

Automatização de um Banco de Calibração de Medidores Laser

DIOGO ALEXANDRE FREITAS DE SOUSA

Novembro de 2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Instituto Politécnico do Porto



Automatização de um Banco de Calibração de Medidores Laser

Diogo Alexandre Freitas de Sousa

Relatório de Dissertação/Projeto/Estágio realizado no âmbito do
Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Orientador: Eng.º Joaquim Alves, ISEP

Coorientador: Eng.º António Parente, CATIM

2016-11-14

Resumo

Hoje em dia existem por demais maneiras para mensurar distâncias, uma das grandezas base do Sistema Internacional (SI), na qual a unidade associada é o metro.

Atualmente, e cada vez com mais frequência, usa-se uma nova técnica de medição que permite obter, de uma forma mais simples, resultados com resoluções mais elevadas, são eles os medidores de distâncias laser ou distanciômetros laser.

Tendo este tipo de equipamento ganho espaço na sociedade em geral acaba por ser mais utilizado nos últimos tempos, por isso, é espectável que se criem ou melhorem procedimentos de calibração para estes dispositivos. É sobre este conceito que este documento incide, nomeadamente na automatização de uma já existente bancada de calibração de medidores de distâncias lineares, desenvolvida segundo a norma ISO 17123-4, tornando-a mais rápida e eficiente.

Este projeto tem como base o *software* LabVIEW que é uma ferramenta de programação com interface gráfica disponibilizada pela National Instruments. Os principais campos de operação deste *software* são as medições e automatizações de sistemas, tal como é pretendido neste projeto.

Para este projeto é necessário também um motor para motorizar a bancada de calibração e uma câmara para implementar o OCR na deteção dos dígitos do *display* do EDM.

Por último, o controlo do motor é realizado através de uma placa Arduino mas a sua programação é por intermédio de uma biblioteca de LabVIEW.

Em relação aos resultados obtidos na elaboração desta dissertação convém salientar que o projeto não foi “totalmente” terminado visto que não foi implementado no laboratório, mesmo assim, após a realização deste relatório, é possível afirmar que a calibração automática de medidores de distâncias eletrónicos está mais perto de acontecer.

Palavra-chave: automatização, calibração, medidores de distâncias laser, LabVIEW.

Abstract

Nowadays there are other ways to measure distances, one of the base units of the International System of Units (SI), in which the associated unit is the meter.

Now, a new measuring technique is used to obtain, in a simpler way, results with higher resolutions, they are the laser distance measurer.

This type of equipment won space in society in general turns out to be more used in recent times, it is therefore likely to create or improve calibration procedures for these devices. It is on this concept that this document focuses, in particular on the automation of an already existing bench of calibration of linear distances measurements, developed according to norm ISO 17123-4. Making it faster and more efficient.

This project is based on LabVIEW software which is a programming tool with a graphical interface provided by National Instruments. The main fields of operation of this software are the measurement and automation of systems, as intended in this project.

For this project it is also necessary a motor to motorize the calibration bench and a camera to implement the OCR in the detection of the digits of the EDM display.

Finally, the control of the motor is made through an Arduino board but the programming is via a LabVIEW library.

Regarding the results obtained in the elaboration of this dissertation, it should be pointed out that the project was not "totally" finished since it was not implemented in the laboratory, even though, after this report, it is possible to affirm that the automatic calibration of electronic distance meters is closer to happening.

Keyword: automation, calibration, laser distance meters, LabVIEW.

Agradecimentos

De uma forma geral, pode-se referir que de tudo o que foi feito desde a minha entrada para o curso de Engenharia de Instrumentação e Metrologia, o ponto alto foi o culminar no laboratório de Metrologia Dimensional do CATIM. Foi uma soma de trabalho e dedicação, de objetivos e oportunidades que fui sabendo agarrar.

Aos que me acompanharam durante este período da minha vida agradeço o apoio e a ajuda por me aguentarem euforias e momentos menos bons. Em especial deixo o meu maior agradecimento aos meus pais e irmão que me foram dando força para levar com ânimo e brio o meu percurso académico.

Agradeço em geral aos meus colegas de curso os bons momentos passados, as partilhas feitas nas aulas e fora delas.

Agradeço com especial apreço a ajuda prestada por todas as pessoas com quem trabalhei durante o estágio. Aos meus orientadores de estágio, o Eng.º Joaquim Alves e o Eng.º António Parente, por toda a disponibilidade que tiveram comigo, quer no ISEP quer no CATIM.

Agradeço também aos membros da equipa de trabalho que integro desde o início do meu percurso profissional no laboratório de Metrologia por toda a paciência que tiveram ao conviver comigo e por me ajudarem em tudo o que necessitei.

A todos Vós, Muito Obrigado!

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de imagens.....	xi
Índice de tabelas	xiii
Índice de Equações	xv
Lista de Siglas, Acrónimos e Abreviaturas	xvii
1 CAPÍTULO I	1
1.1 Objetivos e Motivação.....	4
1.2 Estrutura	6
2 CAPÍTULO II.....	7
2.1 Estado da Arte	7
2.2 Medidores de Distância Laser	11
2.3 Princípio de funcionamento do EDM laser	19
2.3.1 Método do Pulso (Tempo de voo).....	22
2.3.2 Método de Diferença de fase.....	23
2.4 Características do medidor de distância laser.....	24
2.5 Componentes do sistema interferométrico padrão.....	26
2.5.1 Cabeça laser HP 5518A	26
2.5.2 Interferómetro linear 10766A	26
2.5.3 Retrorefletor linear 10767A.....	27
2.5.4 Sensor atmosférico 10751B	27
2.5.5 Sensor de temperatura do material 10757B	28
2.5.6 Tripé 10753B.....	28
2.6 Fontes de incerteza.....	29
2.7 Determinação da incerteza expandida.....	33
3 CAPÍTULO III	37
3.1 Deteção de caracteres (OCR)	37
3.2 Motorização da bancada de calibração.....	43
3.3 Programação.....	47
4 CAPÍTULO IV	49
4.1 Conclusões.....	49
4.2 Trabalho futuro.....	50

Índice de imagens

Figura 1 - Pirâmide de hierarquias da rastreabilidade na metrologia.....	1
Figura 2 - Theodore Maiman.....	3
Figura 3 - Logotipo do CATIM.....	5
Figura 4 - Exemplo de um medidor de distâncias laser (Fluke 414D).	8
Figura 5 – Princípio de medição por ultrassons. Este tipo de medição para grandes distâncias poderá não ser vantajoso.....	8
Figura 6 – Exemplo da reflexão de ondas em superfícies difusas.....	9
Figura 7 - Exemplo do funcionamento do interferômetro de Michelson.....	11
Figura 8 – Esquema interno do princípio de divisão de feixes do interferômetro de Michelson.....	12
.....
Figura 9 - Exemplo de franjas de interferência	12
Figura 10 - Representação das barras de platina iridiada usadas em 1889.	13
Figura 11 – Diferenças entre interferências construtivas e destrutivas.	14
Figura 12 – Exemplo de medição de um ponto de calibração de EDM no laboratório de metrologia dimensional do CATIM	15
Figura 13 – Posições dos pontos de calibração.	16
Figura 14 – Exemplo da definição do princípio de Abbe num paquímetro.....	17
Figura 15 – Esquema explicativo da definição de erro de cosseno.....	17
Figura 16 – Esquema explicativo da definição do comprimento morto.....	18
Figura 17 – Representação de uma onda sinusoidal.....	20
Figura 18 – Relação entre a frequência e o comprimento de onda.....	21
Figura 19 - Princípio de funcionamento do método do pulso.....	22
Figura 20 – Princípio de funcionamento do método de diferença de fase.....	23
Figura 21 – Exemplo da modulação do sinal em AM.....	25
Figura 22 – Cabeça laser HP 5518 ^a	26
Figura 23 – Interferômetro linear	27
Figura 24 – À esquerda encontra-se o retrorrefletor utilizado. À direita o esquema de funcionamento do mesmo.	27
Figura 25 – Sensor atmosférico.....	28
Figura 26 – Sensor de temperatura do material.....	28
Figura 27 – Tripé para a cabeça laser	29
Figura 28 – Esquema ilustrativo da relação entre erro e mensuranda.....	29
Figura 29 - Gráfico da distribuição do tipo B-N.....	32
Figura 30 – Gráfico da distribuição do tipo B-R.....	32
Figura 31 - Gráfico da distribuição do tipo B-T	33
Figura 32 – Fluxograma do processo de reconhecimento de caracteres desde a imagem original.....	37
.....
Figura 33 – Lado a lado as imagens do display do EDM. À esquerda a imagem original e à direita a mesma imagem convertida para tons de cinzento.	38
Figura 34 – Imagem binarizada. A cor vermelha serve só para efeitos de <i>software</i>	38
Figura 35 – Imagem binarizada depois da utilização do filtro passa-baixo.....	39
Figura 36 – Imagem binarizada depois da dilatação dos pixéis.	39
Figura 37 – Retângulo verde, definido pelo utilizador, que envolve a área dos dígitos.....	40
Figura 38 – Detecção dos dígitos na imagem binarizada.....	40
Figura 39 – Câmara wifi da SPCLLOUD.....	41

Figura 40 – Protótipo do suporte do medidor de distâncias, À esquerda (1) está o EDM a calibrar. À direita (2) encontra-se a câmara wifi fixa numa base.....	42
Figura 41 – Representação esquemática das ligações envolvidas na ligação entre a câmara e o computador.	43
Figura 42 – Motor elétrico DC NEMA GM42BLFZ.....	44
Figura 43 – Exemplo da integração do Arduino com o Labview com recurso a uma biblioteca específica.....	45
Figura 44 – Esquema representativo das ligações efetuadas entre o motor e o Arduino.....	46
Figura 45 – Painel frontal desenvolvido para a calibração de um EDM – Exemplo para o ponto 670 mm.	47

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação dos diversos tipos de laser e potenciais perigos para a saúde, segundo a norma IEC 60825-1:2001.....	4
Tabela 2 – Diversos valores de k (coeficiente de expansão)	34
Tabela 3 – Balanço de Incertezas.....	35
Tabela 4 – Performance do algoritmo do OCR.....	41
Tabela 5 – Características da câmara referida	42

Índice de Equações

$d1 = \lambda + \beta0 + 3*Y$ (m) , (1.1).....	16
$d2 = \lambda + 3*\beta0 + 7*Y$ (m) , (1.2).....	16
$d3 = \lambda + 5*\beta0 + 11*Y$ (m) , (1.3).....	16
$d4 = \lambda + 4*\beta0 + 9*Y$ (m) , (1.4).....	16
$d5 = \lambda + 2*\beta0 + 5*Y$ (m) , (1.5).....	16
$\beta0 = (d0 - 6.5*\lambda)/15$ (m) , (6).....	16
$Y = \lambda/72$ (m) , (7).....	16
$n = \frac{\lambda_{\text{vácuo}}}{\lambda_{\text{ar}}}$, (8).....	18
$Y = A \cdot \text{sen}(\varphi)$, (9).....	19
$c = \frac{c_0}{n}$, (10).....	21
$f = \frac{c}{\lambda}$, (11).....	22
$d = \frac{c*\Delta t}{2}$, (12).....	22
$YE = A \text{sen}(\varphi)$, (13).....	23
$YR = A \text{sen}(\varphi + \Delta\varphi)$, (14).....	23
$d = \left(\frac{z}{2}\right)*\lambda + \left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$, (15).....	24
Erro sistemático = Erro de medição – Erro aleatório , (16).....	30
Correção = Valor medido - Erro , (17).....	30
$y' = y \pm U$, (18).....	30
$u(x) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$, (19).....	31
$u(x) = \frac{U}{k}$, (20).....	32
$u(x) = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$, (21).....	33
$u(x) = \sqrt{\frac{a^2}{6}}$, (22).....	33
$v = \frac{d}{t}$, (23).....	33
$\frac{\partial v}{\partial d} = -\left(\frac{d}{t^2}\right)$, (24).....	34
$V_{\text{eff}} = \frac{u(y)^4}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 * u_{xi}^4}{n-1}}$, (25).....	34
$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (u_i * C_i)^2}$, (26).....	35
$\tau[\text{Nm}] = m[\text{kg}] \times \mu \times \frac{d}{2} [\text{m}]$, (27).....	44
$V_{\text{out}} = \left(\frac{\text{duty cycle}}{100}\right) \times V_{\text{cc}}$, (28).....	46

Lista de Siglas, Acrónimos e Abreviaturas

BIPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CATIM	Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica
DFI	Departamento de Física
EDM	Medidor de Distância Eletrónico
IPP	Instituto Politécnico do Porto
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LASER	Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
OCR	Reconhecimento Ótico de Caracteres
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

1 CAPÍTULO I

Introdução

Ao longo dos tempos, o conceito Metrologia vinha a ser discutido e nem sempre de uma forma pacífica. Uns entendiam que metrologia constituía um “domínio dos conhecimentos relativos à medição”, enquanto outros opinavam que a metrologia não passava de uma área que dava constante apoio à instrumentação. Hoje em dia, a METROLOGIA é parte integrante da sociedade mundial sendo por isso considerada ela própria como uma ciência, mais propriamente a *ciência da medição e as suas aplicações*, definição segundo o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia). (Filipe, Pellegrino, Baratto, de Oliveira, & Mendoza, 2012)

Na era em que se vive é crucial ser-se mais competente e garantir maior qualidade em tudo que se faça, por isso a metrologia tem sido desafiada a dar resposta nas mais diversas áreas da nossa sociedade, como o comércio e indústria, saúde e também a segurança.

Para acompanhar o avanço tecnológico é necessário que todos os equipamentos de medição estejam calibrados e rastreados segundo a cadeia de rastreabilidade.

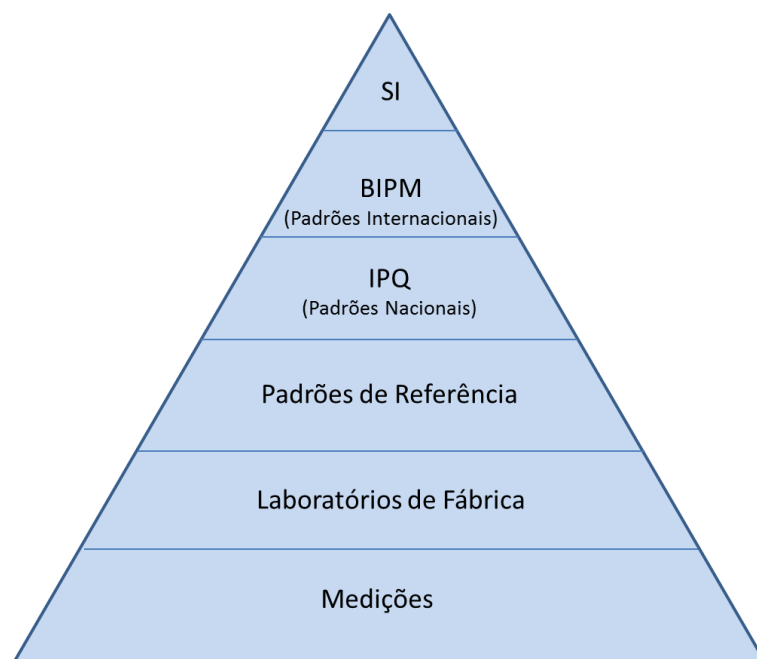


Figura 1 - Pirâmide de hierarquias da rastreabilidade na metrologia

De forma a entender melhor, veja-se um exemplo de um paquímetro em pleno funcionamento numa empresa, onde é utilizado diariamente. Este equipamento deverá estar calibrado por um laboratório acreditado que possua padrões de referência (por exemplo o CATIM), que por sua vez tem os seus padrões rastreados aos padrões de laboratórios primários (quer de Portugal ou de qualquer outro país). Todos os padrões estão rastreados aos padrões internacionais. Assim, é possível determinar que 1 mm em Portugal será o mesmo que 1 mm do outro lado do mundo,

dentro de uma similar incerteza, promovendo uma homogeneidade entre países que utilizem as mesmas unidades de medida, que neste caso é o sistema internacional – SI.

A ciência da medição, vulgo a metrologia, pode ser dividida em três áreas diferentes consoante a sua aplicação prática. Existe Metrologia Legal, Científica e Aplicada (anteriormente designada por Industrial). Analisando cada área verifica-se que todas elas têm um papel fundamental na sociedade. A metrologia legal consiste no controlo, verificação, fiscalização e legislação de todos os equipamentos de medição que de alguma maneira estão relacionados com transações comerciais, saúde, ambiente e segurança, como é o caso dos postos de abastecimento, das balanças para fins comerciais ou até dos taxímetros. Esta área da metrologia permite a primeira verificação de um equipamento novo ou reparado, analisando através de um conjunto de operações a conformidade metrológica do mesmo. É também realizada a verificação periódica do equipamento com o intuito de avaliar se o mesmo mantém as propriedades metrológicas dentro das tolerâncias admissíveis. Por último, a metrologia legal pode realizar verificações extraordinárias ao equipamento se por ordem de uma entidade oficial ou a pedido do próprio interessado.

A metrologia científica, também denominada de metrologia primária, incide no desenvolvimento e conservação dos padrões de referência, bem como na pesquisa de novas metodologias em garantir a veracidade dos valores obtidos em comparações interlaboratoriais com outros laboratórios primários. Em Portugal, o IPQ (Instituto Português da Qualidade), através do Laboratório Central de Metrologia e outros laboratórios a quem lhes é reconhecido competência técnica, são os principais responsáveis por assegurar as funções acima descritas.

Em relação à metrologia aplicada pode-se referir que se encontra no âmbito dos sistemas de medição que controlam processos de fabrico, sendo responsável pela garantia da qualidade do produto, baseando-se numa cadeia hierárquica de padrões rastreáveis a padrões de laboratórios primários (sejam nacionais ou internacionais). (Centro Integrado de Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade)

Sendo que a automatização é um ponto fundamental neste projeto, entenda-se que por automatização, segundo o que a documentação refere (Porto Editora, 2016), é um sistema que emprega processos automáticos que comandam e controlam os mecanismos para o seu próprio funcionamento. Do latim *automatus* que significa *mover-se por si*. A automação é um sistema que faz uso de técnicas computadorizadas ou mecânicas com o objetivo de dinamizar e otimizar todos os processos.

Para automatizar essa bancada laser serão necessários conhecimentos na área da visão artificial e na área da mecânica.

