

# Leitura e calibração de manómetros mecânicos através da visão por computador em linguagem Python

**PAULO EMANUEL COUTINHO DE SOUSA**

Novembro de 2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Física

## Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

---



---

### Leitura e calibração de manómetros mecânicos através da visão por computador em linguagem Python

Aluno: Paulo Emanuel Coutinho de Sousa Nº 1010212.

Relatório de dissertação realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Orientador: Prof. Doutor Antonio Varejão Sousa, ISEP.

Co-Orientado: Prof. Eng.º Carlos Encarnação Sousa, ISEP/CATIM

Director do curso: Eng.º Nuno Gueiral

Porto 2018

## Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu recentemente falecido pai, aos meus orientadores e a minha amiga Eng.<sup>a</sup> Conceição Rosa, ex-aluna do ISEP e recentemente mestre em Engenharia e Gestão Industrial.

## Agradecimentos

Agradecimentos a minha mãe pelo apoio incondicional, ao meu pai que já não se encontra connosco, aos meus orientadores que se revelaram verdadeiros amigos que me orientaram incondicionalmente até o finalizar a tese.

## Resumo

A metrologia assume cada vez mais um papel vital na sociedade atual, incrementando a segurança, a qualidade de vida e garantindo um melhor ambiente. Obter resultados de medições instrumentais com menor incerteza tornou-se vital na era atual. Atendendo à evolução da nanotecnologia surgiu a nanometrologia que trata do desenvolvimento e de leituras ao nível atômico. O fundamento da ciência alicerça-se em medições com incertezas cada vez mais reduzidas; neste sentido, o trabalho desenvolvido surge na necessidade de acrescentar algo de novo na melhoria das medições e no seu processo de obtenção, como a calibração/verificação de manómetros.

Utilizando a visão por computador e o cálculo automático das incertezas que afetam as medições resultantes de procedimentos automáticos, é possível libertar o fator humano no acrescento de erros experimentais durante a leitura manual. Nesse sentido têm sido dados passos algo pioneiros para uma abordagem deste tipo, aplicando-se de forma combinada sistemas eletromecânicos com câmaras de vídeo para aquisição de imagem e aplicação de software de cálculo numérico como o LabView para aquisição de dados e interpretação da posição do indicador em manómetros.

A abordagem que aqui se apresenta visa implementar uma aplicação autónoma de ferramentas proprietárias, recorrendo a ferramentas de software livre baseadas na linguagem de programação Python e nas diversas bibliotecas de desenvolvimento específicas para a área em estudo, tentando assim alcançar um elevado rigor na aquisição de medidas e processamento das incertezas inerentes a todo o processo de calibração.

O objetivo do trabalho é produzir um sistema de custos reduzidos, atendendo à necessidade de sistemas automáticos para efetuar a calibração, sobretudo quando é necessário atender à elevada quantidade de manómetros para verificar e calibrar e ao reduzido número de operadores para responder a esta elevada demanda, própria de uma sociedade que procura o rigor, a segurança, a qualidade e, por fim, o bem estar.

A metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu implementar um sistema automático para determinação das posições angulares de ponteiros em

manómetros com vista à determinação de medidas de calibração e respectivas incertezas, inerentes ao processo de calibração de manómetros.

## Abstract

Metrology increasingly assumes a vital role today, increasing safety, quality of life and ensuring a better environment. Obtaining results from instrumental measurements with less uncertainty has become vital in the current era. In view of the evolution of nanotechnology came the nanometrology that deals with the development and development and readings at the atomic level. The foundation of science is based on measurements with increasingly reduced uncertainties; in this sense, the work developed arises from the need to add something new in the improvement of the measurements and in their process of obtaining, such as calibration / checking of gauges.

By using computer vision and automatic calculation of the uncertainties that affect the measurements resulting from automatic procedures, it is possible to release the human factor in the addition of experimental errors during manual reading.

In this sense, some pioneering steps have been taken for such an approach, by combining electromechanical systems with video cameras for image acquisition and the application of numerical calculation software such as LabView for data acquisition and interpretation of the position of the indicator in manometers.

The approach presented here aims to implement an autonomous application of proprietary tools, using free software tools based on the Python programming language and the various development libraries specific to the area under study, trying to achieve a high accuracy in the acquisition of measures and processing the uncertainties inherent in the entire calibration process.

The objective of the work is to produce a low cost system, taking into account the need for automatic systems to perform the calibration, especially when it is necessary to meet the high number of gauges to check and calibrate and the small number of operators to respond to this high demand, a society that seeks rigor, safety, quality and, finally, well-being.

The methodology developed during this work allowed the implementation of an automatic system for the determination of the angular positions of pointers in gauges to determine the calibration measures and respective uncertainties inherent in the calibration process of gauges.

## Conteúdo

Dedicatória .....	2
Agradecimentos.....	3
Resumo .....	4
Abstract .....	6
Índice de Figuras.....	10
Índice de Tabelas .....	12
1. Introdução .....	13
1.1. Objetivos.....	13
1.2. Motivação .....	15
1.3. Estrutura da tese .....	16
2. Estado da Arte .....	17
2.1. Procedimento de calibração de manómetros analógicos.....	17
2.2. Visão por computador aplicada a calibração de manómetros.....	19
2.2.1 Visão por Computador/metrologia por imagem.....	19
2.3 Erros e Incertezas na calibração dos manómetros.....	23
2.3.1 Comparação entre o manómetro a calibrar e o padrão .....	23
Modelo matemático .....	24
Cálculo do erro de calibração/verificação.....	25
Cálculo da Incerteza combinada.....	25
3. Metodologia desenvolvida .....	26
3.1. Algoritmo da metodologia.....	26
3.2. Detalhes da implementação da metodologia .....	26
3.2. Modo de proceder ao nível metrológico.....	32
3.2. Descrição de um modelo experimental de calibração automática.....	33

4. Resultados.....	34
4.1. Base de dados de imagens .....	34
4.2. Alguns resultados pertinentes.....	34
4.3. Análise da melhor das abordagens implementadas .....	38
5. Conclusões.....	40
Referências .....	41
Anexos .....	43
Anexo A.....	43
Exemplo da calibração de um manómetro. ....	43
Resultados da calibração (exemplo):.....	44
Dados do processo .....	46
Incerteza Combinada.....	49
Repetibilidade: .....	49
Incerteza herdada do manómetro padrão .....	50
Cálculo da Incerteza Combinada do Manómetro.....	51
Anexo B.....	53
Código desenvolvido .....	53

## Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema do dispositivo de calibração normalmente usado em instituições acreditadas em calibração/verificação.....	24
Figura 2 - Esquema do algoritmo implementado.....	26
Figura 3 - Processo de binarização da imagem. (a) imagem original; (b) Histograma de intensidades da imagem na escala de cinzentos [0-255]; (c) imagem binarizada.....	27
Figura 4 - ROI da imagem. Resultado obtido pela transformada de Hough (a); segunda aplicação da transformada de Hough e correção para retirar o rebordo exterior do manómetro (b). .....	28
Figura 5 - Resultado obtido pela transformada de linhas aplicada diretamente à ROI.	29
Figura 6 - Resultado da transformada de linhas (b) aplicada ao esqueleto da imagem (a). .....	29
Figura 7 - Descrição da metodologia baseada em "Template matching". (a) modelo; (b) região a comparar na imagem; (c) resultado da sobreposição do modelo com a imagem. ....	30
Figura 8 - Desempenho da aplicação da metodologia baseada em "Template matching" para modelos de ponteiros com ângulos entre: (a) -60 a 240 graus; (b) -50 a -40 graus. ....	31
Figura 9 – Segunda passagem com “Template matching”. (a) modelo a -44 graus; (b) região a comparar na imagem; (c) resultado da sobreposição do modelo com a imagem. ....	31
Figura 10 - Resultado obtido com a abordagem “template matching” à ROI. ....	32
Figura 11 - Esquema da montagem experimental .....	33
Figura 12 - 1º Caso de estudo: imagem original.....	34
Figura 13 - Processamento da imagem do 1º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI. ....	35
Figura 14 - 2º Caso de estudo: imagem original.....	35

Figura 15 - Processamento da imagem do 2º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI. ....	36
Figura 16 - 3º Caso de estudo: imagem original e resultados do pré-processamento..	36
Figura 17 - Processamento da imagem do 3º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI. ....	37
Figura 18 - 3º Caso de estudo: imagem original e resultados do pré-processamento..	37
Figura 19 - Processamento da imagem do 4º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI. ....	38
Figura 20- Montagem dos dispositivos necessários para calibração verificação de manómetros. ....	43

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Grandezas físicas envolvidas no modelo matemático.....	24
Tabela 2 - Resultados das três abordagens. ....	38
Tabela 3 - Resultados de uma simulação de um manómetro.....	45
Tabela 4 - Lista de medidas para calibração do manómetro .....	46
Tabela 5 - tabela para cálculo da histerese. ....	48
Tabela 6 - Quadro resumo para cálculo da histerese.....	49
Tabela 7 - Cálculo da histerese. ....	51
Tabela 8 - Quadro resumo com os resultados da calibração. ....	52

# 1. Introdução

## 1.1. Objetivos

A metrologia por imagem é um ramo do processamento de imagem/visão por computador aplicada a metrologia. Recorre a instrumentos de aquisição de imagem, sendo esta posteriormente processada por um computador em ordem a evidenciar os dados relevantes, para numa fase final da análise produzir um valor associado à medida que se pretende obter.

Hoje em dia a metrologia por imagem permite a inspeção de objetos, fomentando a qualidade do produto fabricado e conseqüentemente diminuindo a não conformidade dos mesmos [1]. A visão por computador, ramo do processamento por imagem, está a ser primordial nas novas áreas tecnológicas que vão desde o ramo automóvel (veículos autónomos), indústria aeroespacial, robótica industrial e mesmo a robótica para exploração planetária [2].

A visão por computador é uma tecnologia que permite que os fabricantes dos setores tecnológicos conciliem as preocupações competitivas com as de regulação, abordem a necessidade de deteção de falhas e haja uma garantia de qualidade. A produção industrial moderna mudou as inspeções manuais tradicionais para metodologias de inspeção visual assistida por computador. Além disso, os resultados da pesquisa e desenvolvimento de novas metodologias em automação industrial revolucionaram toda a estratégia de desenvolvimento de produtos [3].

A análise de imagem aplicada à visão por computador permite obter as leituras da instrumentação analógica, utilizando algoritmos complexos para extração da informação contida na imagem [1, 2]. O resultado da análise da imagem é uma medida que pode ser interpretada ou convertida num valor numérico da grandeza subjacente à imagem. Por outras palavras, a imagem do mostrador analógico ou digital do instrumento de medida, que facilmente é interpretado por um humano como uma dada medida, neste processo de medição automático conduz ao mesmo valor. A vantagem imediata é que é possível mostrar o resultado no computador, comunicar a leitura

instantaneamente de e para qualquer local, sem ter necessidade de adaptar conversores analógico digitais a instrumentos de medida analógicos. Tem-se assim um mostrador analógico em que o indicador/ponteiro “acusa” a medida da grandeza mensurada e que depois, através da visão por computador e processamento adequado da imagem digital, é possível interpretar o resultado para tratamento posterior ou aplicar na tomada de decisão/atuação de processos.

Vários investigadores têm conseguido já há alguns anos obter os valores indicados por aparelhos analógicos em lugares remotos, converter a medida para valor digital e apresentar o valor medido pelo instrumento na forma de um número, em vez de uma imagem [4]. Esta evolução informática tem ajudado nas situações de incapacidade para substituir os aparelhos analógicos em lugares de difícil acesso, os quais não permitem uma “invasão” do espaço onde está montado o sistema por colocação de sensores digitais ao invés dos existentes, com saída 4 - 20 mA, por exemplo, ou de outros dispositivos de comunicação para um sistema central de supervisão. A corrente de 4 - 20 mA é utilizada em instrumentação industrial para transmitir os dados das variáveis físicas de forma contínua e analógica. Esta norma surgiu no século passado quando impressoras teletipo utilizavam transmissão por corrente em vez de ser por tensão, dando assim possibilidade da transmissão dos dados por longas distâncias sem ser gravemente corrompida e logo não introduzindo demasiada entropia na informação [5].

