

Sistema de suporte ao processo de alinhamento de lentes

RUI PEDRO MAIA OLIVEIRA DA LUZ CARVALHO

setembro de 2020



Sistema de suporte ao processo de alinhamento de lentes

Rui Pedro Maia Oliveira da Luz Carvalho
1121093

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas Autónomos
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

2020



Dissertação, para satisfação parcial dos requisitos do Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Rui Pedro Maia Oliveira da Luz Carvalho
1121093

Orientador: André Miguel Pinheiro Dias

Coorientador: Maria Arcelina Marques

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Sistemas Autónomos
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto

3 de Setembro de 2020

Agradecimentos

Quero agradecer disponibilidade da empresa Leica por me permitir realizar a Tese de Mestrado nas suas instalações e de me colocar todos os meios à disposição. À pessoa de Nuno Barros por me apresentar um projeto de melhoria para a empresa, ao José António por me disponibilizar a máquina e colaborador, ao Nuno Moreira e Joel Vieira na ajuda do desenho de um protótipo e pelos conselhos incríveis do Senhor Fernando. Gostaria de destacar dois nomes, ajuda detalhada e preocupada do José Cardoso para me ensinar o seu trabalho na máquina e como esta funciona, e por fim ao Ricardo Costa por me alertar e fazer ver sempre o lado mais simples e prático das coisas.

Ao meu orientador André Dias e coorientador Maria Arcelina por me acompanharem neste projeto.

Aos meus amigos por acreditarem em mim e por me ampararem quando precisei.

À Ana por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

Por fim, aos meus pais, por todo o esforço e sacrifício para que tivesse a formação académica que não lhes foi proporcionada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Resumo

A necessidade crescente de obtenção de melhores imagens, leva a criação de lentes mais complexas, o que obriga a que existam mais cuidados na sua produção, de forma a evitar aberrações nas imagens. Consciente desses desafios a empresa Leica identifica lacunas no seu processo que visa minimizar com esta dissertação, colocando ao dispor os seus melhores profissionais na validação no processo desenvolvido.

A qualidade de uma lente depende do processo de alinhamento entre as várias superfícies óticas e a superfície exterior que a reveste. Atualmente, o processo de alinhamento de todos os elementos que constituem uma lente encontra-se ultrapassado, apresentando dificuldades em responder aos crescentes desafios óticos e mecânicos, para além de requerer a presença de um operador experiente para efetuar esse alinhamento. O desenvolvimento de ferramentas tecnológicas permitirá aumentar a sua eficiência e libertar o operador de trabalhos repetitivos prejudiciais à sua saúde.

Na dissertação propomos o desenvolvimento de um sistema de suporte ao processo manual ao criar um sistema de visão que ira supervisionar e ajudar o operador no processo de alinhamento de lentes.

É desenvolvido um algoritmo de identificação de desvios das várias superfícies óticas que constituem uma lente.

Com base em técnicas de processamento de imagem e de Inteligência Artificial (AI), são desenvolvidos algoritmos de previsão para estimar as posições que correspondam ao alinhamento de todas as superfícies óticas. A partir desta previsão será possível quantificar rigorosamente o sentido e a grandeza dos desvios, e assim fornecer ordens precisas para o sistema de alinhamento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Abstract

The need to have better images, had consequences on the development of the lenses making them more complex. The Leica company is aware of these challenges when identifying gaps in its process that it aims to minimize with this dissertation, providing the best professionals in the validation of the developed process.

The lens quality depends on alignment process between each optical surface and between the outer surface of the lens. Currently, the process used in the company is already obsolete and presents great difficulties to give a great answer to the growing optical and mechanical challenges. In addition, this machine must have an experienced worker working to do a correct alignment of all lens parts. The development of technological tools will allow you to increase your efficiency and free the operator from repetitive work harmful to your health.

In the dissertation it is proposed the development of a support system for the manual process by creating a vision system that will supervise and assist the operator in the lens alignment process.

An algorithm was developed to identify deviations from optical surfaces in the lenses.