Entendeu-se que seria interessante e faria todo o sentido substituir o processo manual de calibração de medidores laser por um processo automático com que é calibrado os medidores laser, visto que a utilização desses medidores está a crescer cada vez mais e de uma forma exponencial, apesar de atualmente existirem diversas maneiras de mensurar distâncias, quer por réguas, fitas métrica, paquímetros, micrómetros, entre muitos mais equipamentos.

Hoje em dia, com a implementação dos medidores eletro-óticos (MED) nas indústrias, a facilidade de medir distâncias com bons resultados e leituras com maior repetibilidade. Segundo o VIM, repetibilidade consiste na fidelidade de medição para um conjunto de condições de repetibilidade, ou seja, é a capacidade de o equipamento apresentar sempre o mesmo valor num certo ponto, sob determinadas características que se mantêm inalteradas ao longo do tempo das medições.

Tendo este trabalho maior incidência em medidores de distância laser, é conveniente fazer uma breve introdução à história dos Laser. (Universidade de São Paulo, 2016)

Vários cientistas ao longo dos anos deram o seu contributo para a invenção do laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). O primeiro impulsionador para a criação de uma fonte de emissão através da estimulação de luz foi Albert Einstein, em meados de 1915. A teoria de Einstein teve como base a teoria apresentada por Max Ludwig Planck, físico alemão, pai da física quântica, sobre as relações entre a quantidade de energia libertada por processos atômicos, em 1900. Einstein desconfiava que a luz poderia ser concentrada num único raio e após várias pesquisas concluiu que a radiação eletromagnética devia ser produzida através de processos atômicos.

No ano 1954, Charles Townes inventou o MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), através da excitação de átomos.

Em 1960, Theodore Maiman apresentou o primeiro MASER ótico, onde o equipamento era capaz de emitir radiação pela excitação de Rubi. Maiman queria denominar a sua descoberta como LOSER (*Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*) mas como este nome em inglês significava perdedor, então o nome foi trocado para laser. Como resultado obtido, a emissão estimulada pela excitação desse cristal encontrava-se localizada na faixa visível do espectro eletromagnético.

Após a invenção do MASER surgiu no ano seguinte o primeiro laser He-Ne (Hélio-Neon) por Javan, Bennett e Harrioy. Em 1964 foi inventado o Laser de dióxido de carbono por Patel.

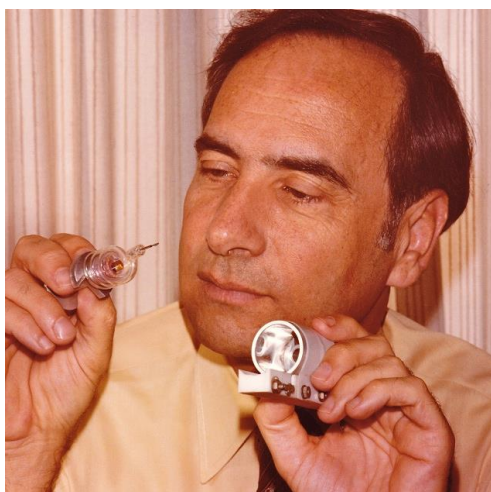


Figura 2 - Theodore Maiman

Hoje em dia, passadas mais de duas décadas, existem no mercado diversos Lasers com diferentes características, seja com diferentes comprimentos de onda, seja na potência de saída, na sua colimação, entre outras.

O laser está também classificado em termos de segurança em relação à radiação emitida – AEL, *Accessible Emission Limit*. As classes vão desde a “Classe 1” até à “Classe 4”, sendo a primeira mais inofensiva e a última mais agressiva ao ser humano, respetivamente. Na Tabela 1 - Classificação dos diversos tipos de laser e potenciais perigos para a saúde, pode verificar-se as respetivas classes com

a simbologia associada de acordo com a norma internacional em vigor desde 2001, a norma IEC 60825-1:2001. (Bader & Lui, 1996) (Barat, 2006)

Tabela 1 - Classificação dos diversos tipos de laser e potenciais perigos para a saúde, segundo a norma IEC 60825-1:2001

<i>C</i> <i>lasse</i>	<i>Riscos</i>	<i>Laser</i>	<i>AEL</i>
1	Não perigosos mesmo para longas exposições e com uso de instrumentos óticos	Potência muito baixa	40 μ W
M 1	Potencialmente perigosos aos olhos se observados através de instrumentos óticos	Potência muito baixa	40 μ W
2	Seguros para exposições não intencionais e não prolongadas (< 0,25s)	Potência baixa	1 mW
M 2	Potencialmente perigosos aos olhos se observados através de instrumentos óticos	Potência baixa	1 mW
R 3	Seguros quando manipulados com cuidado e perigosos aos olhos se observados através de instrumentos óticos	Potência baixa	200 μ W - 5 mW
B 3	Perigosos aos olhos nus quando observados diretamente	Potência média	5 mW - 500 mW
4	Perigosos para a pele e olhos, inclusive na observação de reflexões difusas	Potência elevada	> 500 mW

(Schulmeister, Püster, Green, & Henderson, 2001)

Esta norma em vigor muda ligeiramente em relação à norma anterior de 1993, com a reestruturação das classes, introduzindo mais duas classes e retificando outra, isto é, foi acrescentada as classes 1M e 2M e substituiu-se a classe 3A pela 3R.

Em Portugal estes limites de radiação são impostos pelo Decreto-lei 163/2002, de 11 de julho, que basicamente faz referência à norma internacional acima abordada. (Diário da República: I série, 2002)

1.1 Objetivos e Motivação

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) nas instalações do CATIM – Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica.

Este trabalho teve duas partes distintas, onde a primeira teve como principal objetivo o conhecimento e aprofundamento dos equipamentos utilizados na calibração de medidores eletrónicos laser. A segunda parte deste trabalho teve essencialmente como objetivo o reaproveitamento de uma banca de medição linear laser através da implementação de um sistema automático, não sendo necessário alocar um técnico de forma integral durante a calibração de medidores de distâncias.

Todos os laboratórios deveriam trabalhar na vanguarda da tecnologia para que sejam capazes de impulsionar outras instituições a fazê-lo, aumentando assim a competitividade entre si, e como tal o CATIM não é exceção. No mercado, a qualidade do serviço e o tempo de resposta continuam a ser dois fatores bastante importantes.

Esta instituição foi fundada a 25 de agosto de 1986, através de um protocolo entre o IAPMEI (Instituto de Apoio às Pequenas Empresas e ao Investimento), a AIMMAP (Associação dos Industriais Metalúrgicos e Metalomecânicos e Afins de Portugal) e o LNETI (Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial).



Figura 3 - Logotipo do CATIM

Em 1983 e por força do protocolo inicialmente referido e com o apoio das empresas fabricantes de aparelhos a gás, foi criado o Laboratório de Material de Queima que se dedicou a fazer ensaios a este tipo de equipamentos. Estas empresas confrontavam-se com a obrigatoriedade de certificação dos seus produtos, quer no mercado interno quer externo, sendo necessário a evidenciação da conformidade com as normas aplicáveis em cada um dos mercados alvo.

A partir dessa data o CATIM foi criando novos laboratórios e unidades funcionais, desenvolvendo novas competências e serviços, por isso, a missão do CATIM consiste na contribuição para a inovação e melhoria da competitividade da indústria nacional, mais especificamente no setor da metalomecânica e setores complementares.

Esta missão só é continuamente cumprida se esta instituição souber apoiar técnica e tecnologicamente as empresas do mesmo setor, não só disponibilizando as suas competências na realização de ensaios e calibrações, mas também na implementação de Sistemas de Gestão da Qualidade, Ambiente e Segurança e na contínua formação e qualificação dos seus técnicos.

A ambição exponencial do CATIM em tornar-se um centro tecnológico de referência fez com que os vários laboratórios aos poucos fossem acreditados, segundo a NP EN ISO/IEC 17025:2005, para determinadas calibrações. Neste momento, o CATIM é acreditado em diversas áreas da metrologia, tais como na área Dimensional, Eletricidade: Corrente Contínua e Baixa Frequência (frequência menor ou igual a 1 MHz), Força, Massa, Momento, Pressão, Temperatura e Humidade, Tempo e Frequência, Velocidade e Aceleração.

A NP EN ISO/IEC 17025:2005 consiste nos requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, ou seja, é uma norma dedicada para o sistema de gestão em laboratórios. Os laboratórios que queiram demonstrar a sua competência devem implementar os requisitos desta norma e depois serem sujeitos à auditoria da entidade acreditadora. O organismo nacional de acreditação em Portugal é o IPAC (Instituto Português de Acreditação). A atividade de acreditação consiste na “avaliação e reconhecimento da competência técnica de entidades para efetuar atividades específicas de avaliação da conformidade”. (A ACREDITAÇÃO, 2016)

Além disso, o CATIM é ainda acreditado segundo a NP EN ISO 9001:2008 no que diz respeito ao sistema de gestão. Esta norma permite, entre outros, assegurar assistência técnica e auditorias em

qualidade, ambiente e segurança no trabalho, proporcionando a melhoria contínua dos processos e sistemas de gestão de qualidade, traduzindo-se numa maior performance e influência positiva na empresa.

São nestes pontos que o CATIM tem insistido e procurado desde o primeiro dia, de forma continuada, consistente e de forma autónoma, realizando programas anuais de formação interempresas, ou respondendo às várias solicitações das empresas e entidades públicas.

O CATIM neste momento conta com cerca de 700 empresas associadas e com pelo menos 3000 empresas que recorrem de forma continuada aos seus serviços. (CATIM, 2015)

1.2 Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos separados por temas. O capítulo 1, chamado de Introdução, apresenta os objetivos para a realização desta Tese, faz o enquadramento do projeto e apresenta a empresa onde foi realizado esta Tese.

O capítulo 2, intitulado de Estado da Arte, refere o que é um medidor de distância laser, quais os seus princípios de funcionamento e também quais as suas principais características. É também neste capítulo que é abordado o método de calibração de medidores de distância lineares laser, fazendo-se uma breve referência ao conceito de interferometria e também aos termos técnicos de uma calibração, tais como fontes de incerteza.

O capítulo 3, designado de Componentes do Projeto, contém as bases para a execução deste projeto, tais como a programação do algoritmo de deteção de caracteres e a motorização da bancada laser.

Por último, o capítulo 4, nomeado de Conclusões, que refere os resultados obtidos resultantes do processo de automatização da banca de medição laser, bem como todas as conclusões sobre o trabalho realizado. Como perspetivas para futuro são sugeridas algumas implementações / atualizações de alguns equipamentos de forma a melhorar a eficiência e eficácia do serviço prestado.

2 CAPÍTULO II

Neste capítulo pode-se encontrar um pouco da história e evolução dos medidores laser, abordando, claro está, o método de calibração de medidores de distância lineares laser. Faz-se igualmente uma referência ao conceito de interferometria (interferómetro de Michelson) e também aos termos técnicos de uma calibração, tais como fontes de incerteza.

2.1 Estado da Arte

Os Medidores de Distâncias Eletrônicas (EDM), como o próprio nome indica, são instrumentos capazes de medir distâncias eletronicamente. Não é fácil realizar um histórico para este tipo de equipamento, visto que o seu início remonta ao ano 1943, desenvolvido pelo cientista sueco E. Bergstran, que idealizou um medidor de pequenas distâncias para poder determinar a velocidade da luz. O cientista denominou-o por Geodimeter NASM-2, devido à desconstrução das palavras *Geodetic Distance Meter*. (Universidade Federal da Bahia, 2016) (Rüeger, 1996)

Este aparelho enviava um feixe de luz para um refletor e analisava a diferença entre o comprimento de onda do sinal enviado e do sinal de retorno, chamada de comutação de fase. Desta forma era possível obter resultados exatos para os pontos de medição. Só em 1950 é que este equipamento se tornou disponível tendo sido produzido pela multinacional sueca AGA, sendo que apenas em 1960 é que apareceram os primeiros protótipos de medidores eletrônicos de curta distância, principalmente pela empresa *Zeiss*.

Em 1954, T. L. Wadley aprimorou o EDM convencional criando um medidor de distância que funciona através de ondas de rádio. Este projeto foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Telecomunicações e Pesquisa de África do Sul (em inglês, *National Institute of Telecommunications Research of South Africa*). (Rüeger, 1996)

Com a implementação deste género de equipamento no mercado passou a obter-se resultados com resoluções inferiores ao milímetro, mm, deixando de se usar com tanta frequência outros mecanismos para medir distâncias no terreno entre pontos topográficos, como por exemplo medir diretamente a distância, com recurso a fitas métricas, ou fazer o levantamento topográfico.

Numa fase inicial, os medidores de distâncias eletrônicas devido às suas características físicas eram usados isoladamente, pois eram bastante grandes e pesados. Com o avanço da tecnologia, os EDM foram ficando mais leves e mais pequenos, tomando nos dias de hoje dimensões capazes de serem guardados no bolso. Por exemplo, a Figura 4 é um modelo de EDM atual onde as suas dimensões são 11 cm, 5.3 cm, 3.3 cm, para o comprimento, largura e profundidade, respetivamente.



Figura 4 - Exemplo de um medidor de distâncias laser (Fluke 414D).

Hoje em dia, existem vários tipos de medidores de distâncias eletrônicos, podendo estes ser por laser, por infravermelhos ou até por ultrassons.

Todos estes medidores de distâncias possuem vantagens e limitações, por isso, cabe ao operador entender qual destes equipamentos serve para o processo ou produto em que está a trabalhar.

O medidor de distância laser possui uma exatidão mais elevada (depende do EDM utilizado, mas normalmente abaixo de 1 mm) quando comparado com outros equipamentos também para a medição de comprimentos (por exemplo, as réguas têm uma exatidão aproximada de 10 mm), podendo também operar até gamas mais elevadas, cerca de 200 m, em comparação com outros medidores eletrônicos de distância. Estes EDM laser são muito usados também pelos seus intensos feixes de luz, idealmente numa única frequência, facilitando a leitura do sinal recebido.

Em contrapartida, apenas é possível determinar distâncias a partir de cerca de 20 cm, dependendo de modelo para modelo.

O medidor de distância por ultrassom é um equipamento que tem uma gama de operação mais curta, podendo ir de 1 cm até pouco mais de 6 m. Para este tipo de equipamento conhecem-se várias limitações, como é o caso do campo de atuação destes EDM, pois possuem um perfil cónico, ou seja, para distâncias mais pequenas pode ser usado com grande rigor, mas quanto mais se aumenta a distância (perto dos 6 m) mais erros poderá introduzir no sistema, como se pode constatar na Figura 5.



Figura 5 – Princípio de medição por ultrassons. Este tipo de medição para grandes distâncias poderá não ser vantajoso.

Outra limitação de um medidor de distâncias por ultrassom é a quantidade de energia que provém da reflexão da onda sonora depois de embater no obstáculo. Se o obstáculo for muito irregular poderá provocar uma reflexão difusa, levando à perda de energia, logo poderá provocar leituras inválidas ou até mesmo a incapacidade de determinar a distância do obstáculo.

Este tipo de equipamento rege-se pelas leis fundamentais da reflexão de ondas, ou seja, o ângulo de incidência da onda sonora emitida pelo EDM será o mesmo do ângulo de reflexão, em relação à normal, podendo fazer com que onda regresse ao EDM depois de ter chocado com mais de que um obstáculo, induzindo uma leitura falsa no medidor de distância (Figura 6). (Perez, 2016)

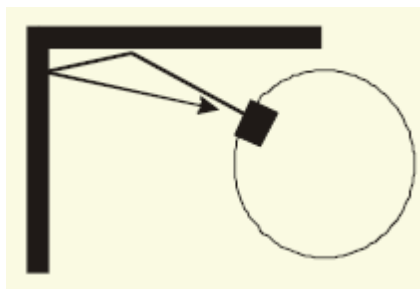


Figura 6 – Exemplo da reflexão de ondas em superfícies difusas.

Por último, existem os medidores de distâncias por infravermelhos. Estes EDM não são muito utilizados, o seu uso incide mais na área da robótica como sensor para detetar obstáculos, contudo possuem algumas vantagens que tornam possível e até interessante a sua utilização para mensurar distâncias. O seu funcionamento consiste na deteção de parte do espectro eletromagnético (zona de infravermelho), onde a tensão elétrica medida nos terminais do sensor varia consoante a intensidade de radiação incidente no dispositivo. Este EDM possui vantagens como é o caso da sua gama de utilização que pode ir desde os 10 cm até os 80 cm, logo pode ser um equipamento apetecível quando queremos mensurar distâncias relativamente pequenas com uma exatidão mais elevada. Estes dispositivos apresentam uma velocidade elevada de execução, bem como uma dimensão mais reduzida em relação a outros mecanismos de medição. Por outro lado, este tipo de dispositivo é bastante suscetível a interferências de elementos exteriores como é o caso da iluminação. (Reyes, 2011)

2.2 Medidores de Distância Laser

Atualmente, a calibração de medidores de distância lineares consiste na avaliação do erro obtido através da comparação entre o valor do equipamento a calibrar e o valor padrão. O padrão de referência (usado pelo laboratório do CATIM) consiste numa fonte emissora laser (HP 5518A). O sistema é composto pelo laser, por um divisor de feixe (*beam splitter*) e um retrorefletor que se encontra acoplado a um mecanismo móvel, basicamente, este sistema consiste num interferómetro de Michelson, como se pode verificar na Figura 7. A fonte emissora laser HP 5518A, além de produzir o feixe laser também possui um medidor / contador de franjas operado internamente, que através de software é convertido para milímetros (ou para qualquer outra unidade efetuando a respetiva conversão).