A realidade tecnológica veio permitir uma visão artificial mais precisa que a humana ao diminuir a ambiguidade, tornando os métodos baseados em visão por computador tão ou mais eficazes que a realizada por estes, automatizando e reduzindo a existência de erros durante o processo de calibração/verificação. Até ao momento ainda não é utilizada em larga escala para cálculo das incertezas por calibração de forma semiautomática ou automática.

Neste trabalho procura-se desenvolver uma metodologia que possibilite automatizar todo o procedimento de aquisição e tratamento de dados para cálculo de incertezas em processos de calibração de manómetros. Para atingir esse fim, é necessário desenvolver novas metodologias para obtenção dos valores indicados em manómetros, vacuómetro, ou manovacuómetros, puramente mecânicos e, portanto,

analógicos, através da visão por computador. Tendo consciência de que a leitura visual é suscetível de variar de operador para operador e por isso introduzir erros, acabando por enviesar o valor verdadeiro da grandeza, com este trabalho pretende-se diminuir este tipo de erros. O posterior tratamento de dados de forma automática permitirá diminuir o tempo do cálculo das incertezas de calibração/verificação e a incidência de erros pelo operador.

A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento da aplicação de suporte a essa tarefa, com capacidade de o processamento de dados e aquisição de imagem, é a linguagem Python. A escolha por esta linguagem deve-se ao facto de ser de uso livre, gratuita, fácil de implementar, com informação dedicada abundante na internet e capaz de produzir um protótipo completamente independente de licenças pagas, o que acaba por valorizar mais este trabalho [6].

## 1.2. Motivação

Os desenvolvimentos efetuados com este trabalho derivam essencialmente da necessidade de colmatar limitações que a metrologia clássica não consegue ultrapassar. Sabe-se que a metrologia faz parte da desordem do universo, da entropia, palavra que se estende aos vários ramos da ciência, associada inicialmente à termodinâmica e que agora se estende a ciência da informação e por último à incapacidade de se obter uma medição perfeita e padrões perfeitos (entropia na metrologia), portanto, a entropia está associada ao mundo real e não ideal [7].

A única estratégia para colmatar estes factos inerentes à impossibilidade de se eliminar a entropia é o uso de tecnologias avançadas de modo que o erro e a incerteza sejam de tal forma diminutos, que praticamente se consiga uma medição “perfeita”, isto é, que respeite as exigências a que se destina o processo de medição.

No presente trabalho considera-se que é necessário acrescentar um novo paradigma na calibração/verificação, usando para esse efeito o processamento de imagem, pois a automatização de todos os procedimentos vai diminuir o erro associado

ao fator humano, ou pelo menos, poderão em parte ser superados pela abordagem automática permitida pela visão artificial em vez da visão humana.

É claro que uma máquina executa as tarefas que lhe forem atribuídas. Um computador não é inteligente, a inteligência está no engenho de quem desenvolveu a metodologia e no programador de software que a implementou. Disto também se assume que o metrólogo que calibra “a olho” não se rege por sequências lógicas mas, tem uma inteligência diversificada que permite o tratamento subjetivo sobre as coisas, sinteticamente isto é, o operador pode achar que deve efetuar uma nova leitura, porque não viu bem, ou porque achou que deveria confirmar novamente a medida obtida. Esta decisão não é possível pela máquina se não tiver sido prevista no ato de planeamento da metodologia, pois como se referiu, esta implementação automática segue um conjunto de tarefas pré-estabelecidas e, com isso gera um resultado que apresenta ao operador.

Resumidamente, a metrologia clássica não está isenta de erros do operador e esta nova abordagem procura acabar com este fator humano através da máquina, mas consciente das suas limitações próprias.

### 1.3. Estrutura da tese

Este documento está dividido em 5 capítulos. No 1º capítulo faz-se uma introdução ao problema que afeta o procedimento de calibração de manómetros analógicos e como se pretende superar. No capítulo 2 descreve-se sumariamente algumas metodologias seguidas no procedimento de calibração com recurso a visão por computador. No capítulo 3 apresenta-se a metodologia proposta e no 4º capítulo os resultados obtidos. No capítulo 5 apresenta-se uma discussão geral dos resultados obtidos e as conclusões deste trabalho com uma perspectiva de desenvolvimento futuro. Em anexo encontram-se exemplos de uma calibração de um manómetro e o código da aplicação em linguagem Python desenvolvida neste trabalho.

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Procedimento de calibração de manómetros analógicos

Todos os instrumentos de medição que sejam para o uso comercial, fiscal, industrial e que tenham um papel vital na segurança, saúde, legalidade, economia e energia, estão sujeitos ao controlo metrológico segundo o Decreto-Lei nº 291/90 de 20 de setembro.

Em cada verificação e calibração são efetuadas pelo menos 10 medições. Atendendo que os manómetros são analógicos a leitura é totalmente manual. A verificação ou calibração é, em síntese, baseada na comparação do manómetro a calibrar com o padrão de pressão ou com um manómetro padrão com uma menor incerteza. A calibração é realizada em cinco patamares de pressão crescente e cinco de pressão decrescente, totalizando um total de dez leituras. Cada leitura é visualizada e registada manualmente pelo operador [8].

Sabe-se que a leitura visual humana varia de operador para operador, sendo suscetível à erros, nomeadamente por efeito de paralaxe ou até por cansaço visual ou físico (próprios da condição humana). Em Portugal efetuam-se cerca de 50.000 medições por ano, um número muito elevado para o número de laboratórios acreditados no procedimento de calibração/verificação. É um procedimento complexo que deve ser realizado com extremo rigor.

Embora se tenha melhorado os equipamentos, de modo a permitir maior facilidade na comparação para calibração ou verificação, o sistema ainda não é suficientemente automático que consiga suprimir a supervisão humana em algumas tarefas mais suscetíveis de erro ou enfadonhas.

A evolução da eletrónica, sem precedentes nos últimos tempos, e que se repercutiu no avanço da computação e nas tecnologias de informação e consequentemente no aumento da capacidade de cálculo do software e do hardware, permitiu que o ramo da ciência direcionada para o processamento de imagem dê origem à visão por computador. Esta nova área de processamento de imagem direcionada para a visão será futuramente uma poderosa ferramenta aliada à metrologia (metrologia por

imagem). Esta área tem especial enfoque na sua aplicação à calibração e verificação automática de manómetros, vacuómetros e manovacómetros, que deve estar isenta de erros de cariz humano. Esta tarefa de calibração é necessária, pois é com as medidas obtidas que se poderá proceder ao cálculo das incertezas (que desta forma será de cálculo automático, isto é, sem necessidade de intervenção do operador) e por fim a emissão do certificado de calibração.

Como se referiu anteriormente, a aquisição de valores analógicos por visão por computador já é usada há décadas em zonas de difícil acesso ou que a remoção do aparelho analógico envolva riscos explosivos ou de contaminação [4].

A Empresa Pública das Águas Livres, EPAL em Lisboa já tem há vários anos um sistema de aquisição de imagem para facilitar a leitura que é convertida para valor digital. Para esse fim tem instalado câmaras em frente a manómetros analógicos, sendo a leitura da imagem interpretada para os fins necessários, evitando o deslocamento do operador ao local.

Devido ao elevado número de manómetros que precisam de ser verificados ou calibrados, aos problemas supramencionados na realização das tarefas de calibração e aos cortes orçamentais atuais, os quais não permitem contratar mais funcionários para reforçar as equipas dos laboratórios de metrologia, no sentido de minorar estes problemas, Joaquim Ferreira desenvolveu em 2015 uma metodologia para proceder à automatização da calibração/verificação, sendo algo extraordinário no avanço da metrologia legal. Nesse trabalho, defendeu que o avanço passa pelo cálculo automático das incertezas e do processo de calibração [9].

Também o laboratório acreditado na área da metrologia, CATIM já tem implementado um sistema de visão por computador para fins de calibração/verificação de manómetros, mas por motivos diversos não o tem aplicado em larga escala, sendo que os valores da calibração/verificação são anotados manualmente e a própria visualização continua a ser sob o juízo humano.

## 2.2. Visão por computador aplicada a calibração de manómetros.

A metrologia é a ciência da medição. O nome vem da junção das palavras gregas: *metron* (que significa medição) e *logos* (que significa conhecimento/ciência). É um importante ramo da área da Física e estuda os fenómenos que influenciam a medição bem como o projeto e construção de instrumentos que permitam aferir qualquer grandeza. Sendo o valor exato impossível de se obter em diversas circunstâncias, este é também um objetivo da metrologia que para isso investiga continuamente em como aperfeiçoar os seus métodos. Procura também dominar tudo o que perturba a medição de tal forma que o erro e a incerteza associados à medida tendam a ser reduzidos.

A visão por computador é uma ferramenta que permite analisar o conteúdo da imagem de um dispositivo mecânico de medida, sem contacto físico com esse dispositivo. É baseada na aquisição de imagens e na interpretação da informação que elas contêm, traduzido essa informação para o fim a que se destina, por exemplo, numa medida.

A aplicação de algoritmos complexos e sofisticados permitem extrair informação essencial para a medição, podendo ir desde a medida da área de um contorno de um objeto na imagem até, por exemplo, à perceção automática de se determinadas peças fabricadas condizem com a tolerância estipulada pelo fabricante no controlo de qualidade do processo. No presente trabalho, a automatização do processo de calibração/verificação de manómetros de pressão vai ser estudada, desenvolvendo as metodologias e técnicas de análise de imagem necessárias para esse fim.

### 2.2.1 Visão por Computador/metrologia por imagem

Como o abordado anteriormente, já há vários anos que se faz a leitura dos valores da grandeza indicados pelos ponteiros dos manómetros analógico, recorrendo a visão por computador.

Esta abordagem surgiu na urgência de conseguir uma leitura automática de instrumentos analógicos em lugares remotos em que a ida do operador não é tecnicamente nem economicamente aceitável, sobretudo quando se pretende leituras instantâneas para a gestão na automação do processo ou a visualização em tempo real em sistemas de controlo como os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) ou outros como por exemplo o ZEUS da marca espanhola Microcom. Além do mais, estes instrumentos podem estar em lugares como zonas de potenciais riscos para a segurança humana.

Normalmente, estes instrumentos não podem ser substituídos porque a instalação não é acessível ou simplesmente a complexidade e idade da instalação do processo é impeditiva para uma situação invasiva do espaço, acarretando riscos graves para o ambiente e segurança local ou nacional. São exemplos, centrais nucleares, indústrias químicas, etc.

Assente no desenvolvimento da visão por computador e, podendo esta ser aplicada aos manómetros de pressão analógicos, surge a ideia de se implementar uma metodologia para verificação e calibração rápida destes instrumentos de medida, que seja preferencialmente automática e isenta de erros introduzidos pelo operador.

Este tema não é novo na área da metrologia por imagem e vários autores têm publicados trabalhos com vista ao desenvolvimento de metodologias capazes de ajudar neste objetivo. Na área de processamento e análise de imagem existem algumas técnicas adequadas para esse fim. A transformada de *Hough* é uma técnica empregue na análise de imagem e visa encontrar instâncias imperfeitas de objetos tais como linhas ou circunferências contidas na imagem, daí ser adequada à localização de mostradores de manómetros analógicos de pressão, por exemplo, e respetivos ponteiros [12]. A correspondência de modelos, também designada pelo termo inglês "*template matching*", é outra técnica amplamente usada para encontrar padrões em imagens digitais. Um bom modelo deve ser capaz de detetar instâncias na imagem que sofreram alterações por transformações geométricas das mesmas [11]. Assim a forma específica dos ponteiros de um manómetro pode ajudar a desenvolver um bom "*template*" e auxiliar na análise de imagem deste tipo de instrumentos.

