilidade do sistema-objeto;

e_{f_2} erro de instabilidade do sistema-referência;

$\Delta\varpi_o$ erro devido à diferença dos comprimentos “mortos” dos lasers.

3.2 Fontes de Incerteza

3.2.1 Incerteza Padrão Associada aos Alinhamentos dos Lasers

Supondo que a não coincidência dos feixes no centro do alvo, localizado no cabeçote, seja da ordem de 200 μm (S), calcula-se através da fórmula 5 que o erro co-seno, para o pior caso que é o comprimento inicial (L) de 200 mm, seja da ordem de 0,025 μm . Esta estimativa tem distribuição retangular.

3.2.2 Incerteza Padrão Associada aos Comprimentos “Mortos” dos Lasers

Os erros dos comprimentos “mortos”, não são corrigidos pois se anulam ao serem comparados. Entretanto, mesmo assim, existe um erro residual que pode ser estimado tomando-se como base as diferenças de indicações dos sensores de temperatura do material do sistema-objeto em relação ao sistema-referência, que no caso foi de 0,046 °C. O erro residual do comprimento “morto” ($\Delta\varpi_o$), devido à dilatação térmica do material, então pode ser calculado pela diferença dos erros de comprimentos “mortos” dos sistemas lasers.

O erro residual é da ordem de 0,0529 μm . Estima-se que as variações do erro residual tenham limites retangulares de distribuição.

3.2.3 Incerteza Padrão Associada ao Coeficiente de Dilatação Térmica

Baseados em dados dos fabricantes de blocos-padrão supõe-se que o coeficiente de dilatação térmica de blocos de aço esteja dentro do intervalo de $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, portanto a incerteza padrão é representada por uma distribuição retangular.

Foi usado para simular um bloco-padrão para simular um objeto sendo calibrado pelos dois sistemas lasers, portanto os valores de coeficiente de dilatação térmica, que são introduzidos nos softwares de compensação devidos a este erro, devem ser o mesmo. Isto sugere que as grandezas de entrada dos coeficientes de dilatação térmica tenham uma correlação total, ou seja, $r = 1$.

Como α_R e α_O (coeficientes de dilatação do material para o sistema-referência e o sistema-objeto) são iguais e as derivadas parciais dos comprimentos em relação aos coeficientes de dilatação são muito próximas, a incerteza do erro de indicação em relação aos coeficientes de dilatação térmica pode ser desprezada.

3.2 Incerteza Expandida

As incertezas expandidas calculadas variaram de 0,109 μm a 0,306 μm . Na tabela 1 é apresentada a planilha completa de incerteza de medição para o comprimento nominal de 200 mm.

O método é adequado para calibração de sistemas laser de medição, podendo ser caracterizado por uma incerteza expandida final de medição, com um $k=2$ e $\approx 95\%$, de $U = 2 \times \sqrt{7,011 \times 10^{-3} + 3,908 \times 10^{-14} \times L^2}$. Sendo L o comprimento nominal em micrometros.

Tabela 1 – Planilha de Incerteza para 200 mm

Contribuições dependentes do comprimento

Grandezas de Influência	Estimativa [μm]	Distribuição	Divisor	Incert. Padrão $u(x_i)$ [μm]	c_i [μm]	Contrib. $u_i(y)$ [μm]	u_i^2 [μm^2]	v_i
Repetitividade Laser objeto	0,022	Normal	1	0,022	1	2,187E-02	4,78E-04	2
Repetitividade Laser ref.	0,022	Normal	1	0,022	1	2,187E-02	4,78E-04	2
Resolução Laser objeto	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,33E-06	∞
Resolução Laser ref.	0,01	Retangular	1,732	0,003	1	2,887E-03	8,33E-06	∞
Instabilidade do Laser objeto	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,33E-04	∞
Instabilidade do Laser ref.	0,02	Retangular	1,732	0,012	1	1,155E-02	1,33E-04	∞
Alinhamento do Laser objeto	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,08E-04	∞
Alinhamento do Laser ref.	0,025	Retangular	1,732	0,014	1	1,443E-02	2,08E-04	∞
Comprimento morto	0,0529	Retangular	1,732	0,031	1	3,054E-02	9,33E-04	∞
Total =							2,590E-03	

Contribuições dependentes do comprimento

Grandezas de Influência	Estimativa	Distribuição	Divisor	Incert. Padrão $u(x_i)$ [μm]	c_i [μm]	Contrib. $u_i(y)$ [μm]	u_i^2 [μm^2]	v_i
Temperatura do Ar	[$^{\circ}\text{C}$]			[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}^{-1} \times \mu\text{m}$]			
Incerteza do Certificado	0,1	Normal	2	0,050	1,86E-01	9,296E-03	8,642E-05	∞
Pressão Atmosférica	[Pa]			[Pa]	[$\text{Pa}^{-1} \times \mu\text{m}$]			
Incerteza do Certificado	8,1	Normal	2	4,025	-5,37E-04	-2,160E-03	4,665E-06	∞
Umidade do Ar	[%]			[%]	[$\text{Pa}^{-1} \times \mu\text{m}$]			
Incerteza do Certificado	0,8	Normal	2	0,400	1,67E-03	6,685E-04	4,470E-07	∞
Temperatura do Objeto	[$^{\circ}\text{C}$]			[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}^{-1} \times \mu\text{m}$]			
Incerteza do Certificado	0,007	Normal	2	0,004	-2	-8,050E-03	6,480E-05	∞
Comprimento de onda	[μm]			[μm]	[μm]			
	7,0E-09	Normal	2	3,5E-09	200x10 ³	7,000E-04	4,900E-07	∞
Total =							1,563E-04	

Incerteza Combinada ($u_c(y)$) =	0,052	[μm]
Incerteza Expandida ($U(y)$) =	0,109	[μm]
$v_{\text{efetivo}} =$	33,0	(t95%) $k =$ 2,08

4 CONCLUSÃO

Com a elaboração e implantação do procedimento proposto, pode-se satisfazer a crescente necessidade da indústria e dos laboratórios da Rede Brasileira de Calibração quanto à calibração do referido sistema laser de medição por um método alternativo, mais rápido e de custo mais baixo, mas que atenda os níveis de incerteza requeridos para suas aplicações.

A incerteza de medição obtida mostrou-se suficiente para calibrar sistemas laser de medição utilizados como

padrão de referência para calibração de máquinas-ferramenta e máquinas de medição por coordenadas que, respectivamente, demandam incertezas da ordem de 5 μm e 1 μm .

REFERÊNCIAS

- [1] Sparrer, G.: Kalibrierung von Kompletten Laserinterferometern für Längenmessungen proceedings der Tagung messComb-Wiesbaden,1993.
- [2] Edlén, B. – The Refractive Index of Air. Revista Metrologia, 1965, 71-80
- [3] Birch, K. P. and Downs, M. J. - An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. Revista Metrologia, 1993, **30** 155-162.

Autor: Mestre em Metrologia e Qualidade,
Wellington Santos Barros, Inmetro, Rua Nossa Senhora
das Graças, 50, CEP 25250 010, Xerém –Duque de
Caxias, Rio de Janeiro Brasil, tel. (21) 26799109,
wsbarros@inmetro.gov.br.

Mestre em Engenharia Mecânica, Gregório Salcedo
Munõz, ITUC-PUC, Rua Marquês de São Vicente,225,
CEP 22453 900, Rio de Janeiro, Brasil, tel. (21)
31141179, gregorio@ituc-puc-rio.br