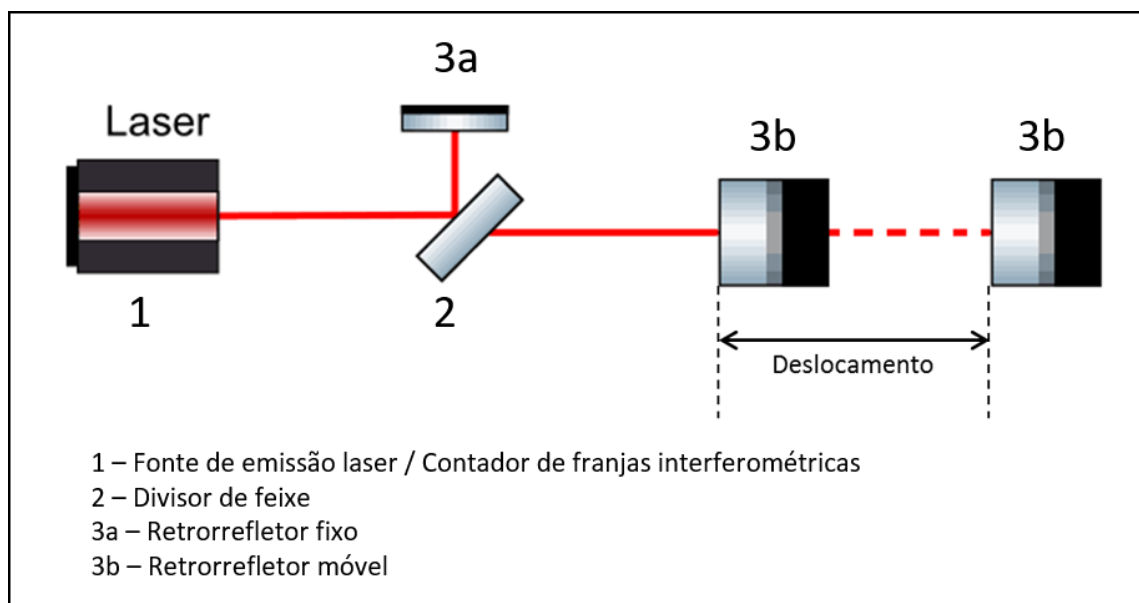


Figura 7 - Exemplo do funcionamento do interferómetro de Michelson.

O interferómetro de Michelson consiste na divisão de um feixe laser em dois através de um divisor de feixe (espelho semitransparente). De seguida, um dos feixes segue para um retrorefletor cuja distância é fixa e previamente conhecida. O outro feixe segue para outro retrorefletor que, neste caso, está acoplado a um mecanismo móvel.

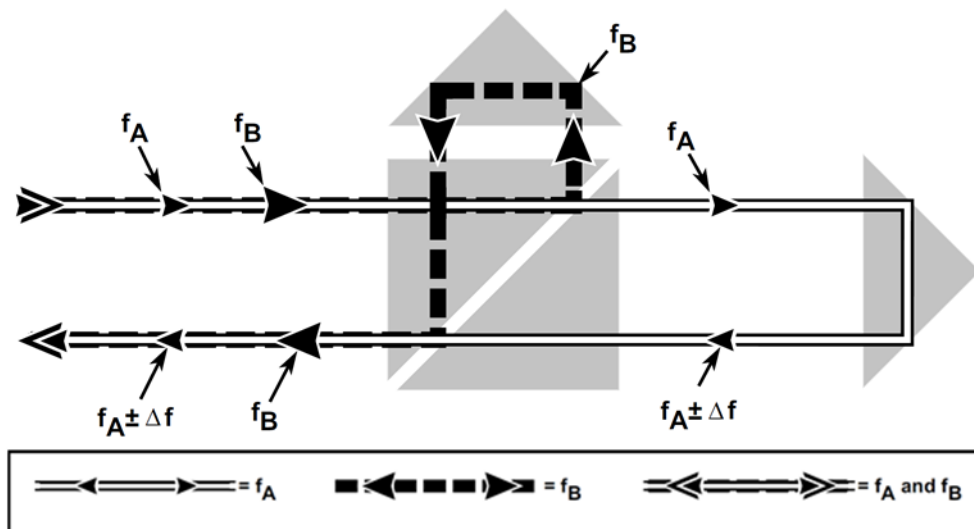


Figura 8 – Esquema interno do princípio de divisão de feixes do interferômetro de Michelson

Ambos os feixes são refletidos e recombinados quando interferem após a saída do espelho semitransparente no divisor de feixe, dando origem a um padrão de interferência (constituído por franjas de interferência) que é lido num detetor (Figura 9). Através de *software* é possível materializar este padrão de interferência em unidades de comprimento.

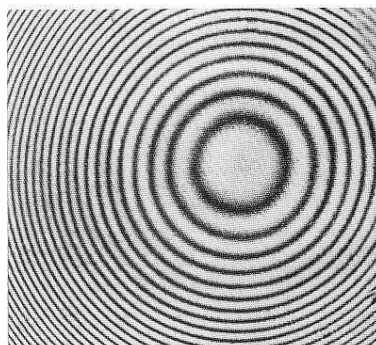


Figura 9 - Exemplo de franjas de interferência

A unidade base do Sistema Internacional que abrange o comprimento é o metro, palavra que provém do grego *metron*, que quer dizer medida. A primeira definição de metro remonta ao ano 1793, afirmando que metro correspondia à “Décima milionésima parte de um arco de um meridiano terrestre que passa por Paris”, com uma exatidão associada de 0,06 mm. Esta definição foi proposta pelo povo francês, mais propriamente pela Academia Francesa de Ciências. Graças ao desenvolvimento de técnicas de medição levou a uma revisão da definição, que certamente iria sofrer modificações, tal como aconteceu anos mais tarde, em 1799. A segunda definição afirmava que metro correspondia à “Distância entre topos de uma barra de platina a 0 °C”. A exatidão deste padrão encontrava-se na ordem do 0,002 mm.

Em 1889, cerca de 90 anos mais tarde, uma nova definição de metro entrava em vigor, onde metro consistia na “Distância entre dois traços centrais marcados numa barra de platina iridiada, de secção em X, à temperatura de 0° C”. A exatidão deste padrão já se encontrava na ordem dos 0,007 μm .



Figura 10 - Representação das barras de platina iridiada usadas em 1889.

É também durante este ano que se dá início à 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, na qual foi escolhido o padrão para a grandeza base do comprimento. Foram mandados fazer trinta padrões para distribuir entre os países aderentes, sendo que Portugal fazia parte e ficou com o padrão número 10.

Em 1960 saía a mais recente definição de metro, onde se afirmava que metro era igual a “1650763,73 comprimentos de onda, no vácuo, da radiação correspondente à transição entre os níveis 2p e 5d do átomo de cripton-86 (Kr-86)”. Com esta definição de metro, a exatidão do método encontrava-se na ordem dos 0,7 nm. (Sousa, Cadernos Técnicos: Notas Históricas, 2010)

Por fim, a última definição de metro e a mais atual remete para o ano de 1983 onde “O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299792458$ s”. Neste momento, a exatidão do método está na ordem dos 0,02 nm. (Ministério Do Desenvolvimento, Indústria E Comércio Exterior, 2013) (Diário da República: I série, 2002)

Atualmente, a implementação do metro é realizada nos Institutos Nacionais de Metrologia, sendo depois comparados nos laboratórios do BIPM (*Bureau international des poids et mesures*, em francês).

A interferência no espaço e no tempo de duas fontes de luz coerentes gera uma interferência harmoniosa tanto espacial como temporal. A interferência pode ser entendida como uma soma, existindo momentos onde a soma vetorial eletromagnética pode magnificada (interferência construtiva) ou então anulada (interferência destrutiva). Como a luz é harmônica, os pontos máximos e mínimos também o serão, dependendo a frequência exclusivamente da frequência original dos feixes (Figura 11).

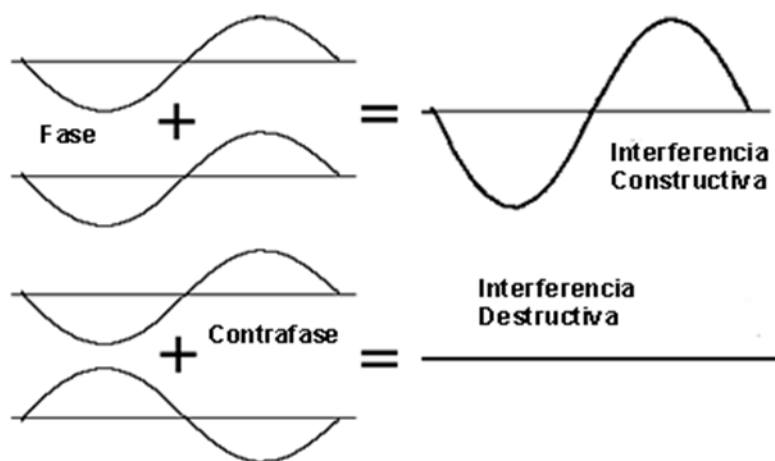


Figura 11 – Diferenças entre interferências construtivas e destrutivas.

Na metrologia ótica não existem interferências especificamente completas, ou seja, as não existe interferência ao longo de todo o comprimento de onda, mas sim frações de interferência, contudo, é possível realizar interpolações do comprimento de onda de um laser estabilizado. Veja-se este exemplo, se o comprimento de onda for de 633 nm, a sua resolução base é cerca 316 nm, no entanto, conseguem-se interpolações eletronicamente com fatores de 10000 vezes, podendo obter-se resoluções de 0,03 nm. (Lourenço, 2014)

Existem grandes vantagens na medição da distância através de processos de interferometria pois é uma técnica que é rastreada diretamente a padrões primários e a sua resolução é praticamente ilimitada.

Quanto à repetibilidade de um sistema laser pode dividir-se em duas categorias: repetibilidade a curto prazo ou a longo prazo consoante o tempo de estabilização da fonte emissora laser.

Quando a estabilidade de medição é considerada inferior a uma hora pode-se afirmar que a característica do laser consiste na repetibilidade a curto prazo e possui cerca de $\pm 0,002$ ppm de estabilidade, contudo quando a estabilidade de medição só é possível depois de uma hora, diz-se que corresponde a uma repetibilidade a longo prazo, sendo que neste caso a estabilidade é de cerca $\pm 0,02$ ppm. A resolução básica de um sistema interferométrico é de cerca de metade do comprimento de onda do laser padrão, ou seja, se o seu comprimento de onda for de 633 nm, a resolução básica do sistema é de 316,5 nm, se bem que pode ser eletronicamente aumentada como referido anteriormente. Tipicamente, um sistema interferométrico possui uma resolução desde 10 nm até cerca de 2,5 nm. (Lourenço, 2014)

Aqui já foram referidas algumas vantagens da utilização de sistemas interferométricos, porém, este sistema também apresenta múltiplas fontes de incerteza que serão abordadas daqui para a frente. A incerteza de um sistema abrange diversos componentes, sendo que uns são afetados pelo ambiente de funcionamento, outros pela instalação do sistema.

Quanto ao procedimento de calibração propriamente dito, o medidor de distância a calibrar é colocado junto do retrorefletor no mecanismo móvel. O técnico inicializa a calibração ligando o padrão laser, pois o padrão precisa de estabilizar durante pelo menos 30 minutos. Se o laser não estiver estável existe uma maior dispersão de valores, afetando os valores de calibração.

De seguida coloca-se o medidor de distâncias a calibrar num ponto comum ao equipamento e ao laser padrão, fazendo *reset* ao software.

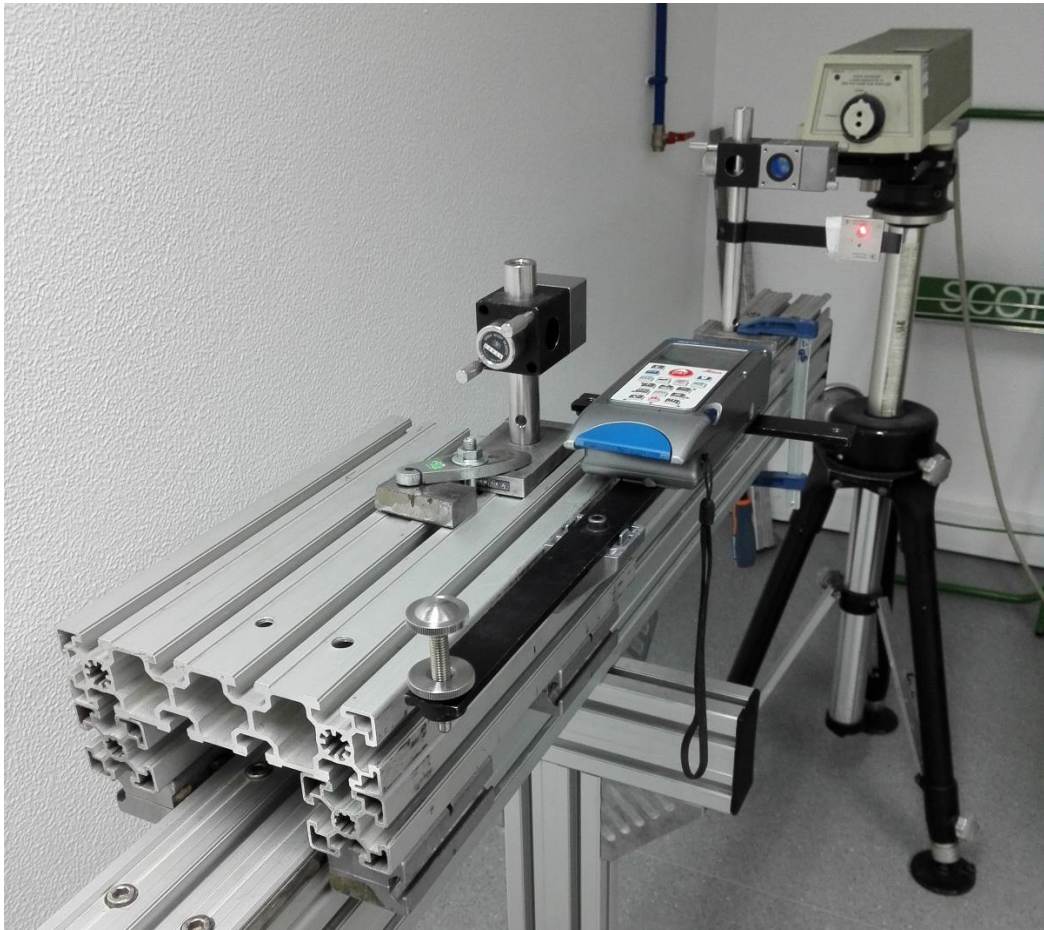


Figura 12 – Exemplo de medição de um ponto de calibração de EDM no laboratório de metrologia dimensional do CATIM

O mecanismo móvel é deslocado, seja manualmente ao longo da bancada de medição, seja com recurso a um motor, como se poderá verificar mais à frente neste relatório, para a primeira posição pretendida, registando a distância obtida no laser padrão. Este mecanismo contém o retrorefletor e o EDM a calibrar.

Repetem-se estes passos para as restantes posições pretendidas. No fim da primeira série de distâncias obtidas, repete-se o processo, para pelo menos, mais 2 séries.

As posições de calibração (como se pode verifica através do esquema da Figura 13) são introduzidas previamente no *software* de calibração. As distâncias base são obtidas através das seguintes equações: (ISO 17123-4:2012):

$$d1 = \lambda + \beta_0 + 3*Y \quad (\text{m}) \quad (1.1)$$

$$d2 = \lambda + 3*\beta_0 + 7*Y \quad (\text{m}) \quad (1.2)$$

$$d3 = \lambda + 5*\beta_0 + 11*Y \quad (\text{m}) \quad (1.3)$$

$$d4 = \lambda + 4*\beta_0 + 9*Y \quad (\text{m}) \quad (1.4)$$

$$d5 = \lambda + 2*\beta_0 + 5*Y \quad (\text{m}) \quad (1.5)$$

λ = Comprimento de onda modulado do feixe laser.

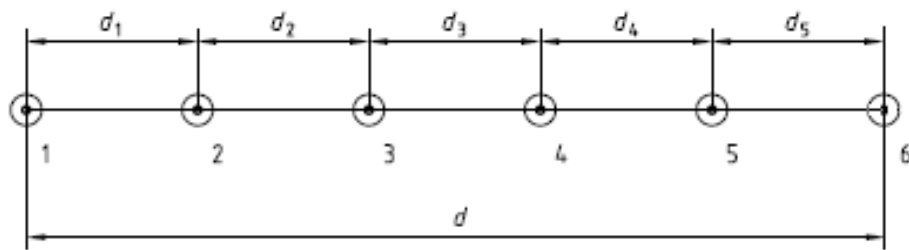


Figura 13 – Posições dos pontos de calibração.

β_0 = Coeficiente obtido através da fórmula:

$$\beta_0 = (d0 - 6.5*\lambda)/15 \quad (\text{m}) \quad (6)$$

$d0$ = Comprimento útil da bancada de medição, em metros.

Y = Coeficiente obtido através da fórmula:

$$Y = \lambda/72 \quad (\text{m}) \quad (7)$$

Neste tipo de calibração deve ter-se alguns cuidados no alinhamento do sistema de calibração de modo a evitar leituras incorretas, para tal deve minimizar-se o erro de Abbe e o erro de cosseno. (Lourenço, 2014)

O princípio de Abbe, nome atribuído devido ao cientista Ernest Abbe, consiste no alinhamento do eixo de medição, neste caso entre o feixe laser e o eixo mecânico do movimento, sendo por isso que o erro de Abbe resulta na diferença entre a distância medida e a distância real (Figura 14). Para entender esta mecânica, o micrómetro é um instrumento que respeita este princípio, enquanto o paquímetro já não.

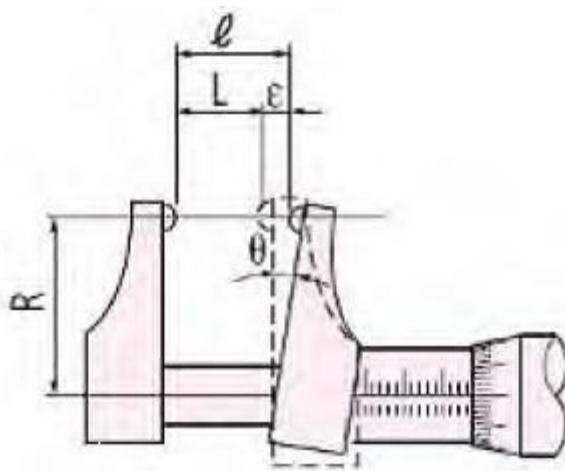


Figura 14 – Exemplo da definição do princípio de Abbe num paquímetro.

O erro de cosseno pode ser compreendido como um erro devido ao mau alinhamento do equipamento a medir com o eixo (Figura 15). Estes tipos de desalinhamento provocam um decréscimo da intensidade de sinal do laser de referência bem como uma diferença entre a distância medida e a distância real percorrida. De modo a minimizar este erro deve-se centrar o feixe laser nos retrorefletores com recurso a miras. Se este princípio não for respeitado o erro do equipamento pode tomar valores erróneos, isto porque existirá uma amplificação da distância obtida através de um erro angular.