No trabalho apresentado em [10, 11], os autores apresentam um sistema automático capaz de calibrar instrumentos de medição que não possuem interface digital. Para isso desenvolveram algoritmos de análise de imagem para determinar automaticamente a leitura dos instrumentos de medidas com visores analógicos e digitais. Para instrumentos analógicos com ponteiros, aplicam a transformada de *Hough* na determinação da posição angular do ponteiro; para instrumentos de leitura digital aplicam um algoritmo de detecção de linhas e posterior identificação do dígito por comparação com a área ocupada prevista para cada dígito. Os autores concluem que com a metodologia proposta, a incerteza máxima na detecção da posição do ponteiro em instrumentos analógicos é menor do que o olho humano pode discriminar.

Outra metodologia para realizar esta tarefa foi desenvolvida por Joaquim Ferreira em [9]. O método desenvolvido, baseado também em visão por computador para calibração de manómetros, tem uma abordagem diferente das anteriores, tendo-se baseado no programa *LabView* para processamento de imagens. Também idealizou um dispositivo mecânico para montagem de um protótipo mecânico com capacidade para se movimentar exclusivamente controlado pelo programa *LabView* em sintonia com uma câmara. Para esse fim utilizou as bibliotecas desenvolvidas pela *National Instruments* e implementadas no *LabView*, especializadas na aquisição da leitura analógica dos instrumentos puramente mecânicos ou eletromecânicos. Assim aquele trabalho, para além da montagem mecânica e da sincronização com o *LabView*, não teve nenhum acréscimo ao já implementado na própria ferramenta de aquisição.

Em [12] é apresentada uma solução para calibração metrológica de instrumentos digitais sem interface de comunicação integrada (DIWI). A solução é baseada na conversão para dados numéricos das imagens adquiridas por câmaras de vídeo. O artigo descreve o algoritmo implementado no ambiente *LabVIEW* e apresenta os resultados de uma experiência de calibração real realizada a um multímetro digital *True RMS* da *Fluke*, modelo 189. A imagem é adquirida por uma *webcam* com controlo manual e a região de interesse da imagem (ROI), que contém a informação a converter em valor numérico, é definida manualmente com a ajuda do rato. De seguida um algoritmo de reconhecimento de caracteres, (OCR), é aplicado à ROI. Os valores assim obtidos são objeto de análise posterior para efeitos de calibração.

A técnica de “*template matching*” foi aplicada em [13]. No entanto, os autores consideram que esta técnica pode ser mais lenta que outras técnicas de análise de imagem ou algoritmos especificamente desenvolvidos para detetar objetos na imagem.

No campo de controle de supervisão e aquisição de dados há um problema de difícil resolução que surge na leitura automática da medida apresentada pelos instrumentos de medição analógicos. Para resolver este problema, muitas abordagens baseadas na visão por computador foram propostas para a leitura automática, mas, a maioria dos sistemas propostos é sensível ao brilho e à posição do instrumento. Em [14] os autores do trabalho propõem alternativas ao ângulo da câmara que deve ser vertical. O sistema de reconhecimento proposto usa uma nova abordagem para ler automaticamente o valor de instrumentos de medição analógicos em vários níveis de brilho e ângulos de câmara. Aplicam a transformada de *Hough* para determinar a posição do ponteiro, combinando metodologias que permitem lidar com as diferentes perspetivas da imagem. Pelos resultados dos testes verificam a boa robustez do sistema de reconhecimento para diferentes brilhos na imagem e ângulos da câmara de aquisição.

A abordagem proposta neste trabalho implementa um procedimento automático para a tarefa de determinação da posição angular do ponteiro do manómetro. Esta leitura automática será depois a entrada numa aplicação destinada a calibrar/verificar manómetros. Para isso desenvolveram-se metodologias e implementaram-se em novos algoritmos, usando a linguagem Python e as suas bibliotecas especializadas, de modo a realizar a tarefa proposta. A linguagem Python é ideal para o desenvolvimento de protótipos, é de uso livre e não precisa de licenças pagas para se poder desenvolver aplicações finais, como é o caso do *LabView* - não encarecendo o custo final do sistema. Esta abordagem pode ser melhorada continuamente, a fim de adaptar o sistema a novas solicitações e aperfeiçoar ainda mais o processo de calibração.

## 2.3 Erros e Incertezas na calibração dos manómetros.

Nenhuma medição está isenta de erros e de incertezas. Mesmo durante a calibração com um ambiente altamente controlado, há variáveis impossíveis de controlar que acabam por se tornar em erros aleatórios suscetíveis de influenciar o resultado da medição. Para conseguir quantificar os erros aleatórios surge então o termo de incerteza que traduz a dispersão dos valores que poderão ser atribuídos à mensurada e consequentemente o intervalo de confiança em que o valor real da grandeza se encontra.

Como qualquer calibração, a calibração de manómetros é efetuada pela comparação com um manómetro padrão, de exatidão superior ao manómetro a ser calibrado - norma NP EN 837, 2003, sendo que o erro admissível não poderá exceder  $\frac{1}{4}$  do erro do manómetro a ser ensaiado e, é exigido que este padrão deve estar rastreado por um padrão nacional e internacional.

É admitida uma tolerância do alcance máximo, sendo  $e^*$  o alcance máximo, ou seja, classes: 0,1; 0,25; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0. Os manómetros cuja classe ou erro máximo admissível, fornecido pelo fabricante, não constem da referida norma devem ser classificados de acordo com a classe de exatidão mais próxima prevista nessa norma, que seja numericamente superior. A maneira de quantificar esse intervalo é efetuada numericamente através das fórmulas detalhadas na secção seguinte.

### 2.3.1 Comparação entre o manómetro a calibrar e o padrão

O instrumento de calibração normalmente usado nas entidades creditadas para verificação/calibração (DREN), sob supervisão do Instituto Português da Qualidade (IPQ) é descrito no esquema resumido da figura seguinte.

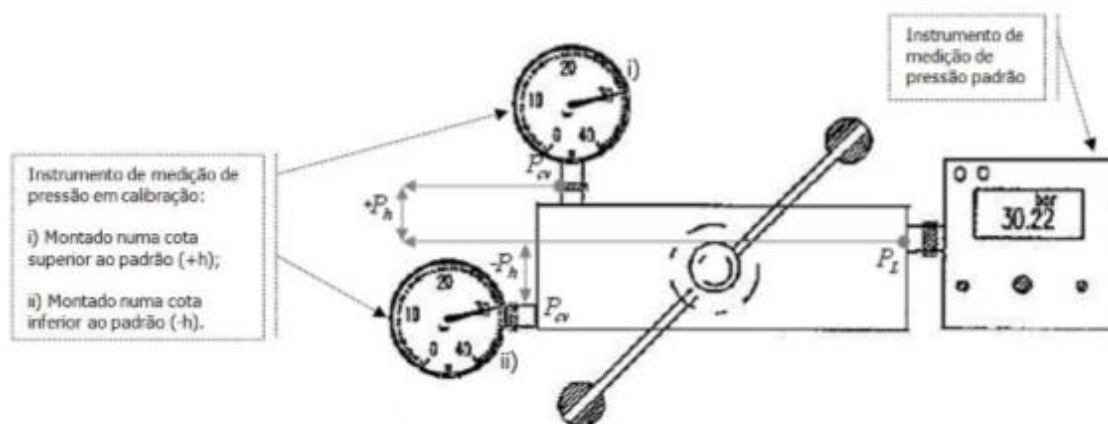


Figura 1 – Esquema do dispositivo de calibração normalmente usado em instituições acreditadas em calibração/verificação.

### Modelo matemático

O funcionamento deste dispositivo baseia-se no modelo matemático descrito pela equação seguinte:

$$P_{CV} = P_l - P_h \quad (1)$$

e, atendendo a que o fluido em causa tem altura  $h$  dentro do aparelho de calibração, as grandezas físicas envolvidas no modelo são as descritas na tabela que se segue:

Tabela 1 - Grandezas físicas envolvidas no modelo matemático

Símbolo	Grandeza
$P_{cv}$	Valor convencional da pressão
$P_l$	Valor da pressão lido no padrão
$P_h$	Valor da pressão resultante do peso da coluna de fluido transmissor de pressão
$\rho$	Densidade do fluido transmissor de pressão
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Diferença de cota entre a tomada de pressão do padrão e do instrumento em calibração.

Considerando que a pressão hidrostática da coluna de líquido é dada por

$$P_h = \rho gh \quad (2)$$

então o modelo matemático tem a forma

$$P_{cv} = P_L - \rho gh \quad (3)$$

Cálculo do erro de calibração/verificação

O erro da calibração/verificação calcula-se pela equação

$$E = P - P_{cv} \quad (4)$$

sendo que  $P$  o valor da pressão lida no instrumento em calibração. Da eq. 3 tem-se que  $P_{cv} = P_L - \rho gh$ ; então o erro pode ser determinado por

$$E = P - P_L + \rho gh \quad (5)$$

Cálculo da Incerteza combinada

O cálculo da incerteza combinada  $U_c(y)$  pode ser obtido a partir da equação

$$U_c(y)^2 = \sum_{i=1}^n [C_i \cdot U_i]^2 \quad (6)$$

### 3. Metodologia desenvolvida

#### 3.1. Algoritmo da metodologia

A metodologia desenvolvida é baseada numa sequência de procedimentos que, a partir da imagem inicial do manómetro, determina a posição angular do ponteiro. O fluxograma da Figura 2 resume os passos implementados neste trabalho.

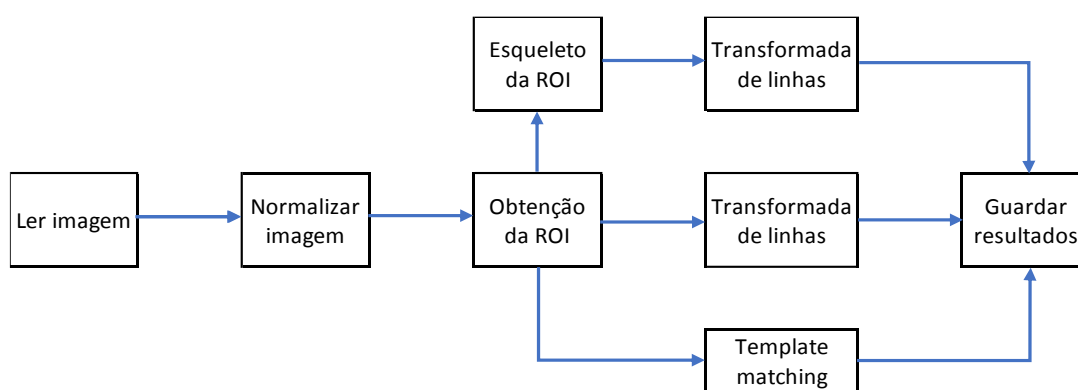


Figura 2 - Esquema do algoritmo implementado.

#### 3.2. Detalhes da implementação da metodologia

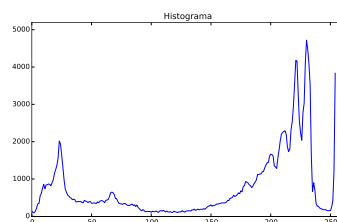
A descrição detalhada do algoritmo está acompanhada de imagens para melhor se descrever as tarefas implementadas. Assim, inicialmente uma câmara captura a imagem em três planos de cor - vermelho, verde e azul (RGB) - através de uma interface de aquisição de imagem que pode ser armazenada para tratamento futuro. A tarefa inicial de processamento de imagem é um processo de normalização, onde a imagem é re-escalada para um tamanho fixo de 800 linhas e selecionado um plano de cor. Com isto, todas as imagens sofrem o mesmo tipo de processamento, podendo as dimensões dos filtros serem definidas por valores absolutos. Após este pré-processamento obtém-se outra imagem, na escala de cinzentos, isto é, os *pixels* (ou pontos da imagem) variam

de intensidade entre valores na gama de 0 a 255. Sobre esta imagem vai ser aplicado um filtro de mediana para eliminar ruído e alguns artefactos indesejados bem como suavizar os contornos.