Based on image processing techniques and Artificial Intelligence (AI), prediction algorithms are developed to find the alignment of all optical surfaces. From this forecast, it will be possible to accurately quantify the direction and magnitude of the deviations, and thus provide precise orders for the alignment system.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.1.1 Mecânica	2
1.1.2 Ótica	2
1.1.3 Software	2
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Solução existente	5
2.2 Soluções comerciais existentes no mercado	8
2.2.1 ATS 100	9
2.2.2 ATS 200	9
2.3 Métodos de inspeção	12
2.3.1 Inspeção por contacto	12

2.3.2	Inspeção sem contacto	12
2.4	Machine Learning	13
2.4.1	Aprendizagem Supervisionada	14
2.4.2	Aprendizagem Não Supervisionada	19
2.5	Time Analysis	23
3	Fundamentos Teóricos	27
3.1	Montagem de Lentes	27
3.2	Princípio de medição de erro de alinhamento de uma lente	37
3.2.1	Interferometria	38
3.2.2	Autocolimação	41
3.2.3	Medição por Transmissão	46
3.2.4	Medição e Alinhamento de conjuntos óticos através do torneamento	48
3.3	Isogyre	50
3.4	Aberrações Óticas	62
4	Implementação e Resultados	65
4.1	Protótipo Proposto	66
4.2	Processamento de Imagem	69
4.3	Modelo de Previsão	80
4.3.1	Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)	81
4.3.2	K-nearest Neighbors Algorithm (KNN)	86
5	Conclusão e Trabalho Futuro	89
	Bibliografia	91

Lista de Figuras

2.1	Fluxograma do processo de alinhamento de uma superfície ótica.	7
2.2	Solução Existente na empresa Leica	8
2.3	ATS 100 [1]	10
2.4	Monitor Touch para otimizar torneamento da lente.[1]	11
2.5	Exemplo de um gráfico de <i>Linear Regression</i>	16
2.6	Exemplo de Decision Tree	17
2.7	Exemplo de previsão do valor 1 segundo o modelo <i>Random Forest</i>	17
2.8	Exemplo de <i>3-Nearest Neighbour Classification</i>	18
2.9	Padrão Standard do algoritmo <i>KNN</i>	19
2.10	Exemplo de aplicação da técnica de aprendizagem não supervisionada. (a) Bebê com animal de estimação. (b) Cão de amigo.[2]	20
2.11	Correlação linear entre a distância percorrida e a duração.[3]	21
2.12	Relação da distância percorrida e duração com o número de dias depois da última sessão de treinos.[3]	22
2.13	Resultados obtidos com aplicação do algoritmo <i>K-means</i> para $K=5$. [3]	22
3.1	Relação entre linha de referência e eixo ótico.[4]	28
3.2	Casos de lentes descentradas em relação ao eixo de referência.[4]	30
3.3	Lente com duas superfícies óticas coladas.	31
3.4	Comum processo de polimento de uma lente.[4]	32
3.5	Lentes desalinhadas durante o processo de polimento.[4]	33
3.6	Processo de análise quanto ao alinhamento da lente.[4]	34
3.7	Processo de alinhamento de lente por reflexão. [5]	35
3.8	Processo de análise quanto ao alinhamento de uma lente, com recurso a um autocolimador. [5]	36