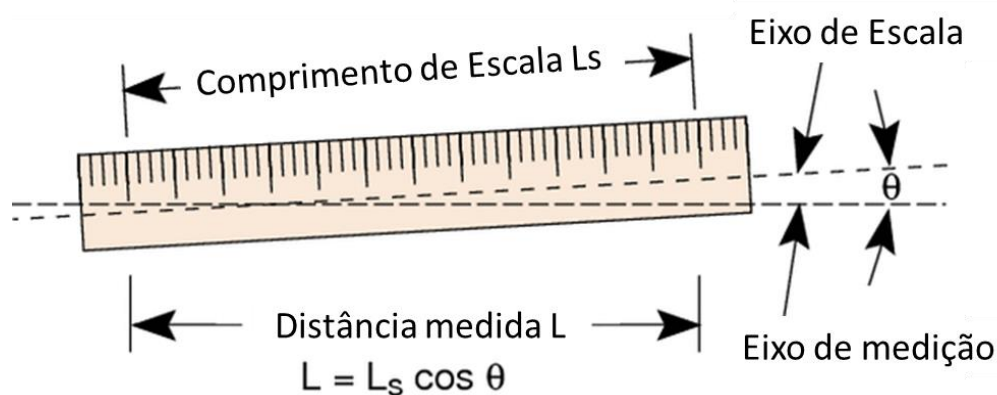


Figura 15 – Esquema explicativo da definição de erro de cosseno.

Outro erro muito importante é o comprimento morto, em inglês *death path*, pois este erro é causado por um comprimento não compensado do feixe laser entre o divisor de feixe e o retrorefletor do mecanismo móvel, na posição de zero. (Muñoz, 2015)

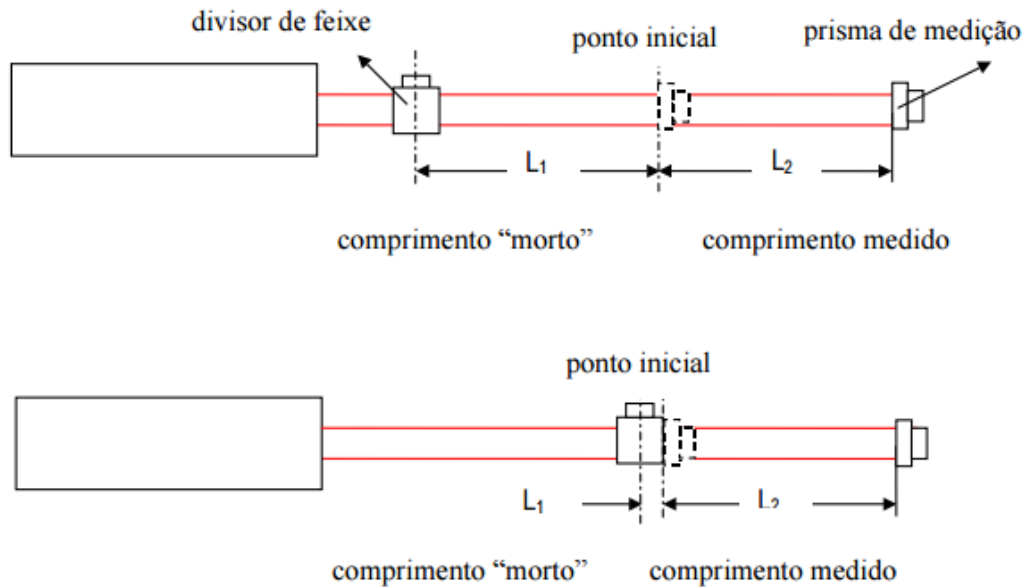


Figura 16 – Esquema explicativo da definição do comprimento morto.

A ocorrência deste tipo de erro consiste na possível e provável variação das condições ambientais durante a calibração de um medidor de distâncias. A compensação atmosférica é geralmente a maior componente individual de um balanço de incertezas. A sua intensidade depende da exatidão do método de compensação, do ambiente no qual o sistema está a funcionar e quanto às condições atmosféricas que alteram durante a medição. A variação das condições tem inerentes as variações da temperatura, da pressão atmosférica e da humidade do ar.

O comprimento de onda da fonte de laser é especificado como o comprimento de onda no vácuo. Como se sabe, o comprimento de onda é constante, mas na atmosfera este comprimento de onda depende do índice de refração da atmosfera.

A maioria dos sistemas de interferometria laser funcionam no ar, portanto é necessário efetuar a correção da diferença entre os dois comprimentos de onda, no vácuo e no ar. O índice de refração é dado pela divisão entre o comprimento de onda no vácuo e o comprimento de onda no ar.

$$n = \frac{\lambda_{\text{vácuo}}}{\lambda_{\text{ar}}} \quad (8)$$

A densidade do ar varia em função da temperatura do ar, da sua pressão, da sua humidade e também da sua composição. Todos estes fatores afetam diretamente o índice de refração do ar, sendo por isso extremamente necessário a sua correção.

A compensação pode ser efetuada automaticamente da medição direta do índice de refração do ar através de um refratômetro, mas se tal não for possível, o mais correto é monitorizar a pressão, a temperatura e a humidade relativa do ar e de seguida relacionar esses dados usando as fórmulas de Barrel & Sears ou de Edlen. É importante salientar que o uso de um refratômetro origina uma incerteza típica de $\pm 0,4$ ppm, enquanto que a utilização das fórmulas acima referidas origina uma incerteza típica de $\pm 1,4$ ppm. (Lourenço, 2014)

Assumindo que existe uma composição homogénea do ar, ocorre uma variação de uma parte por milhão (ppm) em qualquer das seguintes condições:

- Variação de 1° C na temperatura do ar;
- Variação de 333,3 Pa na pressão do ar;
- Variação de 80 % na humidade relativa do ar.

A não linearidade ótica é outro fator que afeta a incerteza de um sistema de interferometria, devido à incapacidade de separar perfeitamente as duas componentes do feixe laser, tais como a polarização horizontal e vertical, originando um feixe ligeiramente elítico. Este fator depende essencialmente da qualidade dos equipamentos utilizados.

As mudanças de temperatura num laboratório de metrologia são bastante prejudiciais, pior se ocorrerem durante uma calibração. Num sistema interferométrico laser, as mudanças de temperatura dos componentes óticos durante a medição causam uma alteração no comprimento do percurso ótico percorrido pelo feixe laser. Esta mudança no comprimento do percurso ótico reflete-se como uma aparente mudança de distância. Isto acontece devido à alteração das condições dos componentes óticos e por consequência do índice de refração.

2.3 Princípio de funcionamento do EDM laser

O laser é uma radiação eletromagnética monocromática (possui uma única frequência, ou uma gama de frequências muito reduzida), coerente (ondas com a mesma frequência e direção) e colimada (trajetórias dos feixes perfeitamente paralelos entre si).

Uma das maneiras já aqui abordadas para medir distâncias até um obstáculo consiste em usar um emissor laser que emite um sinal modulado numa onda sinusoidal. Dentro deste método existem 4 formas possíveis de obter a distância proveniente do EDM. Existe o método de pulso, a diferença de fase, pelo método de Doppler e por interferometria. O sinal é refletido no obstáculo sendo detetado pelo recetor que é capaz de determinar a diferença de fase entre o sinal emitido e refletido. Esta diferença de fase é baseada no tempo de voo visto que o feixe laser se move a uma velocidade constante na atmosfera.

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende essencialmente da frequência do sinal e pode ser descrita através da seguinte fórmula.

$$\begin{aligned} Y &= A. \text{sen}(wt) \\ &= A. \text{sen}(\varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

Y = Sinal emitido pelo emissor

A = Amplitude de oscilação do sinal

ω = Frequência angular, $\omega = 2\pi f$

t = Tempo de oscilação, em s

φ = Fase do sinal

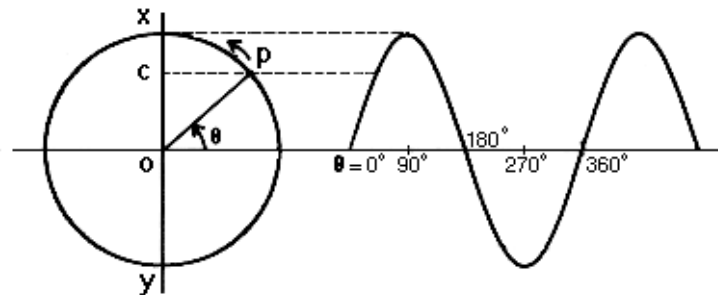


Figura 17 – Representação de uma onda sinusoidal.

Inicialmente, antes do século XVII, os cientistas acreditavam que não existia o termo velocidade da luz, pois a luz podia viajar qualquer distância possível de forma instantânea. O primeiro cientista a ter sensibilidade neste tema foi Galileu Galilei, em 1638, tendo tentado determinar a velocidade da luz. A sua experiência consistia em destapar dois focos de luz espaçados entre eles de uma certa distância (crê-se que próximo de um quilómetro). Galileu tinha um candeeiro e o seu assistente tinha outro. Quando o assistente visse a luz do outro candeeiro destapava o seu e pela diferença do tempo, Galileu afirmou que a velocidade da luz era 10 vezes superior à velocidade do som. (Fowler, 2016)

Mais tarde, em 1675, o astrónomo dinamarquês Ole Roemer, depois de observar a luas de Júpiter percebeu que se a Terra estivesse mais perto de Júpiter as luas passavam mais rápido do que quando a Terra estava mais afastada. Para deduzir a velocidade da luz usou o valor aceite do diâmetro da Terra, chegando à conclusão que a luz viajava a 200 000 000 m/s.

Em 1728, o físico Inglês James Bradley determinou a velocidade da luz no vácuo a partir da aberração estelar (em inglês, stellar aberration). A aberração produz o movimento aparente de corpos celestes de acordo com as suas posições dependendo da velocidade do observador. Sabendo a velocidade da Terra e também o ângulo equivalente dos corpos celestes, Bradley foi capaz de determinar a velocidade da luz, afirmando que correspondia a 301 000 000 m/s. (Fowler, 2016)

Em 1849 foi a vez do físico francês Leon Foucault de calcular a famosa velocidade da luz. Para isso necessitou de 2 espelhos, um rotativo e o outro fixo. Foucault fez incidir um feixe de uma lâmpada no espelho rotativo, refletindo para o espelho fixo que estava afastado. Como é lógico o feixe é refletido no sentido contrário para o espelho rotativo, sendo que este feixe tem um ângulo ligeiramente diferente do inicial. Calculando esta diferença, Foucault foi capaz de determinar e aperfeiçoar a técnica, conseguindo o valor final de 299 796 000 m/s. (Instituto Português da Qualidade, 2015)

Atualmente, a velocidade da luz no vácuo é uma constante física determinada experimentalmente, segundo o BIPM. Esta organização foi criada para manter o Sistema

Internacional (SI) sob as condições da convenção do Metro. O BIPM refere que a velocidade da luz no vácuo é exatamente $c_0 = 299\,792\,458$ m/s. (Lourenço, 2014) (Instituto Português da Qualidade, 2015)

Usualmente é usado uma fórmula para converter a velocidade da luz no vácuo para a velocidade da luz noutro meio de propagação, para isso utiliza-se a seguinte equação:

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (10)$$

c_0 = velocidade da luz no vácuo, 299 792 458 m/s

n = índice de refração do meio

O índice de refração de um meio é bastante difícil de determinar ao longo do caminho completo da onda, por isso os medidores de distância laser tomam como verdadeiro um valor fixo.

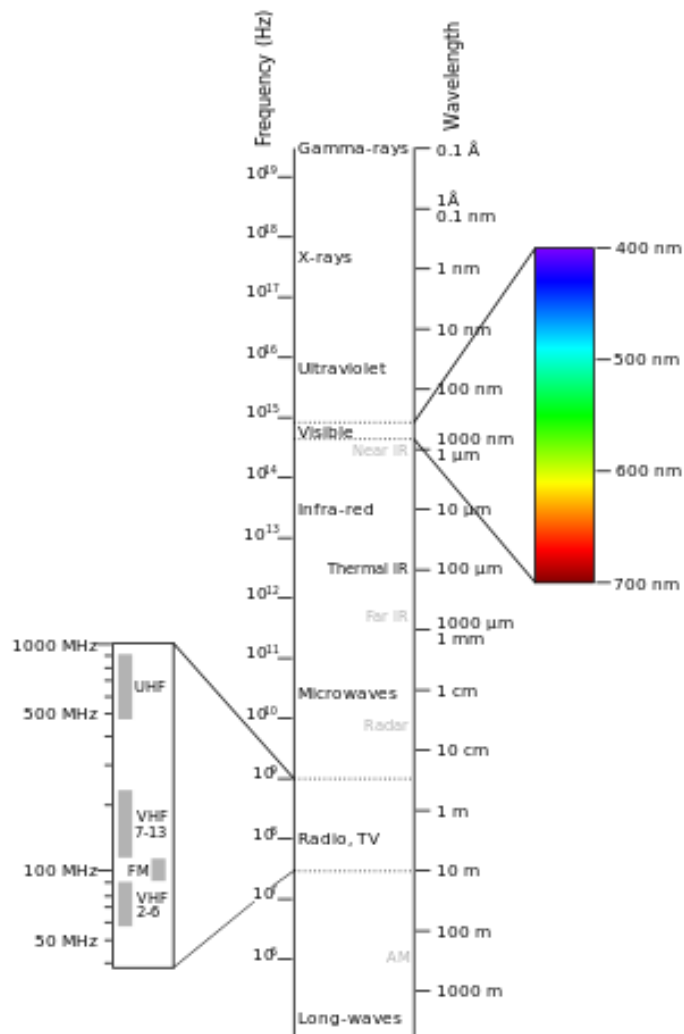


Figura 18 – Relação entre a frequência e o comprimento de onda.

Os medidores de distância laser usam essencialmente luz vermelha com o comprimento de onda na ordem dos 630 nm, enquanto os medidores de distância por ultrassons usam um

comprimento de onda entre os 10 m e os 100 mm. Nos EDM por infravermelhos, o comprimento de onda está na ordem do 1 μm e 1 mm.

Se for preciso converter a informação presente em frequência usa-se a seguinte fórmula:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (11)$$

f = frequência, em Hz

λ = Comprimento de onda, em m

Existem dois tipos de método para o funcionamento do EDM por laser, são eles o método de pulso laser (tempo de voo) e o método de diferença de fase.

2.3.1 Método do Pulso (Tempo de voo)

A maioria dos sistemas de medição de distâncias, seja com laser, infravermelhos ou ultrassons, utilizam este tipo de método. É baseado no princípio físico do tempo de voo (*time-of-flight*) de um sinal, onde é emitido um curto e intenso pulso laser que depois será refletido numa superfície e depois lido pelo recetor presente no medidor de distância. O que é calculado é o tempo de voo que, através da fórmula matemática seguinte, se obtém a distância percorrida. É crucial que este mecanismo possua uma escala sub-nanométrica para a contagem do tempo de voo. (Rüeger, 1996)

$$d = \frac{c * \Delta t}{2} \quad (12)$$

d = Distância entre a fonte emissora do pulso e a superfície de reflexão

c = Velocidade da luz no meio

Δt = Tempo de voo

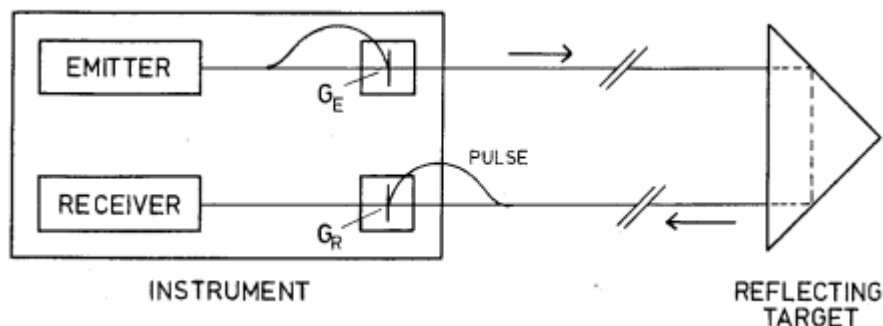


Figura 19 - Princípio de funcionamento do método do pulso.

Esta técnica é usada para grandes distâncias, na ordem das centenas de metros até mesmo quilômetros, por exemplo para medir a distância da Terra à Lua com uma exatidão de alguns centímetros. Como curiosidade, o tempo de voo de um pulso laser emitido da Terra para a Lua é de cerca 2,6 s e devido à divergência do feixe laser, o diâmetro do feixe que chega à Lua chega a atingir cerca de 4 quilômetros. (Rüeger, 1996) (RP Photonics Encyclopedia, 2015) (Schneider, Müller, Schreiber, & Egger, 2016)

2.3.2 Método de Diferença de fase

Este método consiste na emissão de um sinal modulado em 3 ou mais frequências no emissor que é enviado, refletido na superfície refletora e de seguida é lido pelo recetor. Quando o sinal é recebido é calculada a diferença de fase dos dois sinais de modo a obter-se a distância percorrida. Mas só a diferença de fase não corresponde à distância total percorrida, apenas é proporcional a uma pequena fração do comprimento de onda do sinal, para isso é necessário determinar o número de ciclos completos de comprimentos de onda, ou seja, calcular o número inteiro de ondas completas (n).

$$\begin{aligned} Y_E &= A \text{ sen } (\omega t) \\ &= A \text{ sen } (\varphi) \end{aligned} \quad (13)$$

Y_E = Sinal emitido pelo emissor

$$\begin{aligned} Y_R &= A \text{ sen } (\omega t + \Delta\varphi) \\ &= A \text{ sen } (\varphi + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (14)$$

Y_R = Sinal recebido pelo recetor

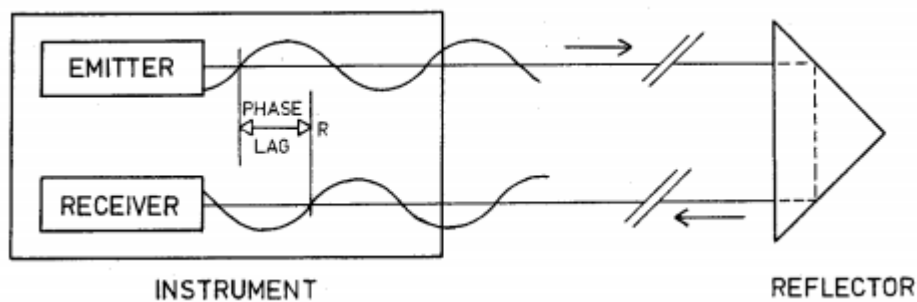


Figura 20 – Princípio de funcionamento do método de diferença de fase.