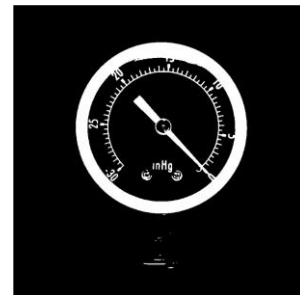
Segue-se a determinação da ROI. Neste caso consiste na deteção do círculo que contém o mostrador do manómetro. Para atingir esse fim, sobre a imagem em escala de cinzentos aplica-se um operador de segmentação para os objetos de interesse (manómetro) serem separados do fundo da imagem que é redundante para o processo – processo de binarização. Esta etapa é fulcral em qualquer tarefa que envolva processamento de imagem pois, manter qualquer elemento indesejado pode conduzir a resultados erróneos; por outro lado, eliminar objetos de interesse pode resultar na impossibilidade de efetuar a ação pretendida. Para isso, nesta fase é calculado o histograma com a distribuição das intensidades dos pixels na imagem. Tendo em atenção que deve haver dois grupos de elementos - elementos de interesse ou ROI e fundo da imagem - para obtenção do limiar ótimo de separação entre os dois grupos de elementos da imagem aplicou-se o método de Otsu [17]. A figura seguinte ilustra os resultados obtidos.



(a)



(b) Limiar de Otsu: 148

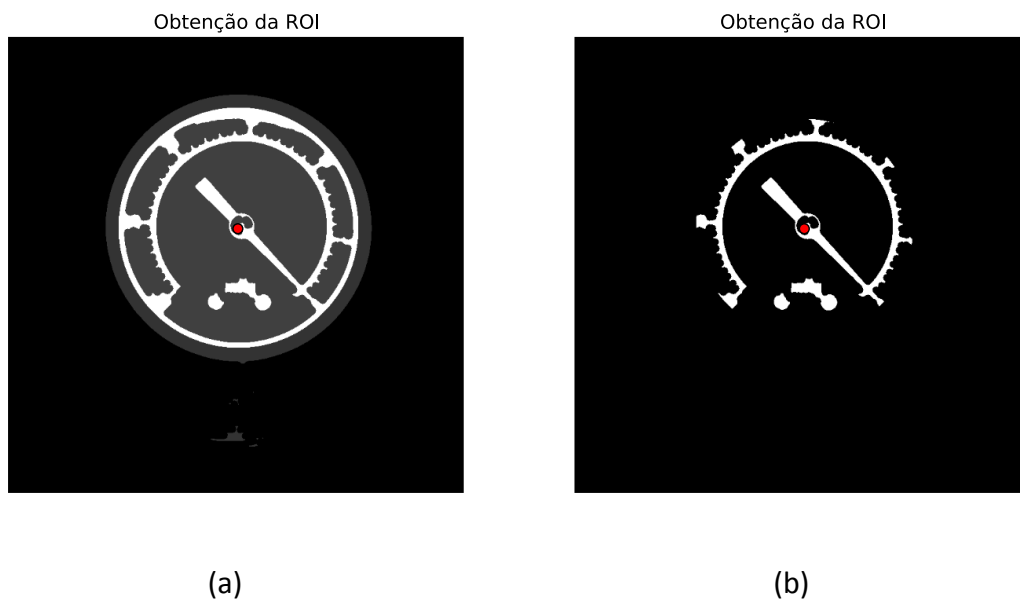


(c)

Figura 3 - Processo de binarização da imagem. (a) imagem original; (b) Histograma de intensidades da imagem na escala de cinzentos [0-255]; (c) imagem binarizada.

Para a tarefa de determinação da ROI, parte-se da imagem binária anterior e, sobre esta, aplica-se um filtro de *Sobel* para obter os contornos da imagem, seguido da transformada de *Hough* para circunferências, com raios crescentes até metade da menor dimensão da imagem. O filtro de *Sobel* é um filtro de derivada que aplicado à

imagem binária dá os contornos dos objetos, essenciais para o bom funcionamento da transformada de Hough. O objetivo da sua aplicação neste caso é também evitar excesso de circunferências possíveis na resposta da transformada. No entanto, a aplicação de uma só vez desta transformada revelou-se produzir regiões que incluíam o rebordo exterior do manómetro. Como esta parte da imagem conduzia a maus resultados na tarefa seguinte, decidiu-se ajustar o procedimento anterior e sobre esta primeira ROI aplicou-se uma segunda vez a transformada de Hough mas, nesta última aplicação, com um raio máximo inferior em 10% ao raio obtido na primeira aplicação. A resposta desta tarefa é o centro da ROI circular e o respetivo raio. Para efeitos de cálculo da ROI, considerou-se suficiente 95% do raio obtido; desta forma eliminava-se alguns casos em que partes do rebordo do manómetro eram integrados na ROI. As imagens da figura seguinte mostram os resultados obtidos na determinação da ROI da imagem de exemplo anterior:



*Figura 4 - ROI da imagem. Resultado obtido pela transformada de Hough (a); segunda aplicação da transformada de Hough e correção para retirar o rebordo exterior do manómetro (b).*

A tarefa final consiste na determinação da posição angular do ponteiro. Nesta fase implementaram-se três abordagens diferentes em ordem a pesquisar qual seria a mais eficiente para a execução dessa tarefa. A primeira implementação baseia-se na transformada de *Hough* de linhas, aplicada sobre a ROI. A Figura seguinte mostra o resultado desta abordagem aplicada à imagem de exemplo.

Transformada de linhas - ROI: -45,43 graus

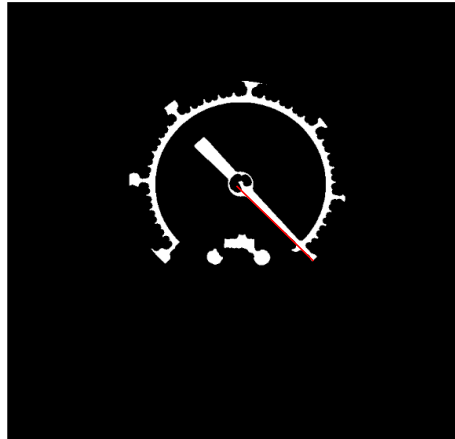
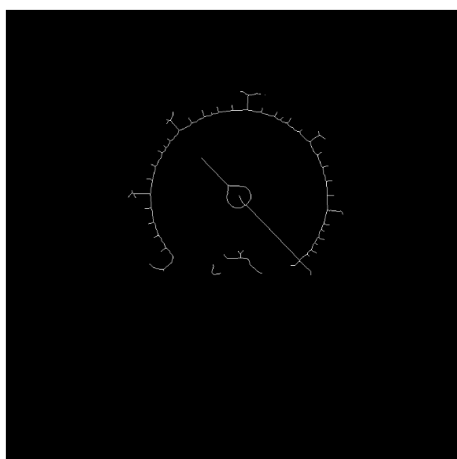


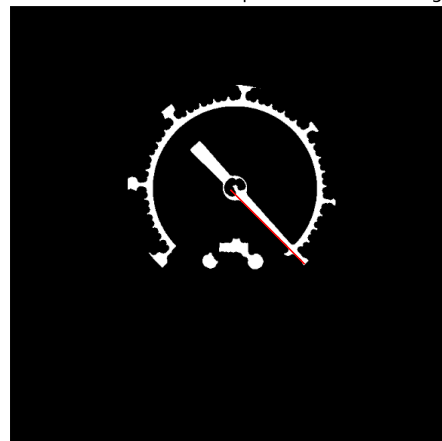
Figura 5 - Resultado obtido pela transformada de linhas aplicada diretamente à ROI.

A segunda abordagem é similar à primeira, mas com a imagem da ROI substituída pelo seu esqueleto. O esqueleto de uma imagem é a representação dos objetos contidos na imagem por linhas mediais ilustrativas da forma dos objetos; consegue-se diminuindo a espessura dos objetos na imagem com a aplicação sucessiva de filtros morfológicos de erosão sobre a imagem binária. O objetivo desta abordagem é resolver problemas similares aos descritos na abordagem anterior sobre a inclusão do rebordo exterior do manómetro na ROI. A figura seguinte mostra imagens ilustrativas dessa abordagem obtidas com a ROI produzida na tarefa anterior.



(a)

Transformada de linhas - esqueleto ROI: -45,11 graus



(b)

Figura 6 - Resultado da transformada de linhas (b) aplicada ao esqueleto da imagem (a).

A terceira abordagem consiste em definir “*templates*” ou modelos do ponteiro em orientações diferentes e medir a similaridade com a imagem da ROI. O modelo que for mais similar é aquele que tem o ângulo correto no manômetro representado na imagem. A figura seguinte mostra um modelo gerado para um ponteiro a -45 graus, a região na ROI sobre a qual se vai comparar o modelo e as zonas sobrepostas das duas imagens, com os pixels comuns realçados.

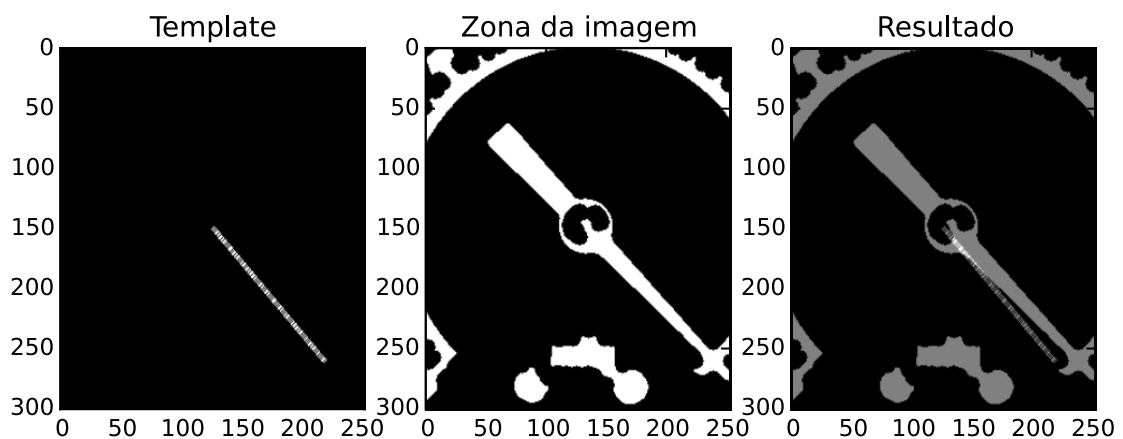


Figura 7 - Descrição da metodologia baseada em "Template matching". (a) modelo; (b) região a comparar na imagem; (c) resultado da sobreposição do modelo com a imagem.

Para acelerar o processo de detecção do ângulo, optou-se por fazer uma primeira análise, mais grosseira, com modelos de ponteiros em ângulos múltiplos de 5 graus; obtido o melhor resultado desta primeira análise, volta-se a repetir a análise, mas agora com incrementos de ângulos de 1 grau, no intervalo de mais ou menos 5 graus em torno do melhor resultado da primeira passagem. Os gráficos da figura seguinte mostram o resultado obtido para a função que mede a similaridade entre as regiões da imagem e do modelo, para diferentes ângulos, entre -60 e 240 graus da primeira passagem e entre -50 e -40 graus da segunda passagem.