Neste método o sinal é contínuo, por isso Y_E e Y_R vão variar ao longo do tempo, mas ambos da mesma maneira, logo o parâmetro que irá permanecer constante será delta φ (bem como o Δt). Este método não consegue obter o Δt através da diferença de fase, sendo que para isso é preciso decompor o intervalo do tempo de voo do sinal. (Rüeger, 1996)

$$2d = z\lambda + \Delta\lambda$$

$$d = \left(\frac{z}{2}\right) * \lambda + \left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (15)$$

d = distância a medir

z = número inteiro de ondas

$\Delta\lambda$ = diferença de fase entre a onda emitida e a onda refletida.

λ = comprimento de onda

Os equipamentos permitem a medição do desfasamento da onda eletromagnética enviada e recebida com uma resolução aproximada de 1:10 000, ou seja, se o comprimento de onda fosse na ordem dos 20 metros, a sua resolução seria de 2 mm.

Depois de calculada a diferença de fase é necessário determinar o número inteiro de comprimentos de onda entre o emissor e o recetor. A quantidade de ondas inteiras (z) é determinada pela emissão contínua de várias ondas com diferentes frequências e por isso com diferentes comprimentos de onda. (Netto, Soares, da Silva, Otoboni, & Stefani, 2000) (Segantine & Silva, 2015)

2.4 Características do medidor de distância laser

A principal característica diz respeito à fonte de emissão. A mais usada é o díodo laser de Gálio-Arsénio (Ga-As) devido à sua gama de utilização, que fica compreendida entre o curto alcance e o médio alcance. O seu comprimento de onda situa-se nos 875 nm, podendo divergir entre os 800 nm e os 950 nm. A sua largura de banda é de cerca 30 nm, sendo portanto praticamente monocromática.

Comparando este díodo laser com uma fonte emissora laser, como é o caso dos laser Hélio-Néon (He-Ne), uma das desvantagens é o alcance. O laser He-Ne pode chegar aos 80 km, dependendo sempre das condições ambientais, enquanto que o díodo laser não chega a 1 km.

Outra diferença entre estas duas fontes de luz é divergência do feixe laser, sendo que no laser He-Ne é muito mais baixa (cerca de 1 cm aos 10 m) que no díodo laser, que é o que apresenta maior divergência em toda a família dos laser. (Segantine & Silva, 2015) (Rüeger, 1996)

O modulador também vai influenciar o funcionamento do medidor de distâncias. Existem diversos moduladores para vários efeitos, desde moduladores em amplitude, frequência, fase, entre outros. Os medidores de distâncias usam o modulador em amplitude, fazendo apenas variar o valor da amplitude em relação à frequência do oscilador. A imagem da Figura 21 ilustra este fenómeno.

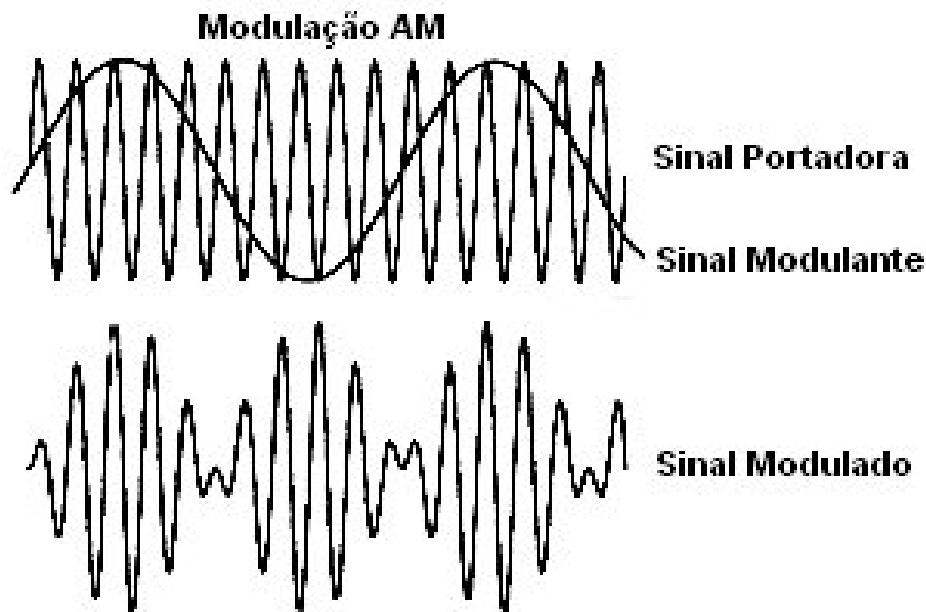


Figura 21 – Exemplo da modulação do sinal em AM.

A onda moduladora possui um comprimento de onda muito maior que a onda portadora, ou seja, a frequência da onda moduladora é menor que a onda portadora.

A lente tem também um papel importante na qualidade do EDM, pois uma lente fraca faz aumentar a divergência do feixe de luz emissor, aumentando por isso a área efetiva na superfície. Tanto teoricamente como empiricamente sabe-se que um feixe de luz mais estreito produz melhores resultados, visto que a área efetiva na superfície refletora é menor e a intensidade do sinal é maior.

De volta ao equipamento de medição, o feixe de luz incide num recetor, que no caso dos medidores de distâncias consiste num fotodíodo. Este é um semicondutor que converte a energia luminosa nele incidente em corrente elétrica.

Existem diversos fotodíodos no mercado, com variadas características interessantes dependendo da aplicação a que for destinada. Aquando a escolha do “melhor” fotodíodo para usar deve ter-se em atenção as características do mesmo, como por exemplo o tempo de resposta, a resposta espectral e a sensibilidade. Resumidamente, o tempo de resposta consiste na velocidade a que o dispositivo consegue detetar variações muito rápidas de luz. A resposta espectral consiste na largura de banda do dispositivo, ou seja, se o fotodíodo for usado no espectro do visível, é comum que o sensor capte radiação infravermelha e também ultravioleta. Quanto à sensibilidade, esta característica indica qual a intensidade mínima de energia luminosa capaz para o sensor detetar. (Como funcionam os foto-díodos (ART1181), 2016)

O detetor de fase é um componente digital que como o nome indica vai comparar a fase do sinal emitido com a fase do sinal recebido. Através de algoritmos matemáticos é possível calcular a distância mensurada.

Ambos os sinais de baixa frequência são convertidos em ondas quadradas e ligados a uma porta digital. Inicialmente, quando o sinal transmitido inicia um ciclo, aciona a porta e logicamente, quando o sinal recebido inicia o seu ciclo, aciona também a porta, desligando-o. Ao mesmo tempo,

graças ao oscilador, quando a porta se encontra “aberta”, são gerados pulsos com uma frequência muito elevada sendo acumulados num contador. Este contador determina qual a distância medida pelo EDM.

Por fim existe o display (visor) que permite observar o valor da distância medida, bem como outros valores, tais como distância mínima calculada, distância máxima, diferença entre pontos, entre outros.

2.5 Componentes do sistema interferométrico padrão

Todos os sistemas interferométricos são compostos por diversos componentes que permitem determinar (medir) franjas interferométricas, para que possam ser convertidas para a grandeza de comprimentos, obtendo-se assim a distância a medir para a calibração. Visto que este projeto foi realizado no CATIM, os componentes que aparecem a partir deste momento são os que se encontram atualmente em funcionamento no laboratório de Metrologia Dimensional.

2.5.1 Cabeça laser HP 5518A

Esta cabeça laser de Hélio-Néon está equipada com emissor e recetor laser, fornecendo um feixe em vácuo com um comprimento de onda de 632,99137 nm. O diâmetro do feixe ronda os 6 mm e a sua estabilidade durante a primeira hora é de 0,002 ppm e ao longo do seu tempo útil de vida é de 0,02 ppm. (Lourenço, 2014)

A cabeça laser usada no CATIM, bem como os sensores pertencentes a este sistema são calibrados no IPQ, sendo os padrões do IPQ rastreáveis a padrões internacionais, como é o caso do BIPM.



Figura 22 – Cabeça laser HP 5518^a

2.5.2 Divisor de feixe linear 10766A

O divisor de feixe serve para divergir o feixe laser em dois feixes, garantindo uma homogeneidade em ambos os feixes. Mais tarde os mesmos feixes são convergidos dando origem à interferência, como já foi aqui abordado.

Este interferómetro da Agilent apresenta uma resolução fundamental de 316,5 nm e o diâmetro do feixe que sai da cabeça laser é mantido.



Figura 23 – Interferómetro linear

2.5.3 Retrorrefletor linear 10767A

Este retrorrefletor foi desenvolvido para medições lineares e para feixes laser com diâmetro na ordem dos 6 mm.

Foi construído com o refletor *corner cube* (em português, canto cúbico) permitindo uma reflexão perfeitamente paralela à incidência inicial, como se verifica na seguinte imagem.

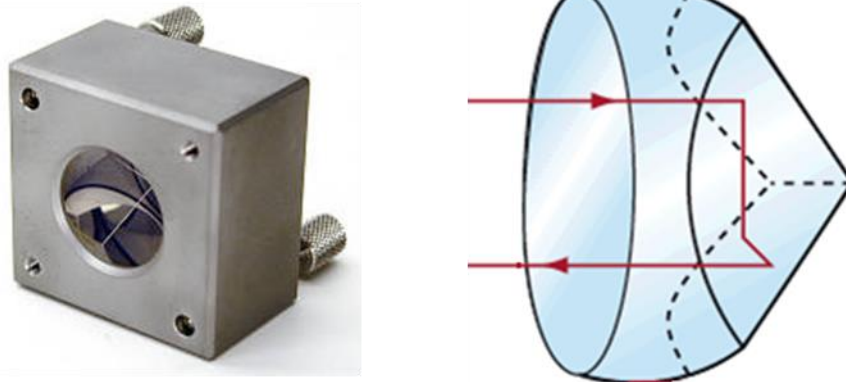


Figura 24 – À esquerda encontra-se o retrorrefletor utilizado. À direita o esquema de funcionamento do mesmo.

2.5.4 Sensor atmosférico 10751B

Este sensor ambiental permite analisar as variações da temperatura do ar e da pressão atmosférica durante a medição do equipamento. O uso deste sensor permite aumentar a repetibilidade do sistema.



Figura 25 – Sensor atmosférico

2.5.5 Sensor de temperatura do material 10757B

O sensor de temperatura do material monitoriza a temperatura do objeto que está a ser medido, detetando diferenças de temperatura e compensando automaticamente o erro da expansão térmica.



Figura 26 – Sensor de temperatura do material

2.5.6 Tripé 10753B

O tripé permite a realização de um alinhamento perfeito do feixe laser do equipamento padrão com os restantes acessórios óticos. Este tripé possui 6 graus de liberdade.

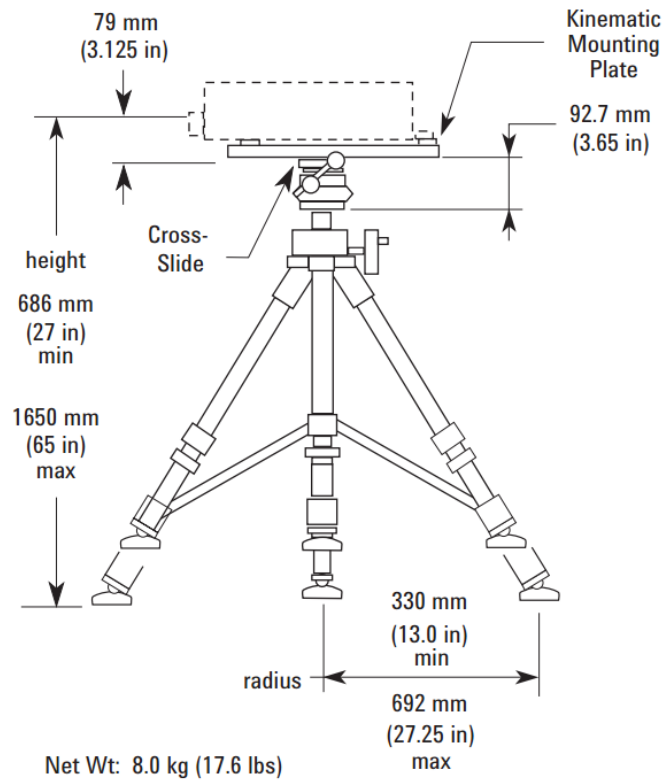


Figura 27 – Tripé para a cabeça laser

2.6 Fontes de incerteza

Neste subcapítulo irá ser abordado as fontes de incerteza que estão inerentes durante a calibração de um medidor de distâncias lineares.

Primeiramente é necessário entender o significado do termo erro no conceito da metrologia. De acordo com o VIM, erro consiste na “diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência”.

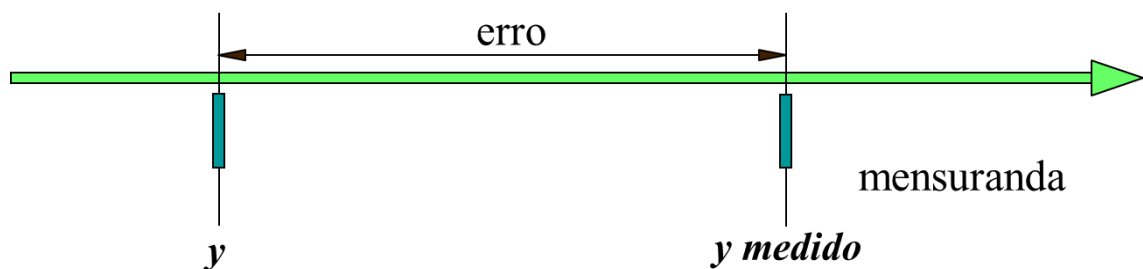


Figura 28 – Esquema ilustrativo da relação entre erro e mensuranda.

O denominado erro de medição é utilizado quando é possível materializar uma grandeza e assim quantificá-la, como neste caso é possível materializar uma distância, através do recurso de um padrão de medição que é o sistema laser.

Os erros podem estar divididos em três classes: os erros sistemáticos, os erros aleatórios e por último os erros grosseiros.

O erro sistemático é o tipo de erro em que a componente do erro influencia todas as medições efetuadas, permanecendo de forma repetida ou variando de uma maneira previsível. A causa do erro sistemático tanto pode ser conhecida como não. Contudo, a equação (16) relaciona os três tipos de erros possíveis durante a medição. (Filipe, Pellegrino, Baratto, de Oliveira, & Mendoza, 2012)

$$\text{Erro sistemático} = \text{Erro de medição} - \text{Erro aleatório} \quad (16)$$

No erro aleatório, após várias medições repetidas, o valor varia de forma imprevisível, sendo este tipo de erro a maior dor de cabeça para o técnico que está a avaliar o resultado da medição. Para tentar colmatar este erro, deve-se calcular a média resultante de um número elevado de repetições da mesma grandeza.

Por último encontra-se o erro grosseiro, que como o nome indica, é um erro que teve origem, por exemplo, na incorreta digitação do valor, ou seja, se o valor medido foi 54,51 mm e o operador colocar na respetiva folha de medição 45,51 mm, está presente este tipo de erro.

Existem diversos tipos de fatores de erro, sendo eles o próprio erro do técnico, os instrumentos de medição, padrões de referência, condições ambientais, entre outros.

Conhecendo o erro e depois de ser quantificado, é possível proceder à sua correção, através soma do valor simétrico do erro quantitativo ao valor medido, como se verifica na fórmula seguinte.

$$\text{Correção} = \text{Valor medido} - \text{Erro} \quad (17)$$

Outro termo que está sempre associado ao resultado de uma medição é a incerteza, que por si só explica a eterna dúvida sobre a veracidade do resultado. O VIM afirma que Incerteza de medição é o “Parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensuranda a partir das informações usadas.» (Filipe, Pellegrino, Baratto, de Oliveira, & Mendoza, 2012)

O resultado de uma medição deve ser apresentado, fazendo referência ao valor lido juntamente com a sua incerteza associada, pois um resultado numérico de uma medição que não tenha informação acerca da exatidão não tem qualquer utilidade!

$$y' = y \pm U \quad (18)$$

y = resultado da medição

U = Incerteza associada à medição

Deve-se salientar que o erro é um fator que pode ser corrigido, enquanto a incerteza deve estar sempre presente com o resultado da medição.

Como é espectável, a incerteza depende de diversos fatores, tais como o operador que realiza a medição, a definição incompleta da mensuranda (na formulação do modelo matemático), amostragem não representativa, mau conhecimento da influência das condições ambientais, erros de leitura, entre outros.

Existem várias distribuições probabilísticas para qualificar o erro de cada fator que influencia na calibração ou medição, são por exemplo a distribuição do Tipo A e Tipo B, sendo que as do tipo B podem ser normais, retangulares ou triangulares. (EA-4/02 M: 2013, 2013)

A incerteza de tipo A resulta da determinação baseada na análise estatística de uma série repetida de medições, sendo o desvio-padrão o parâmetro calculado em termos de análise estatística.

A incerteza de tipo B, pelo contrário, não resulta da análise estatística, mas sim pelos conceitos científicos. Para estimar esta incerteza é necessário levar em consideração todas as informações disponíveis que estejam relacionadas à qualidade do resultado da medição, dependendo fundamentalmente da experiência do operador, da sua intuição e do seu conhecimento que vem acumulando sobre equipamentos e procedimentos de medição. (Sousa, 2010)

Para se determinar a incerteza do tipo A é obrigatório existir uma dispersão de valores proveniente de uma série de medições. A estimativa dos valores medidos para uma determinada grandeza X_i corresponde à média aritmética.

A incerteza-padrão do tipo A toma uma distribuição gaussiana e é calculada pela raiz quadrada da divisão entre o desvio padrão ao quadrado pelo número de medições realizadas, como mostra a seguinte expressão matemática.

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (19)$$

n = Número de medições realizadas

Como já aqui foi abordado, quanto à incerteza do tipo B existem distribuições normais, retangulares e triangulares.

A distribuição normal (B-N) está associada ao certificado de calibração. Todos os padrões de referência têm sempre uma incerteza de medição associada. Esta incerteza não é possível ser melhorada, sendo que na realidade até é piorada.

Esta incerteza pode ser também definida em dados de medições anteriormente realizadas, em especificações de fabricantes e até mesmo em manuais.

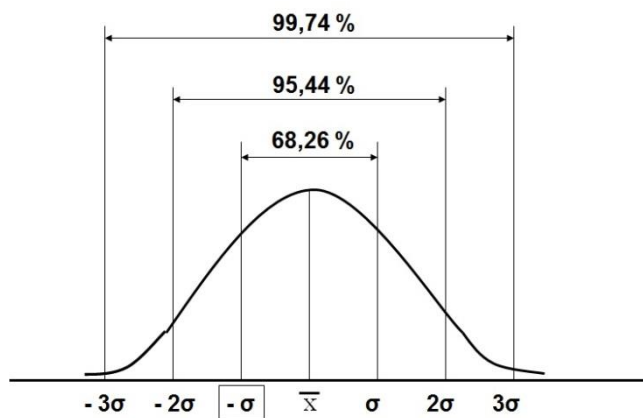


Figura 29 - Gráfico da distribuição do tipo B-N

No certificado de calibração do equipamento, a incerteza expandida é apresentada pelo U dada por exemplo por $U = \pm L$, onde L corresponde a qualquer mensuranda.

A incerteza expandida consiste na multiplicação da incerteza associada pelo coeficiente de expansão para um nível de confiança de 95 %, onde na maioria dos casos corresponde a $k = 2$. A seguinte fórmula é utilizada para descrever a incerteza do tipo B-N:

$$u(x) = \frac{U}{k} \quad (20)$$

A distribuição do tipo B retangular (B-R) é usada para definir a maioria dos fatores que interferem com a qualidade do resultado final, por exemplo a resolução do equipamento, a temperatura, os erros de Abbe e de cosseno, a deriva do equipamento calibrador, entre outros fatores.

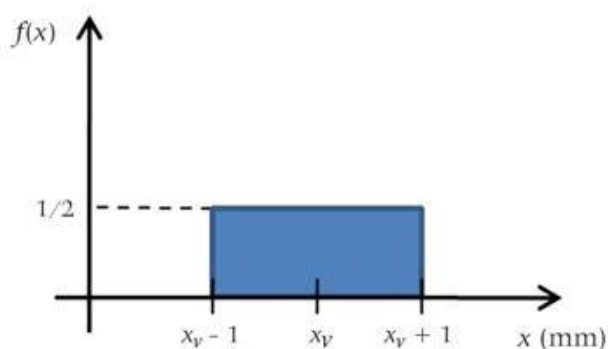


Figura 30 – Gráfico da distribuição do tipo B-R

Trata-se de uma distribuição em que qualquer valor pode ocorrer com igual probabilidade no intervalo definido.

Neste caso é utilizada a seguinte fórmula para calcular a incerteza do tipo B-R:

$$u(x) = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}} \quad (21)$$

a_+ = limite máximo da incerteza

a_- = limite mínimo da incerteza

A distribuição do tipo B triangular (B-T) deve ser escolhida quando os factos existentes levam a crer que a distribuição dos valores está mais concentrada no valor central, ao contrário da retangular, como é visível na seguinte figura (Figura 31).

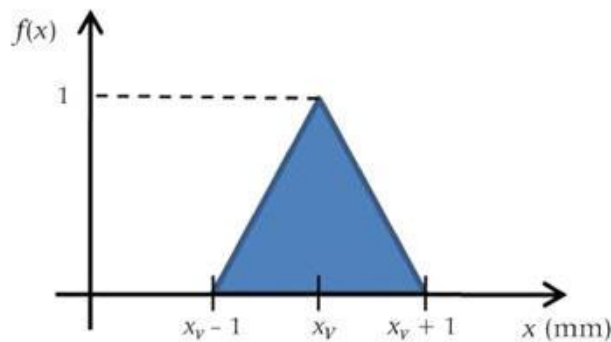


Figura 31 - Gráfico da distribuição do tipo B-T

A fórmula seguinte representa a incerteza do tipo B-T:

$$u(x) = \sqrt{\frac{a^2}{6}} \quad (22)$$

a = intervalo completo da incerteza

2.7 Determinação da incerteza expandida

Depois de definir o modelo matemático, de fazer uma possível correção do resultado, de enumerar as possíveis fontes de incerteza inerentes à medição e calcular as incertezas padrão para cada uma delas, é necessário calcular os valores do coeficiente de sensibilidade também de cada fonte de incerteza. Para tal é importantíssimo que o modelo matemático esteja bem definido pois irá ser através desse modelo que se calcula o coeficiente de sensibilidade.

O coeficiente de sensibilidade é calculado através do cálculo diferencial, ou seja, através de derivadas parciais.

Por exemplo, se se estivesse a falar de medir a velocidade através de um cronómetro e um transdutor de deslocamento, os coeficientes de sensibilidade seriam calculados da seguinte forma:

$$v = \frac{d}{t} \quad (23)$$

v = Velocidade, m/s

d = Distância percorrida, m

t = Tempo de decorrido, s

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{1}{t}$$

$$\frac{\partial v}{\partial d} = -\left(\frac{d}{t^2}\right) \quad (24)$$

Por fim bastaria substituir as variáveis pelo resultado da medição de cada um dos fatores.

Além dos coeficientes de sensibilidade existem também os coeficientes de liberdade associados a cada fator da incerteza. Estes coeficientes ilustram a confiança que existe no valor apresentado para determinada incerteza. Quando se trata de uma incerteza do tipo A, os graus de liberdade são calculados através de n-1, onde n é o número de medições efetuadas. Para as restantes o valor é arbitrário tendo de ser um valor responsável (normalmente é atribuído o valor 50).

Por fim têm de ser determinados por estimativa os graus de liberdade efetivos, V_{eff} , através da fórmula de Welch- Satterthwaite, como se verifica na seguinte fórmula:

$$V_{eff} = \frac{u(y)^4}{\sum_{i=1}^N \frac{C_i^4 * u_{xi}^4}{n-1}} \quad (25)$$

u(y) = Incerteza combinada

n = Número de medições realizadas

Através do coeficiente de liberdade efetivo é agora possível saber o valor do fator de expansão k, a partir da tabela t-student, como se pode ver na tabela seguinte, ou calculado através de uma folha de cálculo (Excel ou similar) com a fórmula =TINV(0,0455 ; V_{eff}).

Tabela 2 – Diversos valores de k (coeficiente de expansão)

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Tendo em conta todas estas fontes de incerteza, é necessário avaliar a incerteza de medição (incerteza expandida). Para isso, é normal realizar um quadro com um balanço de incertezas, quadro esse que contém todas as fontes de incerteza usadas para o cálculo final (Tabela 3).

Tabela 3 – Balanço de Incertezas

<i>Fonte de incerteza</i>	<i>Tipo</i>	<i>Incerteza Padrão $u(x_i)$</i>	<i>Coefficiente de sensibilidade (C_s)</i>
<i>Repetibilidade</i>	A	$u_1 = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$	1
<i>Resolução do equipamento</i>	B-R	$u_2 = \sqrt{\frac{1}{12 * Res^2}}$	1
<i>Erro de Abbe</i>	B-R	$u_3 = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$	1
<i>Erro de Cosseno</i>	B-R	$u_4 = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$	1
<i>Death path</i>	B-R	$u_5 = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$	1
<i>Deriva do padrão</i>	B-R	$u_6 = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$	1
<i>Especificação do fabricante</i>	B-R	$u_7 = \sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$	1
<i>Incerteza do certificado</i>	B-N	$u_8 = \frac{U}{k}$	1

s – Desvio padrão

n – Número de leituras efetuadas

Res – Resolução do equipamento que é submetido à calibração

a_+ - Valor positivo do erro associado à fonte de incerteza

a_- - Valor negativo do erro associado à fonte de incerteza

U – Incerteza do certificado de calibração do laser padrão

k – Ver certificado de calibração

Após a substituição de todos os parâmetros presentes na Tabela 3 – Balanço de Incertezas, é necessário determinar a incerteza padrão combinada, de forma a determinar a incerteza expandida (que já foi aqui abordado).

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (u_i * C_i)^2} \quad (26)$$

3 CAPÍTULO III

Componentes do Projeto

Este capítulo remete para as bases da implementação do projeto de calibração automática de medidores de distâncias laser. Os pilares do trabalho são a detecção de caracteres, a motorização da bancada de calibração e interligação de todos os componentes.

3.1 Detecção de caracteres (OCR)

A detecção e reconhecimento de caracteres, também conhecido pelo acrônimo OCR (em inglês, *Optical Character Recognition*) consiste na interpretação de caracteres, sejam eles de cariz alfabético, numérico ou com caracteres especiais, convertendo a imagem original para a forma digital de forma que possa ser utilizada nesse formato.

O OCR existe desde 1950 quando Louis Tordella e David Shepard, com a ajuda de Harvey Cook iniciaram o desenvolvimento desta ferramenta para uma das maiores, senão a maior, agência de segurança nacional do mundo – a NSA (em inglês, *National Security Agency*) – dos Estados Unidos da América. Esta ferramenta tinha como principal função a automatização de dados, visto que um dos problemas encontrados na NSA era o fluxo excessivo de dados, tornando quase impossível a inserção dos dados manualmente. (Mori, Nishida, & Yamada, 1999)

Para este projeto foi necessário desenvolver e direcionar esta ferramenta para a detecção de dígitos provenientes do display de cristais líquidos dos medidores laser a calibrar, de forma a poder utilizar os dígitos lidos e inserir automaticamente numa tabela específica.

O OCR foi desenvolvido na *toolkit* de Visão Artificial do *software* da National Instruments – LabVIEW. Para isso foi necessário aplicar diversos tratamentos à imagem de forma a obter a melhor leitura dos dígitos, já que irá funcionar automaticamente.

Na Figura 32 encontram-se todos os passos desde a imagem original obtida até à imagem tratada para a leitura dos dígitos.

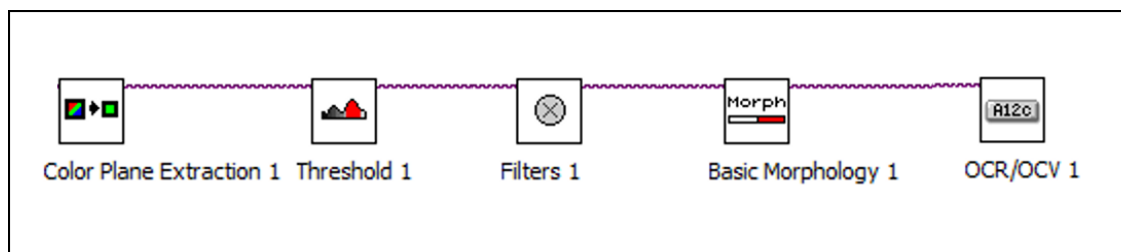


Figura 32 – Fluxograma do processo de reconhecimento de caracteres desde a imagem original.

Em primeiro lugar, é usada a extração de um plano (no LabVIEW, *Color Plane Extraction*) da imagem original em RGB, convertendo a imagem em tons de cinzento, como se verifica na imagem seguinte.

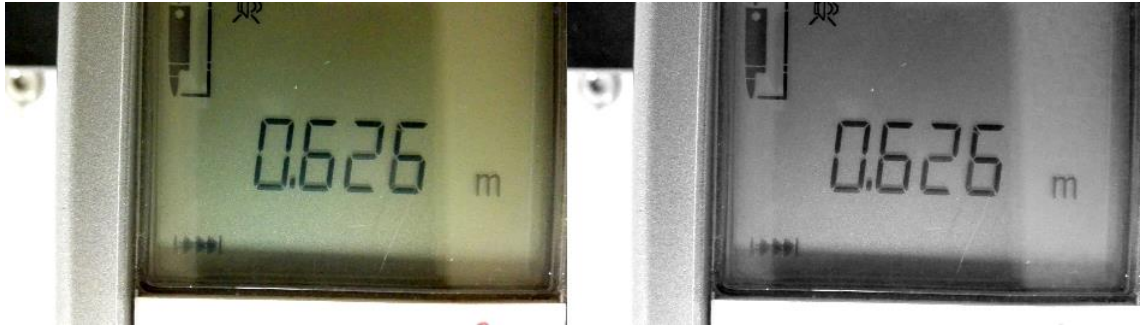


Figura 33 – Lado a lado as imagens do display do EDM. À esquerda a imagem original e à direita a mesma imagem convertida para tons de cinzento.

Em seguida é realizado um *threshold* Niblack que determina um patamar onde todos os valores dos pixéis acima passam a 0 (preto) e tudo abaixo passa a 1 (branco), ou vice-versa, consoante o que o utilizador necessitar. Para perceber melhor, pode-se analisar a Figura 34 retirada do *software* utilizado.

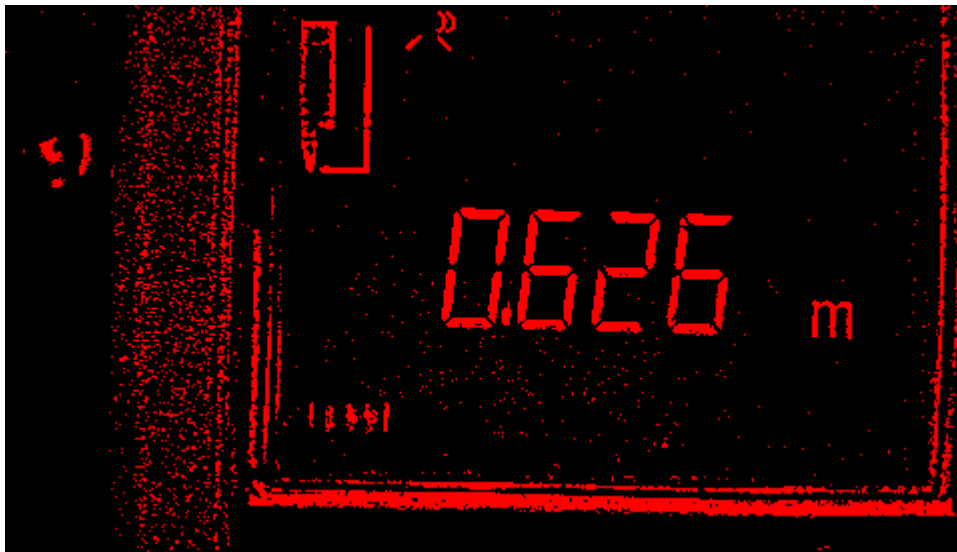


Figura 34 – Imagem binarizada. A cor vermelha serve só para efeitos de *software*.

Para a remoção de todos os elementos que possam induzir em erro a leitura dos dígitos, foi definido um filtro passa-baixo, limpando a imagem, como ilustrado na Figura 35.

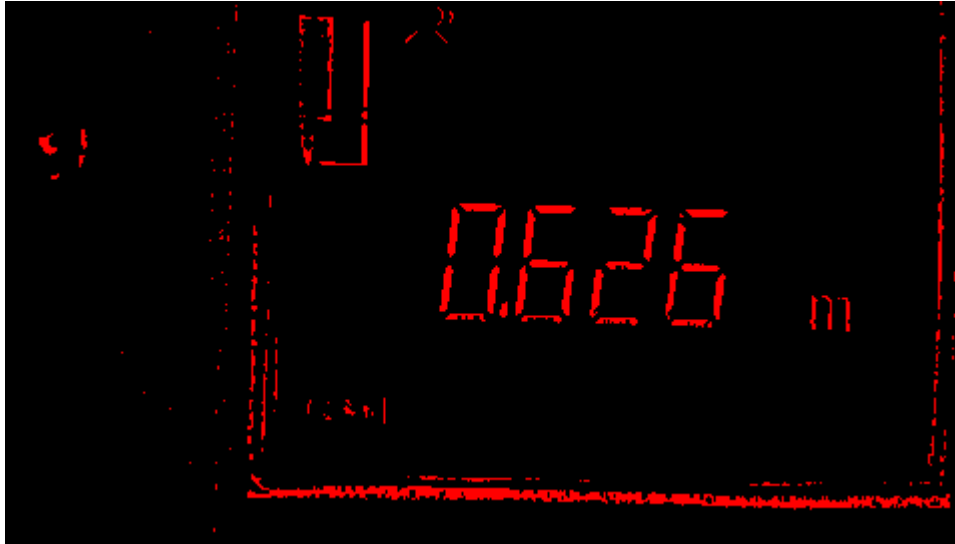


Figura 35 – Imagem binarizada depois da utilização do filtro passa-baixo.

A Morfologia Básica (*Basic Morphology*) é o terceiro passo e tem muitos usos, contudo, para este caso em específico é utilizado para dilatar todos os pixels ativos (os que estiverem com o valor 1), preenchendo todos os buracos entre os dígitos, possibilitando uma maior eficiência na altura de reconhecer os números (Figura 36).

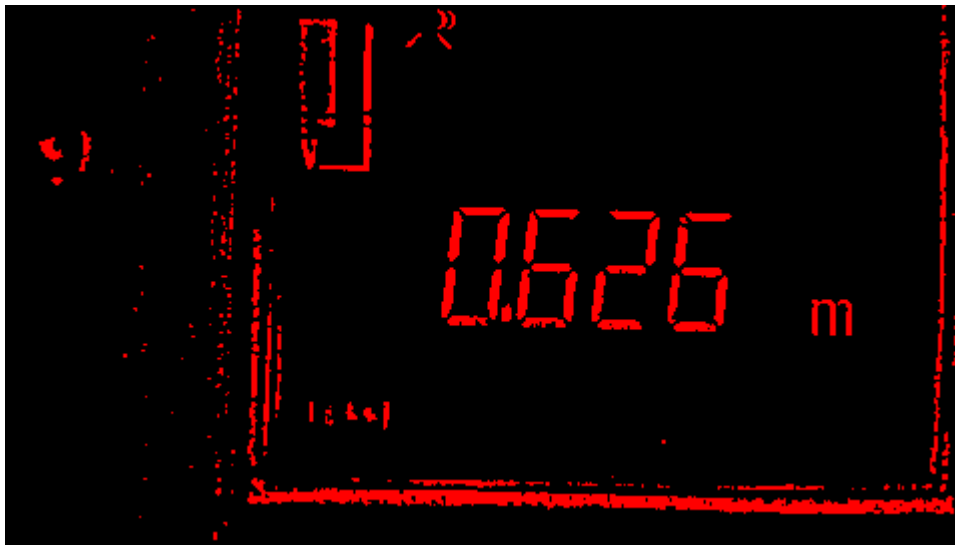


Figura 36 – Imagem binarizada depois da dilatação dos pixels.