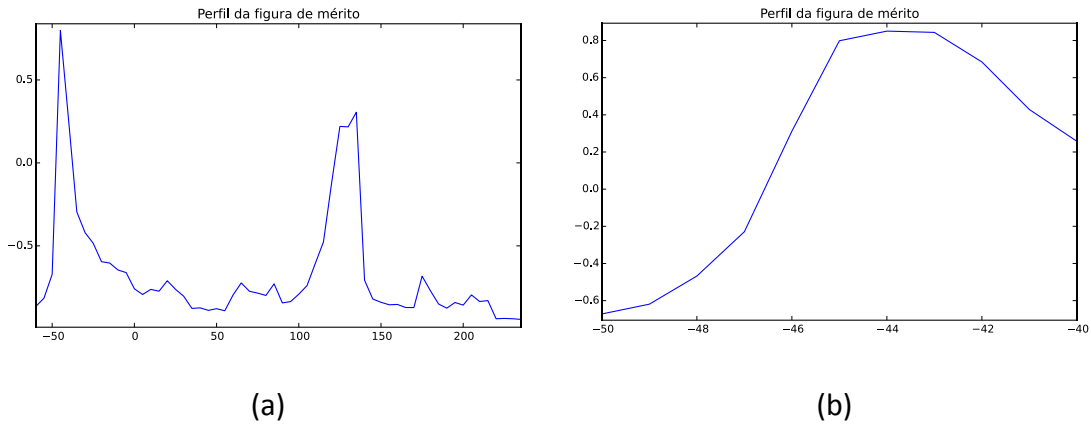


Figura 8 - Desempenho da aplicação da metodologia baseada em "template matching" para modelos de ponteiros com ângulos entre: (a) -60 a 240 graus; (b) -50 a -40 graus.

A figura seguinte mostra o comportamento do modelo gerado para -44 graus, melhor resultado na segunda passagem.

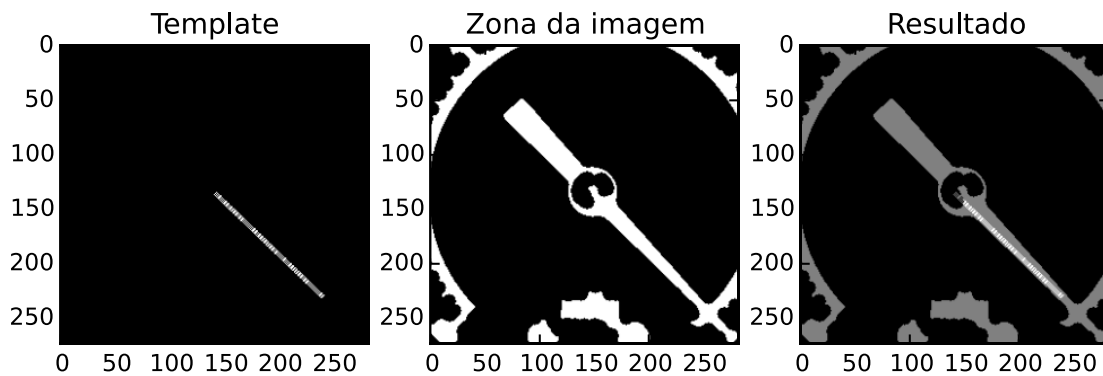


Figura 9 – Segunda passagem com "template matching". (a) modelo a -44 graus; (b) região a comparar na imagem; (c) resultado da sobreposição do modelo com a imagem.

O resultado desta abordagem, para a imagem de exemplo aqui analisada, apresenta-se na figura seguinte.

Template matching:: -44.0 graus

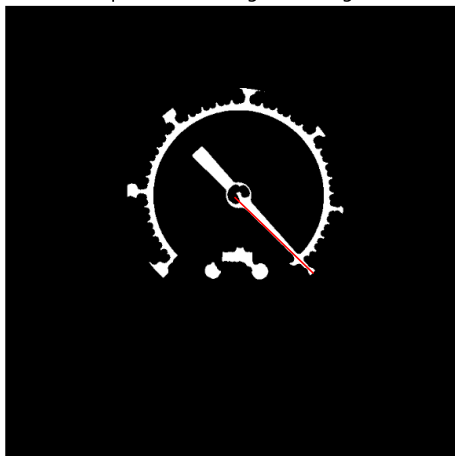


Figura 10 - Resultado obtido com a abordagem "template matching" à ROI.

### 3.2. Modo de proceder ao nível metrológico

Ao nível da calibração/verificação o modo correto de se proceder consiste em executar as seguintes tarefas:

---

#### Procedimento de calibração

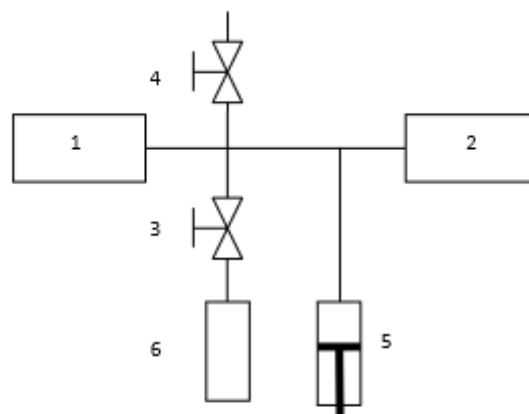
---

- 1- As leituras indicadas pelo manómetro e pelo sensor padrão de pressão são ajustadas a zero e registadas pelo operador.
- 2- Tomando como referência a indicação do manómetro, o operador pressuriza manualmente o sistema de medição até ao próximo patamar de medição registando a leitura correspondente do padrão.
- 3- Sempre em pressão crescente, procede-se como na alínea anterior até todos os patamares de medição serem contemplados.
- 4- Atingindo o alcance máximo do manómetro, mantendo a sua indicação como referência, operador despressuriza manualmente o sistema de medição até ao patamar de medição anterior, registando a leitura correspondente do padrão.

- 5- Atingindo o alcance máximo do manómetro, mantendo a sua indicação como referência, o operador despressuriza manualmente o sistema de medição até ao patamar de medição anterior, registando a leitura correspondente do padrão.
  - 6- Sempre em pressão decrescente, procede-se de igual forma até contemplar todos os patamares de medição, cumprindo-se o ciclo de ensaios quando o alcance mínimo do manómetro é atingido.
- 

### 3.2. Descrição de um modelo experimental de calibração automática.

Uma possível implementação mecânica de um sistema de calibração automática seria o apresentado na Figura 11, onde se deve colocar uma câmara para aquisição de imagem em frente ao manómetro. A posição adequada dessa câmara terá de ser estudada em função da iluminação e brilho apresentado pelo manómetro, durante o processo de calibração. Nesta fase de desenvolvimento da metodologia, não foi possível estudar a parte mecânica de um possível sistema de calibração automática.



- 1 reference standard
- 2 instrument to be calibrated, mounted as normally used
- 3 fine-regulated inlet valve
- 4 fine-regulated pressure relief valve
- 5 volume regulator
- 6 pressure source

Figura 11 - Esquema da montagem experimental

## 4. Resultados

### 4.1. Base de dados de imagens

Para desenvolvimento da metodologia de processamento e análise de imagem, recorreu-se a um conjunto de 9 imagens de manómetros. Procurou formar-se um conjunto de imagens diversificado para não se afinar o procedimento a um tipo particular de imagens. Os resultados obtidos mostraram desempenhos diferentes nas diversas abordagens aqui implementadas.

### 4.2. Alguns resultados pertinentes

Os exemplos seguintes ilustram alguns resultados para as três abordagens de determinação do ângulo do ponteiro no manómetro.

#### 1º Caso

A seguinte imagem, é a imagem original de um manómetro.



Figura 12 - 1º Caso de estudo: imagem original.

As diversas etapas da metodologia foram aplicadas a esta imagem. De notar que é um procedimento completamente automático. Os resultados obtidos são os que se seguem na figura seguinte.

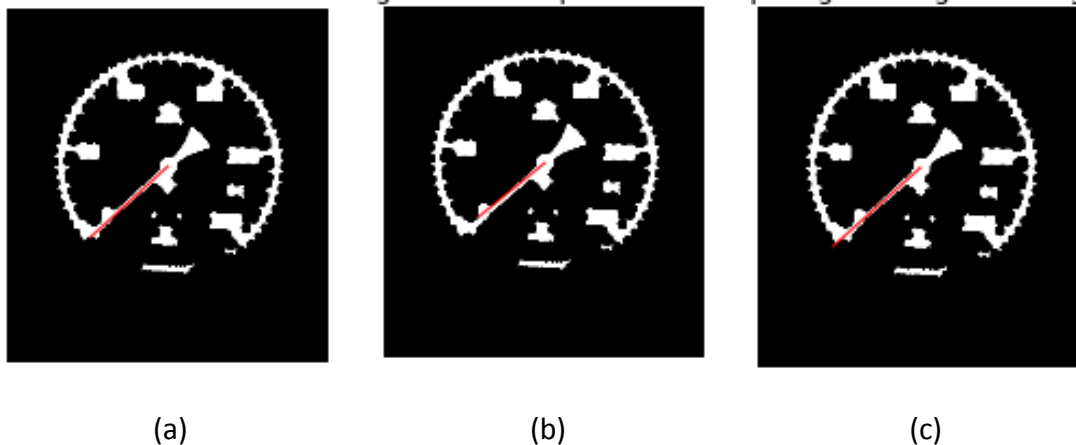


Figura 13 - Processamento da imagem do 1º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI.

Depois do pré-processamento e determinação da ROI, a imagem é analisada pelas três abordagens, para rastrear o ângulo do ponteiro: a transformada de linhas do ROI origina um ângulo de 222.54 graus. Já o processo de esqueletização da ROI, encontra um ângulo de 219.33 graus. Como se pode observar na imagem, como a linha foi traçada, não parece precisa, levantando a dúvida quanto a qualidade deste processo de análise nesta imagem. Por último, utilizando "template matching" obtém-se 220.0 graus. À primeira vista, este processo parece ser muito semelhante ao de transformada de linhas, no entanto, o ângulo está muito próximo do processo de "esqueletização".

## 2º Caso

No segundo caso em estudo utilizou-se uma imagem cuja posição no processo de aquisição não era a mais adequada para o processamento.



Figura 14 - 2º Caso de estudo: imagem original.

Na transformada de linhas na ROI obtém-se um ângulo de 223.64 graus. A transformada de linhas do esqueleto gerou um ângulo de 223.54 graus, portanto muito próximo do anterior. Já a abordagem com “*template matching*” fornece um valor angular totalmente diferente e errado (64.0 graus), pois não coincide em nada com a posição correta do ponteiro, o que indica necessitar de melhorias na definição dos modelos para a sua eficaz aplicação na aquisição da posição do ponteiro em manómetros analógicos. Os resultados apresentam-se nas imagens da figura seguinte.

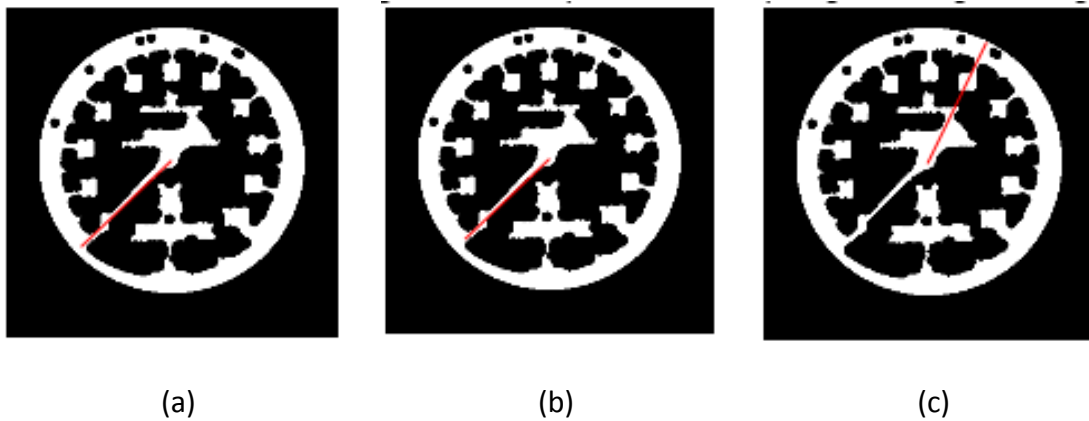


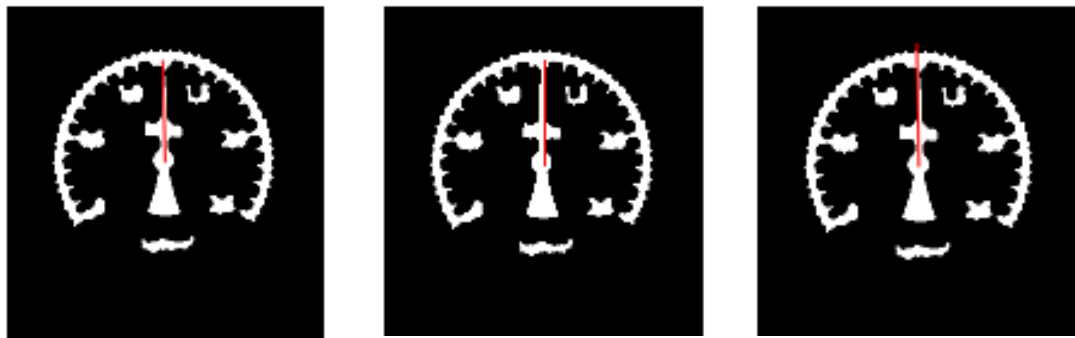
Figura 15 - Processamento da imagem do 2º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) “*template matching*” sobre a ROI.

### 3º Caso

Apresenta-se um 3º caso para avaliar a metodologia proposta. Neste caso procurou-se uma imagem com outras posições do ponteiro no manómetro: neste caso tem-se com um ângulo próximo de 90 graus, mas ligeiramente superior.



Figura 16 - 3º Caso de estudo: imagem original e resultados do pré-processamento.



(a)

(b)

(c)

Figura 17 - Processamento da imagem do 3º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI.

Com a transformada de linhas sobre a ROI, obteve-se o ângulo de 91.35 graus. Com a transformada de linhas aplicada ao esqueleto da ROI o ângulo medido é de 90 graus. Com o "template matching", o ângulo obtido é de 91.0 graus. Conclui-se que neste caso, as três abordagens produzem valores próximos da leitura de um operador humano.

#### 4º Caso

Por fim, apresenta-se um manómetro com outra posição do indicador arbitrária.



Figura 18 - 3º Caso de estudo: imagem original e resultados do pré-processamento.

Os resultados das abordagens apresentam-se nas imagens da figura seguinte.

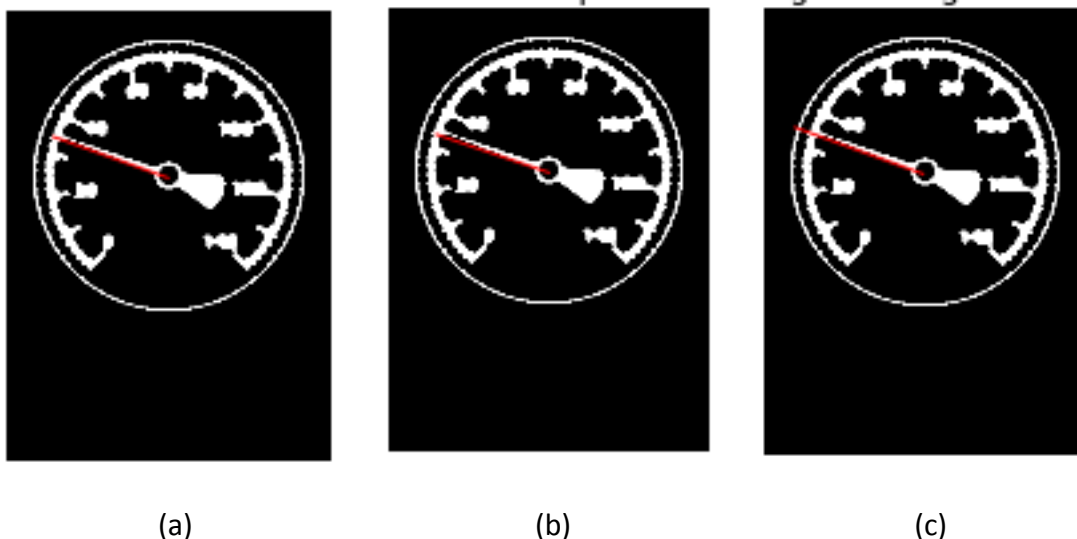


Figura 19 - Processamento da imagem do 4º caso; (a) transformada de linhas sobre a ROI; (b) sobre o esqueleto; (c) "template matching" sobre a ROI.

Os valores obtidos com as três abordagens são: 160,24 graus; 161,20 graus e 160 graus, respectivamente pelas ordens indicadas na metodologia.

#### 4.3. Análise da melhor das abordagens implementadas

As imagens dos mostradores dos 9 manômetros da base de dados foram analisadas com as três abordagens e os resultados estão apresentados na tabela seguinte.

Tabela 2 - Resultados das três abordagens.

Manómetro	Man1	Man2	Man3	Man4	Man5	Man6	Man7	Man8	Man9
Transformada de linhas									
ROI	91,35	160,11	220,96	225,29	227,29	223,64	223,64	220,03	221,80
Esqueleto da ROI	90,00	158,69	220,01	224,39	226,16	222,16	223,56	222,16	220,82
"Template Matching"									
2ª Passagem	91,00	160,00	220,00	224,00	45,00	223,00	65,00	220,00	220,00
Média	90,78	159,60	220,32	224,56	226,73	222,93	223,60	220,73	220,87
Desvio padrão	0,57	0,65	0,45	0,54	0,56	0,61	0,04	1,01	0,74
Avaliação global	Ok	Ok	Ok	Ok	TM	Ok	TM	Ok	Ok

Desta análise conclui-se que a transformada de linhas aplicada à ROI funciona sem falhas, enquanto que a abordagem com “*template matching*” produz resultados não aceitáveis em 2 situações. O facto de a transformada de linhas funcionar sempre se deve à forma em linha do ponteiro e esta transformada não está dependente do centro da ROI para a determinação da linha. É exatamente esta situação que prejudica a abordagem com “*template matching*” pois os modelos são criados a partir do centro da ROI e comparados com a imagem. Como o modelo tem sempre muitos pixels fora da região do ponteiro, quando sobreposto com a imagem podem ocorrer máximos locais indesejáveis, para além do facto de a metodologia poder falhar na análise inicial mais grosseira por cobrir apenas um pequeno conjunto de ângulos.

Outra observação já apontada por outros autores, prende-se com o tempo de cálculo desta abordagem. É muito demorada (mesmo com as duas análises – uma mais grosseira com ângulos de 5 em 5 graus e outra mais fina com ângulos de 1 em 1 grau).

Com isto, conclui-se que a abordagem mais isenta de falhas é a transformada de linhas. Por outro lado, a análise das imagens obtidas com a transformada de linhas sobre a ROI e sobre o esqueleto levam a supor um melhor desempenho na aplicação direta da transformada de linhas sobre a ROI. No entanto, como nas imagens se verifica que resultam em medidas muito similares, uma solução seria a combinação das duas abordagens.

## 5. Conclusões

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para implementação de um sistema de calibração automático. Procurou-se desenvolver a aplicação autónoma de ferramentas proprietárias, recorrendo à linguagem de programação Python e nas diversas bibliotecas de desenvolvimento específicas para a área em estudo. O objetivo final é alcançar um elevado rigor na aquisição de medidas e processamento das incertezas inerentes a todo o processo de calibração. O desenvolvimento de um sistema completo exige o desenvolvimento para processamento de imagem, de cálculo de incertezas, dispositivo mecânico para aquisição de imagens e teste de manómetros e capacidade de gerar relatórios de forma automática.

A metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho permite já concluir que é possível implementar um sistema automático para análise de imagem, que futuramente pode ser integrado num sistema de cálculo de medidas e respetivas incertezas inerentes ao processo de calibração de manómetros.

Relativamente à análise de imagem efetuada após a determinação da ROI, das três abordagens estudadas, conclui-se que a transformada de linhas é mais isenta de falhas que o *“template matching”*. Esta última, foi integralmente desenvolvida neste trabalho e mostra potencial por mostrar resultados na imagem melhor posicionados (quando não falha) que os dois outros.

Em trabalhos futuros seria de todo o interesse completar esta abordagem com a análise automática de incertezas e geração automática de relatórios. A integração de todas as metodologias num sistema mecânico completamente funcional seria a última tarefa a desenvolver, exigindo integração de conhecimentos a nível de mecânica e de eletrónica com a computação.

## Referências

- [1] C. Demant, B. Streicher-Abel e P. Waszkewitz, *Industrial Image Processing - Visual Quality Control in Manufacturing*, Berlin: Springer, 1999.
- [2] R. Gonzales e R. Woods, *Image Processing*, 3rd Ed, Pearson International Edition, 2008.
- [3] S. Butt, U. Asgher, U. Mushtaq, R. Ahmed, F. Zhang, Y. Ayaz, M. Jamil e M. Amjad, "Intelligent Machine Vision Based Modeling and Positioning System in Sand Casting Process," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, pp. 1-11, 2017.
- [4] J. Chi, L. Liu, J. Liu, Z. Jiang e G. Zhang, "Machine Vision Based Automatic Detection Method of Indicating Values of a Pointer Gauge," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, pp. 1-19, 2015.
- [5] J. Alves, *Aquisição e Gestão de Dados*, sebeta da disciplina do curso LEIM, Porto, 2008.
- [6] P. S. Foundation, "Python," 2018. [Online]. Available: <https://www.python.org/>. [Acedido em 10 10 2018].
- [7] E. A. Péres, *A Termodinamica e a Entropia, O Universo Morrerá de Frio*, RBA Editores - National Geographic - Edição Especial, 2018.
- [8] C. Sousa, *Metrologia da Pressão*, sebeta da disciplina do curso LEIM, ISEP, Porto.
- [9] J. Ferreira, "Automatização de Sistemas de Medição Múltiplo de Ensaio de Manómetros Analógicos," 2015.
- [10] R. O. Duda, P. E. Hart e D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed., Wiley, 2000.
- [11] R. Brunelli, *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*, Wiley, 2009.

- [12] F. C. Alegria e A. C. Serra, "Automatic Calibration of Analog and Digital Measuring Instruments Using Computer Vision," *IEEE transactions on instrumentation*, vol. 49, nº 1, pp. 94-99, 2000.
- [13] F. C. Alegria e A. C. Serra, "Computer vision applied to the automatic calibration of measuring instruments," *Measurement*, vol. 28, nº 3, pp. 185-195, 2000.
- [14] N. Giaquinto, G. Andria, L. Fabbiano e M. Savino, "Automatic calibration system for digital instruments without built-in communication interface," em *XIX IMEKO World Congress- Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, Portugal, 2009.
- [15] S. A. d. Araújo e H. Y. Kim, "Ciratefi: An RST-invariant template matching with extension to color images," *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 18, nº 1, pp. 75-90, 2011.
- [16] C. Zheng, S. Wang, Y. Zhang, P. Zhang e Y. Zhao, "A robust and automatic recognition system of analog instruments in power system by using computer vision," *Measurement*, vol. 92, pp. 413-420, 10 2016.
- [17] B. Sankur e . M. Sezgin, "Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation," *J. of Electronic Imaging*, vol. 13, nº 1, pp. 146-165, 2004.

## Anexos

### Anexo A

#### Exemplo da calibração de um manómetro.

De seguida apresenta-se um exemplo, com valores simulados de leituras, e o procedimento para cálculo dos valores para a determinação das incertezas do manómetro em processo de calibração. A figura que se segue mostra a montagem adequada dos diversos dispositivos empregues na realização da respetiva calibração e cálculo das incertezas.