Depois de obter a imagem completamente tratada, o utilizador deve ser capaz de seleccionar a área dos dígitos com recurso a um retângulo que faz parte do *software* do LabVIEW (Figura 37).

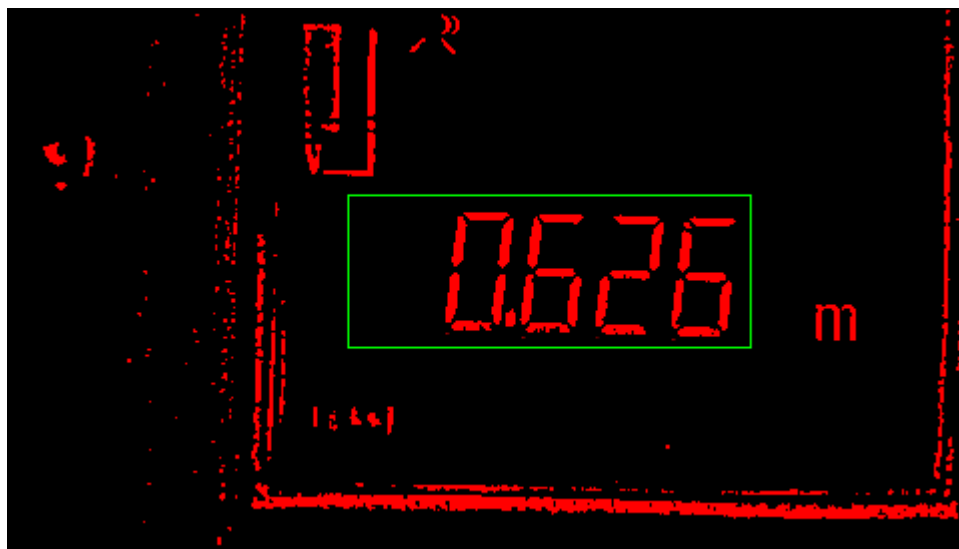


Figura 37 – Retângulo verde, definido pelo utilizador, que envolve a área dos dígitos.

O utilizador, ao seleccionar a área pretendida está a indicar ao *software* para analisar apenas aquela área, identificando os dígitos previamente “ensinados”, como revela a imagem seguinte.

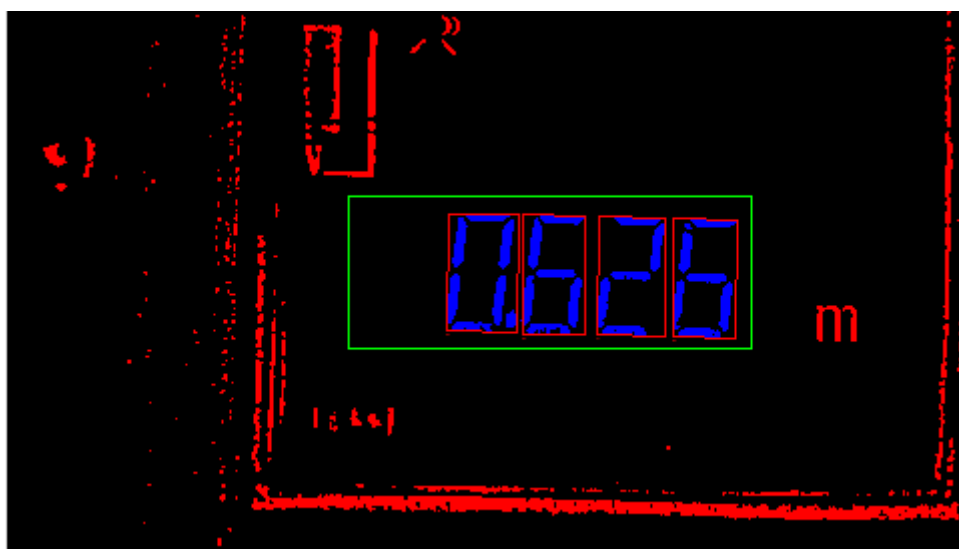


Figura 38 – Deteção dos dígitos na imagem binarizada.

Na imagem da Figura 38 pode verificar-se que a azul estão os dígitos que o algoritmo detetou e reconheceu como 0626.

Quanto à performance do algoritmo, o OCR encontra-se a funcionar em perfeitas condições, visto que apresenta uma taxa de sucesso nos 100%, como se verifica na tabela seguinte.

Tabela 4 – Performance do algoritmo do OCR

<i>Dígitos</i>	<i>Exatidão do Dígito (%)</i>	<i>Taxa de Erro do Dígito (%)</i>
0	100	0
1	100	0
2	100	0
3	100	0
4	100	0
5	100	0
6	100	0
7	100	0
8	100	0
9	100	0

Estes valores foram determinados através de sucessivas leituras de cada dígito verificando o valor se estaria correto ou errado. Cada caracter foi analisado 100 vezes, em posições diferentes, luz e contraste diferente e focagem diferente. De acordo com os resultados, pode-se afirmar que apenas por motivos alheios à calibração os valores apresentados poderão não corresponder à verdade.

Para a captação de imagem foi decidido incluir uma câmara capaz de filmar e transmitir dados em tempo-real sem recurso a fios para um computador. Verificou-se existirem no mercado várias câmaras sem fios que executam essa função primária (Figura 39).



Figura 39 – Câmara wifi da SPCLOUD.

A escolha para implementar neste projeto foi a câmara Mini wifi HD da marca SPCLOUD devido às suas características na execução da sua função. Na tabela seguinte pode-se observar as principais características da câmara escolhida.

Tabela 5 – Características da câmara referida

<i>Características</i>	<i>Descrição</i>
Wifi	Sim
Pixel	1.3 MP
Objetiva Angular	120 °
Taxa de aquisição	30 <i>frames per second</i>
Anti-Shake	Sim
Resolução do vídeo	720p (1280 x 720)
Formato do vídeo	MPEG
Tensão de funcionamento	5 V
Bateria	Sim (+- 90 minutos)
Peso	50 g

As vantagens do uso desta câmara em particular é o facto de não ser necessário o uso de fios pois possui bateria e transmite o vídeo por wifi, o facto de ser leve pesando apenas 50 gramas. Como se pode ver na Figura 40, a câmara é fixada no ponto 2 e o medidor laser que está a ser calibrado no ponto 1.

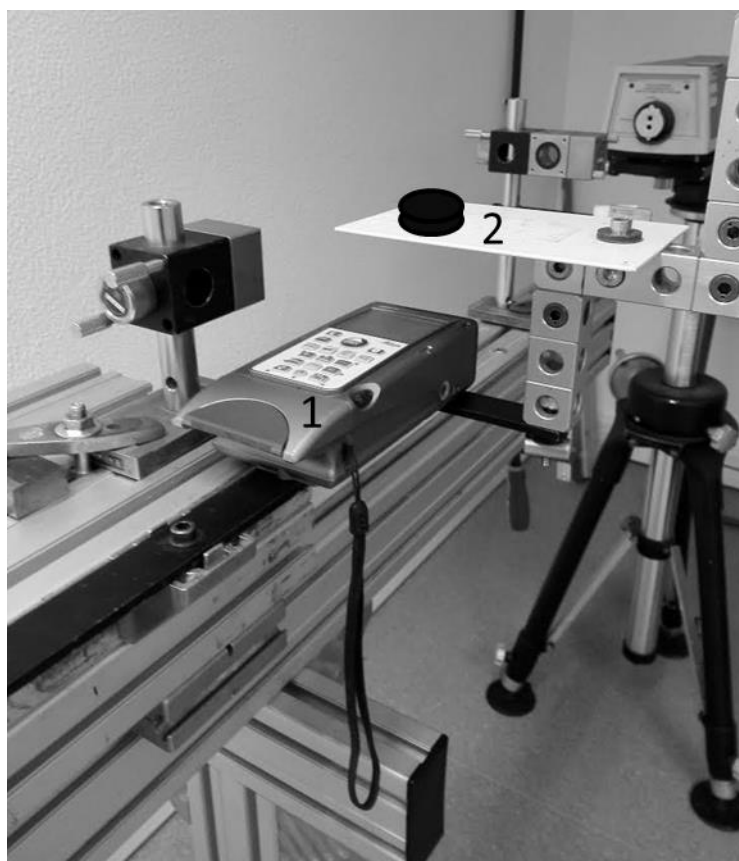


Figura 40 – Protótipo do suporte do medidor de distâncias, À esquerda (1) está o EDM a calibrar. À direita (2) encontra-se a câmara wifi fixa numa base.

O conceito deste tipo de câmara é poder visualizar e transmitir via wireless o vídeo, através do router para um ou mais computadores, acedendo a um link fornecido pelo software da câmara, como o esquema da Figura 41 sugere.

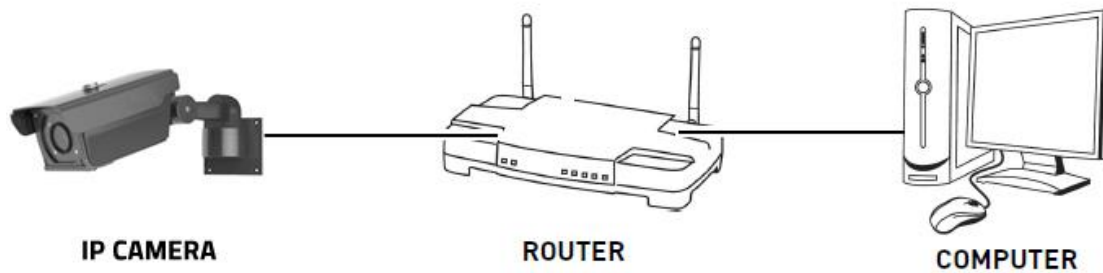


Figura 41 – Representação esquemática das ligações envolvidas na ligação entre a câmara e o computador.

Dependendo do tipo de câmara é possível programa-la previamente ao nível da luz, contraste, focagem, bem como podem integrar áudio e também possuir memória interna ou externa de forma a gravar uma cópia do que é transmitido para o computador. Basicamente, ao iniciar a gravação da câmara é gerado um link com um IP dedicado, que através do software do LabVIEW é possível aceder a esse mesmo IP (isto se estiverem ligados à mesma rede wifi) e visualizar em tempo-real o *stream* do vídeo.

O sistema constituído pela câmara e pela ligação sem fios é bastante importante devido à velocidade de transmissão, ou seja, se a taxa de aquisição da câmara for baixa pode-se cometer o erro de ultrapassar o ponto de calibração necessário. A qualidade da ligação sem fios também é importante pelo mesmo fator, a ultrapassagem do ponto de calibração. Este tipo de erro parece inofensivo mas se nos pontos de calibração ao longo da série isso acontecer, os tempos de calibração aumentam e por isso a eficiência do processo também.

3.2 Motorização da bancada de calibração

O ponto crucial deste projeto é sem dúvida o movimento do carro móvel ao longo de uma bancada de medição de cerca 10 metros. Quando se fala em movimento a palavra que surge imediatamente após é motor.

Um motor é um mecanismo que é capaz de converter outras formas de energia em energia mecânica, realizando movimento para fazer deslocar algo.

Desde sempre que a humanidade tentava facilitar o trabalho recorrendo a motores, fossem através da água, do vento, do vapor, etc. Atualmente existem motores elétricos, de combustão, híbridos, de ar comprimido, entre outros. (Stephen, 2009)

Neste projeto o uso de motor elétrico é fundamental quer devido à sua facilidade de implementação, mas também quanto à poluição e ruído.

Como o próprio nome indica, um motor elétrico converte energia elétrica em energia mecânica. Este tipo de motor é bastante eficiente e também possui baixo custo de implementação.

Para o controlo de movimento do carro que se encontra na banca de medição recorreu-se a um motor eléctrico de corrente contínua (motor DC) por apresentar vantagens quanto à sua implementação, como serão referidas no ponto seguinte.

Conhecendo as características do sistema, é possível efetuar os cálculos para saber o binário necessário para o motor funcionar de acordo com o esperado.

Sabe-se que o carro que se vai fazer deslocar tem uma massa de aproximadamente 3,5 kg sobre uma superfície horizontal de aço com duas polias de 10 cm de diâmetro – uma no motor e outra no fim da bancada para retorno.

Possuindo estes dados, pode-se calcular qual o binário que o motor terá que aplicar através da seguinte fórmula: (Nave, 2016)

$$\tau[Nm] = m[kg] \times \mu \times \frac{d}{2} [m] \quad (27)$$

$$m = 3,5 \text{ kg}$$

$$\mu \text{ aço} = 0,7$$

$$d \text{ polia} = 10 \text{ cm}$$

Aplicando as variáveis à equação anterior obtém-se um binário de 0,12 Nm, onde por razões de segurança ampliou-se o valor para 0,15 Nm de forma a garantir o seu pleno funcionamento, visto que não estão a ser contabilizadas as massas das polias e da corrente de transmissão.

O motor usado para o efeito foi o NEMA GM42BLFZ devido às suas características no que respeita ao binário necessário para mover o carro ao longo de 10 metros, como já vem sido dito.



Figura 42 – Motor eléctrico DC NEMA GM42BLFZ

Este é um motor de 24 volts e possui um binário de 0,2 Nm em condições normais, pois em condições mais adversas, ou seja, quanto mais carga for colocada no carro, faz com que seja mais difícil para o motor manter a velocidade desejada, tendo o nome de *stall torque* (binário de paragem em português). Nesse aspeto, o motor tem vantagem pois aguenta até 0,3 Nm, ao contrário de outros motores DC, tais como o NEMA 11 e o NEMA 13, onde ambos perdem em termos de força de inércia e binário de paragem (*stall torque*).

Depois de escolhido o motor a usar é necessário conectá-lo a algo de modo que possa ser programado da maneira que o utilizador pretende, como será abordado mais à frente. Para isso foi

utilizado uma placa de circuito da marca Arduino. A placa Arduino consiste numa placa com várias entradas e saídas tanto analógicas como digitais de forma a serem utilizadas de forma mais simples. Esta placa conta também com um microcontrolador no qual permite a programação da placa. A programação é feita através do *software* específico da marca Arduino – o Arduino IDE – na qual é escrito em JAVA. (Arduino Portugal, 2016)

Uma das inúmeras vantagens é o facto de poder ser interligado com o LabVIEW, permitindo usufruir da interface gráfica do LabVIEW como única interface para o utilizar. É assim possível visualizar a aquisição dos dados em tempo-real e toda a vasta personalização disponível sendo ainda possível a programação gráfica através da utilização de um *toolkit* da *National Instruments*. Através deste *toolkit* consegue-se alimentar diretamente o Arduino com código desenvolvido no LabVIEW, sendo convertido automaticamente para Arduino IDE.

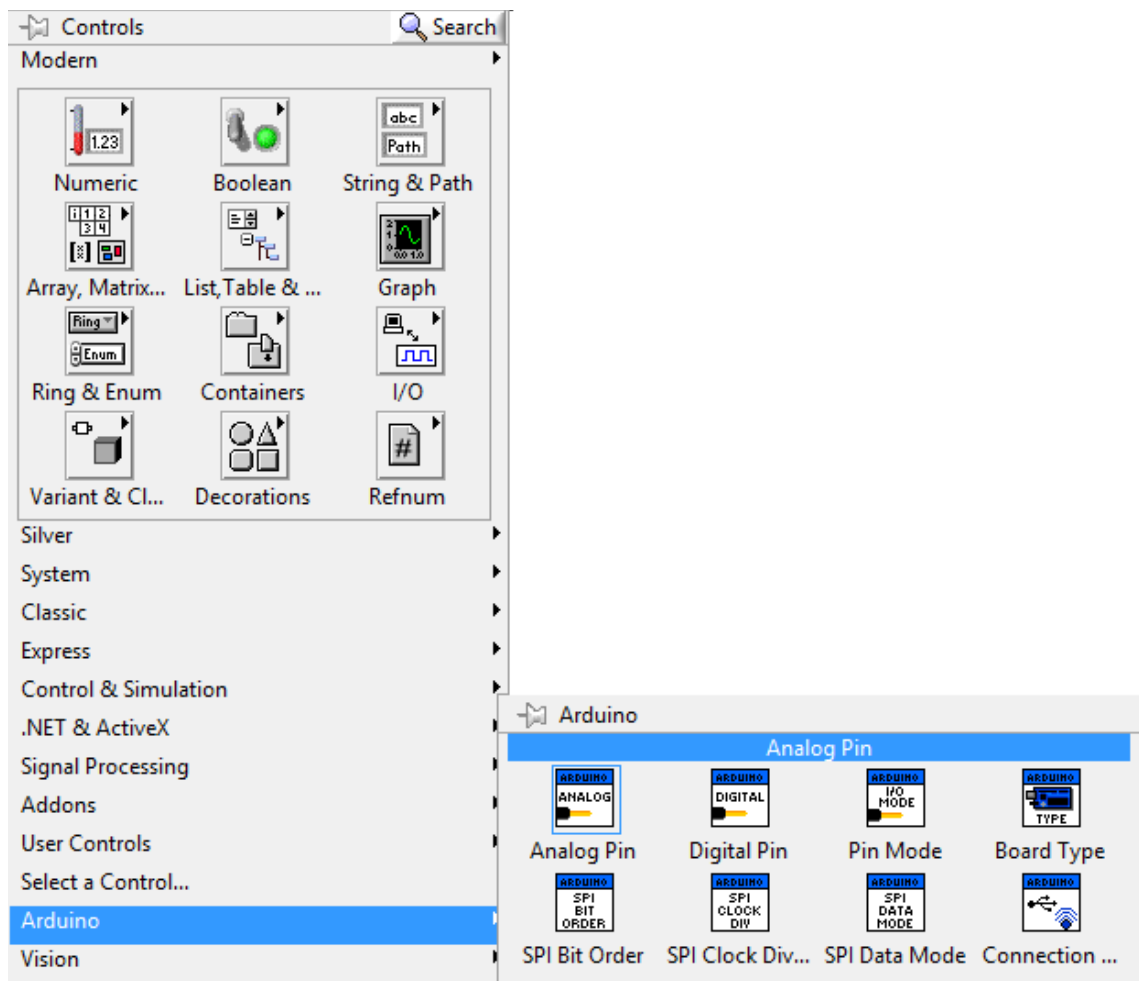


Figura 43 – Exemplo da integração do Arduino com o Labview com recurso a uma biblioteca específica.