*Figura 20- Montagem dos dispositivos necessários para calibração verificação de manómetros.*

Características do manómetro a ser calibrado:

Alcance: 0 – 160 bar

Resolução: 1 bar

Características do manómetro padrão:

Resolução: 0,1 bar

Incerteza expandida:  $U = 0,1 \% (k=2)$  (em relação ao fundo da escala)

Outros parâmetros da experiência:

Temperatura durante a calibração: 22° C +/- 1 grau Celsius

Alcance do dispositivo de calibração: 0 – 200 bar

Resultados da calibração (exemplo):

Tabela 3 - Resultados de uma simulação de um manómetro

Ajustado	Avanço	Retorno	Avanço	Retorno	Avanço	Retorno	Média	Correção	Desvio Padrão	Repetitividade
15	14,9	14,9	14,8	14,9	14,9	14,9	14,88	-0,1167	0,0408	0,0167
30	29,8	29,6	29,7	29,7	29,8	29,7	29,72	-0,2833	0,0753	0,0307
45	45,0	44,6	45,1	44,7	45,1	44,7	44,87	-0,1333	0,2251	0,0919
60	60,1	59,7	60,0	59,8	60,1	59,8	59,92	-0,0833	0,1722	0,0703
75	75,0	74,6	75,0	74,6	75,0	74,6	74,80	-0,2000	0,2191	0,0894
90	89,9	89,5	89,9	89,6	89,8	89,6	89,72	-0,2833	0,2191	0,0703
105	104,9	104,5	105,0	104,6	105,0	104,6	104,77	-0,2333	0,1722	0,0919
120	119,9	119,7	119,8	119,8	119,9	119,7	119,80	-0,2000	0,0894	0,0365
140	140,2	140,0	140,1	140,2	140,2	140,0	140,12	0,1167	0,0983	0,0401
160	160,3	160,1	160,2	160,2	160,2	160,2	160,20	0,2000	0,0632	0,0258

Da tabela anterior, resume-se a média, o desvio padrão da média e o desvio padrão na tabela seguinte.

*Tabela 4 - Lista de medidas para calibração do manómetro*

Valor	Média	Desvio Padrão da Média	Desvio Padrão
15	14,88	0,01667	0,04082
30	29,72	0,03073	0,07528
45	44,87	0,09189	0,22509
60	59,92	0,07032	0,17224
75	74,80	0,09189	0,21909
90	89,72	0,07032	0,17224
105	104,77	0,09189	0,22509
120	119,80	0,03651	0,08944
140	140,12	0,04014	0,09832
160	160,20	0,02582	0,06325

Temos então na tabela os cálculos necessários para determinação do desvio padrão da média: a variância, e a raiz quadrada da variância, portanto o desvio padrão.

Dados do processo

O desvio do manómetro em relação ao manómetro padrão é definido como a diferença entre a medida dada pelo manómetro a calibrar e o manómetro padrão.

Equação matemática:

$$\text{Desvio} = \text{Medida do Manómetro} - \text{Manómetro Padrão}$$

As fontes de incerteza durante a calibração/verificação do manómetro, são dadas pelas grandezas seguintes. A incerteza tipo A, está relacionado com o tratamento estatístico dos valores medidos nos patamares de pressão. Já as restantes variáveis, como a resolução do manómetro a calibrar e o padrão, assim como a incerteza herdada do padrão, é uma incerteza do tipo B.

Fontes de incerteza

- Repetibilidade – Tipo A
- Resolução do manómetro
- Resolução do manómetro padrão
- Incerteza herdada do padrão  $U = 0,1 \% (k = 2)$  esta incerteza está relacionada como certificado de calibração e tem uma distribuição retangular, com uma incerteza expandida  $K=2$ .

As fórmulas seguintes são responsáveis pelo cálculo da incerteza herdada, com o intervalo de confiança e  $K=2$ .

Porcentagem em relação ao fundo de escala:

$$U = \frac{U(\text{unidade})}{200} \times 100 \%$$

$$U_{(\text{unidade})} = \frac{U(\%)}{100} \times 200$$

$$u_c = \frac{U(\text{unidade})}{k}$$

A incerteza de histerese, é dada pela diferença entre a media do avanço e a media do retorno no mesmo patamar de pressão medido no avanço no sentido dos ponteiros do relógio, e depois no sentido contrário.

Histerese

$$U(\text{hist}) = (\overline{\text{Avanço}} - \overline{\text{Retorno}})$$

$$u(hist) = \frac{U(hist)}{2\sqrt{3}}$$

Tabela 5 - tabela para cálculo da histerese.

	Vr	Média
Avanço	15	14,867
Avanço	30	29,767
Avanço	45	45,067
Avanço	60	60,067
Avanço	75	75
Avanço	90	89,867
Avanço	105	104,97
Avanço	120	119,87
Avanço	140	140,17
Avanço	160	160,23
Retorno	15	14,9
Retorno	30	29,67
Retorno	45	44,67
Retorno	60	59,767
Retorno	75	74,6
Retorno	90	89,567
Retorno	105	104,567
Retorno	120	119,733
Retorno	140	140,067
Retorno	160	160,167

Tabela 6 - Quadro resumo para cálculo da histerese.

VR	Média do Avanço	Média do Retorno	Histerese
15	14,867	14,9	0,033
30	29,767	29,667	0,1
45	45,067	44,667	0,4
60	60,067	59,767	0,3
75	75	74,6	0,4
90	89,867	89,5667	0,3
105	104,967	104,567	0,4
120	119,867	119,733	0,1333
140	140,167	140,067	0,1
160	160,233	160,167	0,0667

#### Incerteza Combinada

Através da equação de propagação de incerteza, tem-se que a expressão da incerteza combinada para o manómetro é dada por:

$$U_c(M) = \sqrt{u^2(\Delta t) + u^2(Res(man)) + u^2(Res(padra)) + u^2(h_{pad}) + u^2(Hist)}$$

Repetibilidade:

Incerteza do tipo A

A equação seguinte permite calcular a incerteza tipo A ou a incerteza devido a repetibilidade

$$u(\Delta t) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

onde:

*s*: representa o desvio de padrão das faixas de medição

*n*: representa o número de pontos de calibração

Incerteza herdada do manómetro padrão

Incerteza Herdada do Manómetro Padrão ( $u(h_{pad})$ )

$$u(h_{pad}) = \frac{0,1 \% \text{ Fundo de Escala}}{2} = \frac{0,001 \times 200}{2} = 0,1$$

Resolução do Manómetro Padrão ( $u(Res(padra))$ )

Distribuição: Retangular

$$U(Res(padra)) = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0288$$

Resolução do Manómetro ( $u(Res(man))$ )

Distribuição: retangular

$$u(Res(man)) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,288$$

Cálculo da Histerese

Tabela 7 - Cálculo da histerese.

Faixa	Média do Avanço	Média do Retorno	Histerese
15	14,867	14,9	0,033333
30	29,767	29,667	0,1
45	45,0667	44,667	0,4
60	60,067	59,767	0,3
75	75	74,667	0,333333
90	89,867	89,567	0,3
105	104,9	104,567	0,333333
120	119,867	119,733	0,133333
140	140,1	140,067	0,033333
160	160,233	160,233	0

$$U(hist) = (\overline{Avanço} - \overline{Retorno}) = (29,767 - 29,667) = 0,1$$

$$u(hist) = \frac{U(hist)}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0288$$

Cálculo da Incerteza Combinada do Manómetro

No cálculo da incerteza combinada tem-se o valor

$$\begin{aligned}
 U_c(M) &= \sqrt{u^2(\Delta t) + u^2(Res(man)) + u^2(Res(padra)) + u^2(hpad) + u^2(Hist)} \\
 &= \sqrt{(0,030731815^2) + (0,288675135^2) + (0,02887^2) + (0,1^2) + (0,028867^2)} \\
 &= 0,3097
 \end{aligned}$$

Graus de liberdade efetivos

$$V_{eff} = \left( \frac{U_c(M)}{u(\Delta t)} \right)^4 \quad V_a = \left( \frac{0,3097}{0,0307} \right)^4 (6 - 1) = 51600,84$$

Através da tabela *t- student*, encontramos  $k=2$

Incerteza expandida

$$U = k \times u_c(M) = 2 \times 0,3097 = 0,6194 = 0,62 \text{ bar}$$

Tabela 8 - Quadro resumo com os resultados da calibração.

Ponto					30	bar	
Fonte de incerteza	Estimativa	Ti po	Distribuição	Divisor	Incerteza	Contribuição	GL
Repetibilidade	0,0307318	A	Normal	1	0,030731815	0,030731815	5
Resolução do Padrão	0,1	B	Retangular	3,464101615	0,028867513	0,028867513	9999999
Resolução do manómetro	1	B	Retangular	3,464101615	0,288675135	0,288675135	9999999
Herdada	0,2	B	Normal	2	0,014858333	0,1	9999999
Histerese	0,1	B	Retangular	3,463101615	0,028867513	0,028867513	9999999
Incerteza combinada							0,3097
Graus de liberdade efetivos							51600,84
Fator de abrangência							2
Incerteza Expandida							0,62

## Anexo B

### Código desenvolvido

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue May 30 00:46:38 2017

@author: Emanuel Sousa
"""
from __future__ import division
from __future__ import print_function
import sys, os, time

from PIL import Image
from numpy import *
from scipy.ndimage import distance_transform_edt,label
from scipy.ndimage import filters as filter2
from scipy import misc

from pylab import *
from skimage import filters, feature, morphology
from skimage.transform import (rescale,hough_line,
                               probabilistic_hough_line, hough_circle)
from skimage.draw import circle_perimeter

from os import listdir, getcwd
from os.path import isfile, join, split, splitext

import cv2
from cv2 import cv

from Tkinter import *
import tkinterFileDialog

# funções a usar

def nothing(x):
    pass

def clear():
    print(chr(27)+"[2J]")

%% capturar imagem da câmara
def captureFrame():
    capture = cv2.VideoCapture(0)
    flag=0
    rgb=[]
    cv2.waitKey(100)
    while not flag:
        flag,img = capture.read()
        rgb=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2RGB)
        imshow(rgb)
        capture.release()
    return rgb

%% mostrar planos de cor e cinzento da imagem
def escalaCinzento(img,planoCor=3,flagImage=0):
    # ver planos de cor e cinzento
    dims=shape(img)
    if len(dims)==3:
        cores=['vermelho','verde','azul','Escala cinzentos']
        if flagImage:
            print('\nTem três planos de cor')
            figure(figsize=(12,50))
            for i in range(dims[2]):
                subplot(1,4,i+1)
                imshow(img[:, :,i], cmap='gray')
                title('Plano: '+cores[i])
                axis('off')
            subplot(1,4,4)
            imshow(mean(img,2), cmap='gray')
            axis('off')
            title(cores[3])
            show()
        if planoCor==3:
            ims=mean(img,axis=2)
        else:
            ims=img[:, :,planoCor]
```

```

else:
    if flagImage:
        print('Imagem em escala de cinzentos')
        figure()
        imshow(img)
        axis('off')
        title(cores[3])
        show()
        ims=np.copy(img)
#
return ims

### binarizar a em escala de cinzentos
def binarizarOtsu(ims,flagImage=0):
    im2=filter2.median_filter(ims,3)
    val=filters.threshold_otsu(im2)
    ims=im2<val

    if flagImage:
        print('\nValor Threshold:',val,'\n')
        figure(figsize=(8,16),dpi=96);
        subplot(1,2,1)
        imshow(im2,cmap='gray')
        axis('off')
        title('Escala cinzentos')
        subplot(1,2,2)
        imshow(ims,cmap='binary')
        axis('off')
        title('Binarizada')
        show()
    return ims

### histograma da imagem
def histograma(img,nbins=256,flagImage=1):
    if amax(img)<=1:
        img=uint8(img*255)
    bins=array([sum(img==i) for i in range(nbins)])
    if flagImage:
        figure();
        plot(range(nbins),bins)
        axis([0,nbins+5,0,1.1*max(bins)])
        title('Histograma')
        show()
    return bins

### ler lista de ficheiros de uma pasta
def ler_lista_ficheiros():
    filenames= tkFileDialog.askopenfilenames()
    if type(filenames)!='list':
        filenames=list(filenames)
    return filenames

### escolher a pasta de trabalho
def path_open(path_atual):
    path_atual2=tkFileDialog.askdirectory();
    if len(path_atual2):
        path_atual=path_atual2
    return path_atual