Para a implementação deste sistema foi ainda necessário o uso de uma ponte em H para controlo do motor, pois permite a inversão de sentido do mesmo (L293D) e uma fonte de alimentação de 24 V que alimenta o motor (Figura 44).

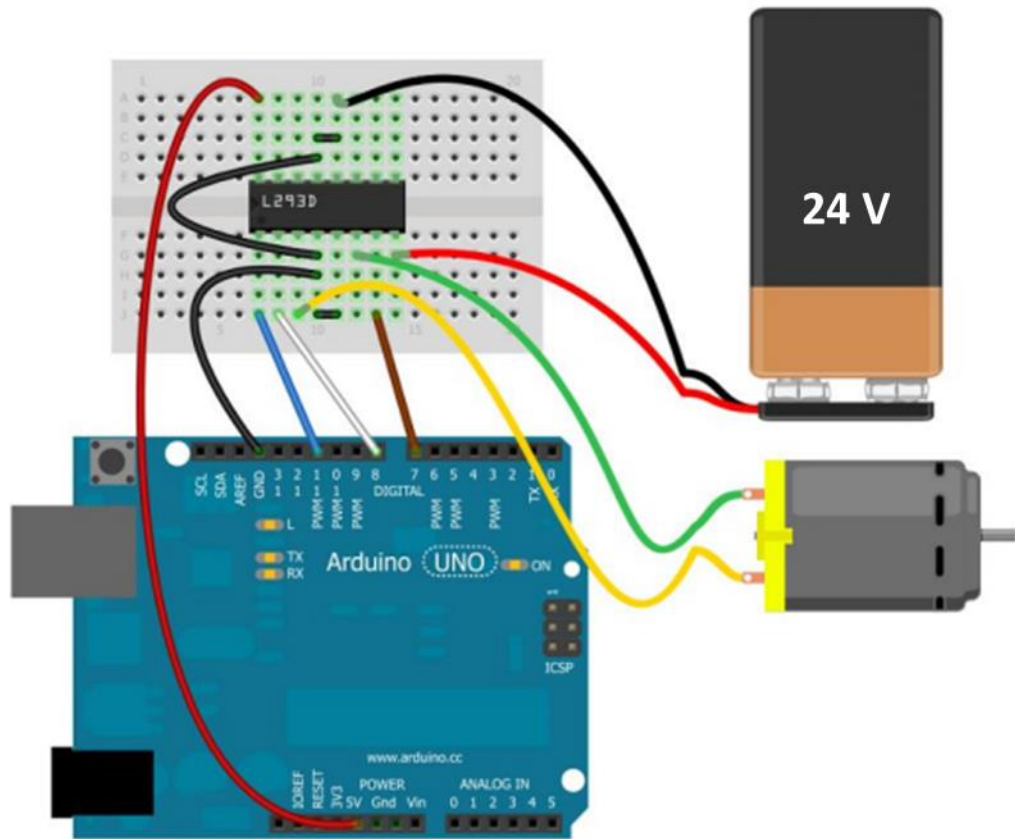


Figura 44 – Esquema representativo das ligações efetuadas entre o motor e o Arduino

As ligações que controlam o sentido do motor são as saídas 7 e 8, onde se uma estiver ativada (1) a outra está desativada (0) e vice-versa se for necessário alterar o sentido de deslocamento. Se ambas as saídas estiverem ativadas ou desativadas ao mesmo tempo o motor simplesmente não funciona.

A ligação que controla a velocidade do motor (pino 11) é uma saída PWM o que permite adaptar a velocidade pretendida para aquela que for necessária. A saída PWM, do inglês: *Pulse Width Modulation*, consiste numa técnica usada em sistemas digitais, permitindo manter a frequência e variar o tempo que a onda fica no nível lógico alto (valor máximo da tensão), ou seja, controla a tensão de saída de acordo o *duty cycle*. (Souza, 2016):

$$V_{out} = \left(\frac{duty\ cycle}{100} \right) \times V_{cc} \quad (28)$$

V_{out} = Tensão de saída em V (tensão de alimentação do motor)

Duty cycle = Valor do ciclo do PWM em %

V_{cc} = Tensão de alimentação em V

3.3 Programação

A programação da interface final é um dos componentes mais importantes no que diz respeito à finalização da implementação, pois todos as componentes necessitam de interagir em sintonia. Por exemplo, a detecção dos dígitos precisa de estar em sintonia com comparação entre os pontos de calibração para que quando o valor lido for igual ao ponto de calibração, seja dada informação para que seja lido o valor do padrão e conseqüentemente guardado automaticamente o valor na tabela.

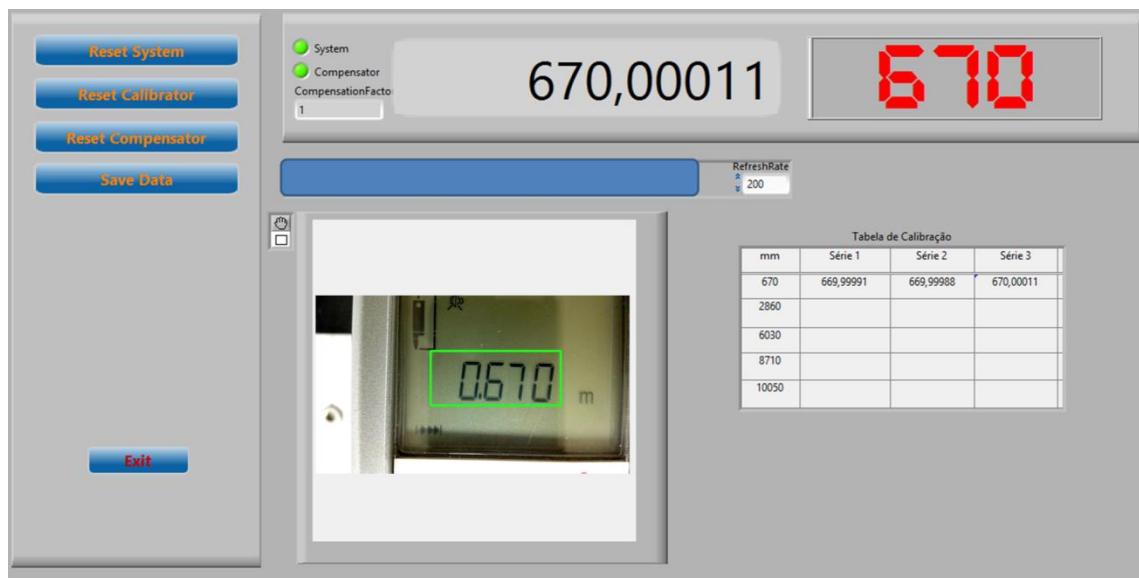


Figura 45 – Painel frontal desenvolvido para a calibração de um EDM – Exemplo para o ponto 670 mm.

Na figura anterior pode-se verificar a interface entre o *software* e o utilizador, onde aparecem todas as variáveis indispensáveis à calibração de medidores de distâncias laser.

Do lado esquerdo encontram-se os botões de *reset* de sistema, do calibrador e do compensador atmosférico. O *reset* do sistema, como o próprio nome indica, reinicia todo o processo. O *reset* do calibrador reinicia a contagem de franjas, tornando o valor inicial de deslocamento em 0 mm. Por último, o *reset* do compensador reinicia a compensação atmosférica.

Em cima pode-se verificar dois conjuntos de algarismos, um com dígitos pretos e outro com dígitos vermelhos. Os dígitos pretos correspondem ao valor lido pelo laser padrão de referência, enquanto que o conjunto dos dígitos vermelho corresponde ao valor lido pelo OCR.

A meio da figura encontra-se o vídeo em tempo real obtido pela câmara wifi do *display* do medidor de distâncias a calibrar, podendo ser necessário o técnico ir controlando os valores também em tempo-real.

Acima da imagem do vídeo em tempo-real pode verificar-se um indicador do tipo *slide* que indica ao utilizador, durante toda a calibração, incluindo a fase de inicialização da mesma, o estado do alinhamento entre o laser padrão e o retrorefletor que se encontra no banco móvel. A indicação está em percentagem (%).

Do lado direito encontra-se uma tabela onde são guardados os valores do laser padrão de referência, apenas quando os valores entre o ponto de calibração e o valor lido pelo OCR são iguais.

4 CAPÍTULO IV

Em relação aos resultados obtidos na elaboração desta dissertação convém salientar que o projeto não foi “totalmente” terminado visto que não foi implementado no laboratório em questão, no entanto, as bases para a sua implementação já estão estudadas e definidas como se verificou no desenvolvimento deste relatório.

Mesmo que não tenha sido implementado, não existem resultados finais, contudo, era espectável que os resultados tivessem seguido um caminho favorável, visto que o que dificultou a implementação foi a motorização do banco móvel.

Os resultados em relação à detecção de caracteres foram bastante satisfatórios visto que todos os dígitos estão a ser reconhecidos e não obtiveram nenhuma falsa leitura durante a fase de testes, como se pôde verificar na Tabela 4 – Performance do algoritmo do OCR.

Os resultados em relação à programação são de igual forma satisfatórios pois, neste momento, é possível a interligação entre a câmara wifi, o motor e o padrão de referência.

Em relação aos resultados da motorização, apesar de não ter sido implementado (a única razão de não existirem resultados finais) foram realizados testes com um outro motor DC apenas para esse efeito. É de referir que neste momento a ligação a outro motor está facilitado pois o algoritmo capaz de conectar a placa Arduino, ao motor e ao LabVIEW já está concluído e a funcionar.

4.1 Conclusões

Pela observação dos aspetos analisados até então, é-se levado a acreditar que todo este sistema de calibração automático é realmente um *game changer* no que diz respeito à forma de calibrar medidores de distâncias eletrónicos, pois hoje em dia, existe uma panóplia de ferramentas que estão disponíveis no mercado que permitem a sua interligação com outras áreas envolvidas, como se pode constatar neste mesmo projeto, como foi o caso da ligação entre a visão artificial (através da elaboração de um OCR), da mecânica (escolha de um motor suficientemente capaz para mover um banco móvel ao longo de uma bancada de medição de 10 metros) e também da programação (pois é crucial que exista um perfeito sincronismo e interação com todas as áreas abordadas).

Se estas diferentes áreas não fossem agrupadas e trabalhadas como um todo não seriam aproveitadas e exponenciadas da forma que aconteceu neste projeto.

Até ao momento existem alguns sistemas de medição parecidos com o sistema que o CATIM quer implementar, contudo, de todos os sistemas que existem no mercado, nenhum é utilizado para registar pontos ao longo de 10 metros, sendo por isso um sistema de calibração de EDM pioneiro.

Esta alteração de paradigma na forma como a calibração de medidores de distâncias eletrónicos torna alcançável uma melhor forma e mais eficiente no que respeita à confiança dos clientes que usufruem deste serviço prestado pelo CATIM, pois apesar deste sistema não fazer diminuir os custos de calibração, tem como consequência uma diminuição do tempo de calibração e por conseguinte uma maior qualidade na apresentação de resultados, evitando possíveis erros de digitação de valores. Este sistema não fará diminuir os custos de calibração, mas sim diminuir o tempo de calibração e por consequência diminuir o tempo de resposta dada ao cliente

Em suma, penso que este projeto permitiu ao CATIM elevar um pouco mais a sua inovação tecnológica podendo alastrar-se a outras áreas que necessitem também de *upgrades*, fazendo jus ao nome da instituição, pois sendo um Centro de Apoio Tecnológico, não faria sentido se não estivesse na vanguarda da calibração.

4.2 Trabalho futuro

No futuro, este projeto pode ser melhorado de forma a automatizar ainda mais o processo de calibração, por exemplo promover o alinhamento automático do medidor a calibrar antes de cada calibração. Visto que este fator pode ser um *bottle neck* no nosso serviço, faria sentido ajustar este mecanismo e assim melhorar mais um pouco o tempo de resposta ao cliente.

Outro ponto importante a ser melhorado é a emissão do certificado logo após a calibração. Esta melhoria seria bem-vinda visto que o sistema poderia estar ligado com a base de dados do CATIM e assim preencher os dados do cliente diretamente no certificado.

BIBLIOGRAFIA

- A ACREDITAÇÃO. (11 de 09 de 2016). Obtido de IPAC: <http://www.ipac.pt/ipac/funcao.asp>
- Antunes, C. (1995). *Levantamentos Topográficos*. Lisboa.
- Arduino Portugal. (11 de 11 de 2016). *Arduino*. Obtido de Arduino Portugal: <http://www.arduinoportugal.pt/arduino/>
- Bader, O., & Lui, H. (15 de 10 de 1996). *Laser Safety and the Eye: Hidden Hazards and Practical Pearls*. Obtido de Lions Laser Skin Centre: <http://www.dermatology.org/laser/eyesafety.html>
- Barat, K. (2006). *Laser Safety Management*. Taylor & Francis.
- CATIM. (15 de 07 de 2015). *História*. Obtido de CATIM: <http://www.catim.pt/index.php?run=Historia>
- Centro Integrado de Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade. (s.d.). *Conceito de Metrologia*. Porto Alegre.
- Como funcionam os foto-diodos (ART1181)*. (02 de 11 de 2016). Obtido de Instituto Newton C. Braga: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4715-art1181>
- Diário da República: I série, N. 1. (2002). Decreto-Lei n.º 163/2002 de 11 de Julho.
- EA-4/02 M: 2013. (2013). Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
- Elias, B. (2005). Lasers Aimed at Aircraft Cockpits: Background and Possible Options to Address the Threat to Aviation Safety and Security. *CRS Report for Congress*.
- F, S. (27 de 11 de 2015). *O Metro: 30 anos da definição atual*. Obtido de IPQ: http://www1.ipq.pt/PT/IPQ/historico_eventos/Documents/Palestra%2030%20anos%20metro_v1.pdf
- Filipe, E., Pellegrino, O., Baratto, A. C., de Oliveira, S. P., & Mendoza, V. M. (2012). *Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais* (1º ed.).
- Fowler, M. (26 de 05 de 2016). *The Speed of Light*. Obtido de UVa Physics Department: <http://galileoandstein.physics.virginia.edu/lectures/spedlite.pdf>
- Gutiérrez, J. M. (2012). *Utilización de Labview para la Visualización y Control de la Plataforma Open Hardware Arduino*.
- Instituto Português da Qualidade. (06 de 06 de 2015). *Metro*. Obtido de IPQ: <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Materiais%20Didaticos/metro.pdf>
- ISO 17123-4:2012. (s.d.). *Optics and optical instruments -- Field procedures for testing geodetic and surveying instruments -- Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)*.
- Lourenço, A. (05 de 03 de 2014). *Ótica. Metrologia Aplicada II*. Porto, Portugal: ISEP.

- Ministério Do Desenvolvimento, Indústria E Comércio Exterior. (2013). Portaria nº 590, de 02 de dezembro de 2013.
- Mori, S., Nishida, H., & Yamada, H. (1999). *Optical Character Recognition* (1º ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Muñoz, B. (11 de 12 de 2015). Obtido de INMETRO: http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/510/1/2003_BarrosMun%C3%B5z.pdf
- Nave, R. (09 de 11 de 2016). *Horizontal Pulley with Friction*. Obtido de Hyper Physics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hpul2.html>
- Netto, A. V., Soares, A. L., da Silva, M. S., Otoboni, J., & Stefani, M. A. (2000). *Desenvolvimento de um Medidor de Distância a Laser*. São Paulo.
- Perez, D. (15 de 08 de 2016). *Sensores de Distância por Ultrasonidos*. Obtido de ALCABOT: <http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/Trabajos/DiegoPerezDeDiego.pdf>
- Porto Editora. (11 de 11 de 2016). *automação*. Obtido de Infopédia - Dicionário Porto Editora: [https://www.infopedia.pt/\\$automatizacao](https://www.infopedia.pt/$automatizacao)
- Reyes, M. M. (2011). Diseño e Implementación de un robot resolvidor de laberintos de paredes. Obtido de Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- RP Photonics Encyclopedia. (12 de 12 de 2015). *Time-of-flight Measurements*. Obtido de http://www.rp-photonics.com/time_of_flight_measurements.html
- Rüeger, J. M. (1996). *Electronic Distance Measurement: An Introduction* (4º ed.). Berlin: Springer.
- Schneider, M., Müller, J., Schreiber, U., & Egger, D. (09 de 04 de 2016). *Lunar Laser Ranging*. Obtido de Technische Universität München: <http://www.fesg.bv.tum.de/91872-bD1lbg~fesg~forschung~llr.html>
- Schoenknecht, E. (2010). *Medição de Distância com o uso de Laser*. Porto Alegre.
- Schulmeister, K., Püster, T., Green, M., & Henderson, R. (2001). *Handbook on Industrial Laser Safety*. Wien, Austria: Argelas.
- Segantine, P., & Silva, I. (2015). *Topografia para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática*. Elsevier.
- Sousa, C. (2010). *Cadernos Técnicos: Incertezas*. Porto.
- Sousa, C. (2010). *Cadernos Técnicos: Notas Históricas*. Porto.
- Souza, F. (02 de 02 de 2016). *Arduino - Saídas PWM*. Obtido de Embarcados: <https://www.embarcados.com.br/arduino-saidas-pwm/>
- Stephen, H. (2009). *Industrial Motor Control*. Delmar Cengage Learning.
- Torque Calculations for Gearmotor Applications*. (01 de 11 de 2016). Obtido de Precision Microdrives: <https://www.precisionmicrodrives.com/tech-blog/2013/09/23/torque-calculations-gearmotor-applications>

Universidade de São Paulo. (09 de 11 de 2016). Obtido de <http://ead.forp.usp.br/restauradora/laser/historia.html>

Universidade Federal da Bahia. (15 de 10 de 2016). *A evolução histórica e tecnológica do instrumental topográfico*. Obtido de <http://www.topografia.ufba.br/evolucao%20tecnologiatop.pdf>

Wutke, J. D. (2006). Métodos para Avaliação de um Sistema Laser Scanner.