### template matching
def criar_template(dx=100,dy=100,theta=0):
    theta=-theta
    r=1;
    theta=(theta)*np.pi/180;
    mx=cos(theta);
    my=sin(theta);
    xsp=round(r*mx);
    ysp=round(r*my);

    Mxmc=round(dx*abs(mx))+10
    Mymc=round(dy*abs(my))+10
    xmc=round(Mxmc/2.0);
    ymc=round(Mymc/2.0);
    template=zeros((Mymc,Mxmc));
    XXM=max(xmc,ymc)*0.95
    Xxm=-max(xmc,ymc)*0.01
    for i in arange(Xxm,XXM,1):
        X=round(xmc+mx*i);
        Y=round(ymc+my*i);
        template[Y,X]=1;
        template[Y+xsp,X-ysp]=1;
        template[Y-xsp,X+ysp]=1;
    #figure(figsize=(5,5));imshow(template,cmap=cm.gray);axis('image')
    return template

```

```

%% angulo com template matching
def anguloPonteiroTM(img, centroROI=(200,200),raioROI=100,angulos=(-45,225,5),flagImage=1):
    ssMax=[];ssAng=[]
    for i in range(angulos[0],angulos[1],angulos[2]):
        tt=criar_template(dx=2*raioROI,dy=2*raioROI,theta=i)
        dims=shape(tt)
        xx0=centroROI[0]-dims[0]/2
        xx1=centroROI[0]+dims[0]/2
        yy0=centroROI[1]-dims[1]/2
        yy1=centroROI[1]+dims[1]/2
        imgx=img[xx0:xx1,yy0:yy1]
        ss=imgx*tt
        smax=(2*sum(sum(ss))-sum(sum(tt)))/sum(sum(tt))
        ssMax.append(smax);ssAng.append(i)
    if flagImage:
        if len(ssAng)>1:
            print(i,round(smax*100)/100)
            figure();subplot(1,3,1);imshow(tt,cmap=cm.gray);
            title('Template')
            subplot(1,3,2);imshow(img[xx0:xx1,yy0:yy1],cmap=cm.gray)
            title('Zona da imagem')
            subplot(1,3,3);imshow(uint8(tt*127+imgx*127),cmap=cm.gray)
            title('Resultado');show()
        # continue
    if flagImage and len(ssAng)>1:
        figure()
        plot(ssAng,ssMax);axis([min(ssAng),max(ssAng),min(ssMax)*1.05,max(ssMax)*1.05])
        title(u'Perfil da figura de mérito')
        show()
    return [ssAng,ssMax]

%% ROI
def ROI(img,flagImage=0,flagExcesso=-2):
    dims=shape(img) # img deve ser ima imagem binária ou só de 0 e 255
    comprM=min(dims)/2 # Raio máximo=metade da menor dimensão da imagem
    compr=comprM/2 # raio mínimo = metade do raio máximo
    raios = np.arange(compr, comprM,5) # lista de raios a pesquisar
    img3=filters.sobel(img) # imagem de contornos com sobel
    res = hough_circle(img3, raios) # pesquisar círculos
    indRaio, x0, y0 = np.unravel_index(np.argmax(res), res.shape) # resultado melhor!?
    raio=raios[indRaio]+flagExcesso # dar uma margem de -5 pixels para recortar a linha
    x, y = np.indices(shape(img)) # recriar a máscara igual ao círculo
    mask = (x - x0)**2 + (y - y0)**2 < raio**2 # definir a máscara
    result=mask*img # aplicar a máscara para obter a ROI
    if flagImage: # se se pretender mostrar resultados
        figure()
        if flagExcesso<0:
            imshow(result,cmap=cm.gray)
        else:
            imshow(result*0.75+img*(1-mask)*0.20+mask*0.25,cmap=cm.gray)
        axis('image');axis('off')
        plot(y0,x0,'or')
        title(u'Obtenção da ROI')
        show()
    return result,(x0,y0),raio

%% esqueleto
def esqueleto(img,centroROI=(100,100),flagImage=0):
    if amax(img*1.0)<=1:
        img4=morphology.skeletonize(img*255>100) # esqueleto da ROI binária
    else:
        img4=morphology.skeletonize(img>100) # esqueleto da ROI binária
    if flagImage:
        figure(figsize=(8,8));
        imshow(uint8((255-img)*0.5+(1-img4)*127),cmap=cm.gray)
        axis('image');axis('off')
        plot(centroROI[1],centroROI[0],'or')
        title('Esqueleto da ROI')
        show()
    return img4

%% fdtancia entre A e B
def dist(A,B):
    d=array(B)-array(A)
    distancia=sqrt(d[0]**2+d[1]**2)
    return distancia

%% determinação do ângulo do ponteiro
def angulo_ponteiro(img,centroROI=(100,100),raio=100,flagImage=1):
    dims=shape(img)
    C=(centroROI[1],centroROI[0])
    compr=2*raio # comprimento máximo de pesquisa = 2/3 da menor dimensão
    lines=[]
    while len(lines)<1: # parar quando determinar pelo menos um segmento de reta
        compr=compr-2 # diminuir o tamanho do segmento se não encontrar nenhum
        lines= probabilistic_hough_line(

```

```

        img,line_length=compr, line_gap=0);
    if len(lines):
#         if flagImage:
#             print(lines)
        linhas=list(lines)
        for i in range(len(linhas)):
            A=linhas[i][0]
            B=linhas[i][1]
            if dist(A,C)<raio/10 or dist(B,C)<raio/10:
                if dist(A,C)>dist(B,C):
                    lines.remove((A,B))
                    lines.append((C,A))
                else:
                    lines.remove((A,B))
                    lines.append((C,B))
            else:
                lines.remove((A,B))
#         if flagImage:
#             print(linhas)
#             print(lines)
#         print(compr,len(lines))
    if compr<raio/4: return([],[])
    if len(lines)>1:
        print(u'GRAVE: Foram aceites', len(lines), 'linhas')
        print(lines)
        ang=[]
        Px1=[]
        Py1=[]
        Px2=[]
        Py2=[]
        for i in range(len(lines)):
            Px1.append(lines[i][0][0])
            Px2.append(lines[i][1][0])
            Py1.append(lines[i][0][1])
            Py2.append(lines[i][1][1])
            ang.append(arctan2(Py1[-1]-Py2[-1],Px2[-1]-Px1[-1])*180/np.pi)
        # falta decidir que ângulo escolher para o caso de determinar várias retas
        P1=(mean(Px1),mean(Py1))
        P2=(mean(Px2),mean(Py2))
        ang=mean(ang)
    else:
        P1=lines[0][0]
        P2=lines[0][1]
        ang=arctan2(P1[1]-P2[1],P2[0]-P1[0])*180/np.pi

    if ang<-90:
        ang=ang+360;
    if flagImage:
        figure()
        imshow(img,cmap=cm.gray);
        axis('image');
        axis('off')
        for i in range(len(lines)):
            plot([lines[i][0][0],lines[i][1][0]],[lines[i][0][1],lines[i][1][1]],'-g')
        plot([P1[0], P2[0]],[P1[1], P2[1]],'-r');
        title('Transformada de linhas')
        show()
    return ang,(P1,P2)

%% PROGRAMA PRINCIPAL
pathname="C:\\Users\\Emanuel Sousa\\Desktop\\Projecto\\Base\\Imagens\\"

extensoes=['.jpg', '.rgb', '.png']
pathname=getcwd()
pathname=pathname+'\\images2'
print('Pasta de trabalho actual: ', pathname)
#pathname=path_open(pathname)
print('Pasta de trabalho actual: ', pathname)
files=[f for f in listdir(pathname) if isfile(join(pathname,f))]

print(files)

for j in files:
    existe=sum([splitext(j).count(extensoes[k]) for k in range(len(extensoes))])
    if existe:
        # TAREFAS

        print('\nTAREFA 1 - LER IMAGEM')
        InputFilename=pathname+'/' +j
        print('\n\n',InputFilename)
        print("\n", (2+len(j))*"-", "\n", j, "\n", (2+len(j))*"-", "\n")
        #img = cv2.imread(InputFilename,1)
        img=imread(InputFilename)
        dims=shape(img)
        fs=800/dims[1]

```

```

print('\nTAREFA 2 - ESCALAR IMAGEM')
print('Tamanho da imagem:',dims,'\nFactor de escala:',fs)
img=rescale(img,fs)
#figure(); imshow(img);show() # carregou a imagem e mostra

print('\nTAREFA 3 - ESCOLHA DO PLANO DE COR')
img1=escalaCinzeno(img, planoCor=0) # mostrar planos de cor e cinzeno
# afinar ponto 3 planoCor=??

print('\nTAREFA 4 - HISTOGRAMA E BINARIZAÇÃO')
histograma(img1,nbins=255,flagImage=0) # mostra o histograma
img20=binarizarOtshu(img1,flagImage=0) # binarização com o Otshu
img2=morphology.binary_closing(img20,morphology.disk(6))
figure(figsize=(9,3));
subplot(1,3,1);imshow(img);axis('off');
subplot(1,3,2);imshow(img20,cmap=cm.gray);axis('off');
subplot(1,3,3);imshow(img2,cmap=cm.gray);axis('off');
show()
# afinar ponto 1 morphology.disk(??)

print('\nTAREFA 5 - DETERMINAÇÃO DA ROI')
img3,centro,raio=ROI(img2,flagExcesso=10,flagImage=0)
img3,centro,raio=ROI(img3,flagExcesso=-20,flagImage=1)
# afinar ponto 2 flagExcesso=-??

print('\nTAREFA 5a - ESQUELETO DA ROI')
img4=esqueleto(img3,centro,flagImage=0)

print('\nTAREFA 6a - PONTEIRO: transformada de linhas na ROI')
theta1,retas=angulo_ponteiro(img3,centro,raio,flagImage=0)
print('\n','Posição:\t',round(theta1*100)/100,'graus')
#figure();imshow(img3,cmap=cm.gray);show()

print('\nTAREFA 6b - PONTEIRO: transformada de linhas no esqueleto da ROI')
img5=morphology.binary_dilation(img4,morphology.disk(3))
theta2,retas2=angulo_ponteiro(img5,centro,raio,flagImage=0)
print('\n','Posição:\t',round(theta2*100)/100,'graus')

print('\nTAREFA 6c - PONTEIRO: template matching')
# template matching implementação nossa
res1=anguloPonteiroTM(img3,
    angulos=(-60,240,5),
    centroROI=centro,
    raioROI=raio,
    flagImage=0)
theta3=res1[0][find(res1[1]==max(res1[1]))[0]]
print('\nPrimeira passagem:',theta3)
res2=anguloPonteiroTM(img3,
    angulos=(theta3-5,theta3+6,1),
    centroROI=centro,
    raioROI=raio,
    flagImage=0)
theta4=res2[0][find(res2[1]==max(res2[1]))[0]]
print('\nSegunda passagem:',theta4,'graus')
res3=anguloPonteiroTM(img3,
    angulos=(theta4,theta4+1,1),
    centroROI=centro,
    raioROI=raio,
    flagImage=0)

figure(figsize(9,3))
P1,P2=retas
subplot(1,3,1);imshow(img3,cmap=cm.gray);axis('image');axis('off');plot([P1[0], P2[0]],[P1[1], P2[1]],'-r');
title('Transformada de linhas - ROI: '+str(round(theta1*100)/100)+' graus')
P1,P2=retas2
subplot(1,3,2);imshow(img3,cmap=cm.gray);axis('image');axis('off');plot([P1[0], P2[0]],[P1[1], P2[1]],'-r');
title('Transformada de linhas - esqueleto ROI: '+str(round(theta2*100)/100)+' graus')
P1=(centro[1],centro[0]); P2=(P1[0]+raio*cos(theta4*pi/180),P1[1]-raio*sin(theta4*pi/180))
subplot(1,3,3);imshow(img3,cmap=cm.gray);axis('image');axis('off');plot([P1[0], P2[0]],[P1[1], P2[1]],'-r');
title('Template matching: '+str(round(theta3*100)/100)+' graus')
show()

print('\n\n','-*10,'Final do processamento','-*10)

```