3.9	Alinhamento com recurso a uma CNC.[5]	37
3.10	Técnica de Interferência por duas fendas.[6]	38
3.11	Conceito de Moiré.[7]	39
3.12	Interferómetro de Fizeau.[8]	40
3.13	Técnica de medição de uma lente com auxílio de um autocolimador eletrónico. [9]	42
3.14	Autocolimador.[10]	43
3.15	Análise quanto ao erro de alinhamento da primeira superfície ótica.[10]	44
3.16	Análise quanto ao erro de alinhamento da segunda superfície ótica.	45
3.17	Medição por transmissão.[11]	46
3.18	Eixo ótico desalinhado em relação ao eixo mecânico. [11]	48
3.19	(a) Eixo ótico desalinhado com o eixo mecânico, (b) casquilho alinhado com a lente e (c) casquilho maquinado na posição de alimento. [11]	49
3.20	Setup ótico do modelo <i>Isogyre</i> com as respetivas coordenadas.[12]	50
3.21	(a) lente sem erros, (b) lente inclinada e (c) lente descentrada. [12]	53
3.22	Contorno <i>Isogyre</i> (a) uma lente plano-convexa alinhada e (b) lente plano- convexa inclinada. [12]	55
3.23	Função de inspeção para inclinações em diferentes superfícies de lentes plano-convexas. [12]	57
3.24	Função de inspeção para inclinações de superfícies de lentes plano-convexas com diferentes índices de refração.[12]	58
3.25	Função de inspeção para superfícies não alinhadas que fazem parte de lentes plano-convexas com diferentes índices de refração. [12]	59
3.26	Sistema ótico de inspeção automática. [12]	59
3.27	Base do sistema ótico de inspeção automática. [12]	60
3.28	Sistema ótico de inspeção automática. [12]	61
3.29	Aberração Cromática. [13]	62
3.30	Aberração Coma. [13]	63
3.31	(a) Lente com eixo ótico deslocado. (b) Lente com eixo ótico inclinado.[13]	64
4.1	Sistema de rotação da lente a ser alinhada.	67
4.2	Mecanismo de inclinação e deslocamento.	68
4.3	Protótipo projetado.	69
4.4	(a) Imagem original.(b) Imagem após binarização.	71

4.5	RQT-Graph dos nodes desenvolvidos.	72
4.6	Imagem que representa o centro centro da cruz num dado momento. . . .	74
4.7	Dados recolhidos sem processamento.	75
4.8	Eixos de uma Elipse.	76
4.9	Elipses criadas a partir de quatro pontos.	77
4.10	Distância entre Centros das Elipses.	79
4.11	Centros das Elipses.	80
4.12	Relação das coordenadas Esperadas (cor azul) com as Previstas (cor laranja) ao longo do número de observações. a) Relação entre coordenadas em X esperadas e previstas. b) Relação entre coordenadas em Y esperadas e previstas.	83
4.13	Valores esperados vs valores previstos ao longo do número de observações.	84
4.14	Coordenadas dos Centros esperados vs os Previstos.	85
4.15	Relação das coordenadas Esperadas (cor azul) com as Previstas (cor laranja) ao longo do número de observações. a) Relação entre coordenadas em X esperadas e previstas. b) Relação entre coordenadas em Y esperadas e previstas.	87
4.16	Coordenadas dos Centros Esperados e Previstos, com um erro máximo em X e Y de de $0.46875 \mu m$	88

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Tabelas

- 4.1 Coordenadas Esperadas e Previstas segundo o Modelo de Previsão ARIMA. 85
- 4.2 Coordenadas Esperadas e Previstas segundo o Modelo de Previsão KNN. 88

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Siglas e Acrónimos

ASV Autonomouns Surface Vehicle

CCD Charge-Coupled Device

EKF Extended Kalman Filter

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

IMU Inertial Measurement Unit

IIQ Intervalo Interquartil

LED Light Emitting Diode

ETD Edge Thickness Difference

OD Out Diameter

ID Inside Diameter

CNC centragem controlado por computador

MATLAB MATrix LABoratory

ROS Robot Operating System

OpenCV Open Source Computer Vision Library

ARIMA Autoregressive Integrated Moving Average

KNN K-nearest Neighbors Algorithm

UV Ultravioleta

DL Deep Learning

ML Machine Learning

RNN Recurrent Neural Network

VAR Vector Autoregression

GARCH Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity

ARCH Autoregressive Conditional Heteroskedasticity

LSTM Long-short term memory

AR Autogressive

MA Moving Average

TSA Time Series Analysis

Capítulo 1

Introdução

A criação da primeira objetiva foi realizada por Charles Chevalier pouco tempo depois de ter sido inventado a fotografia em 1839. A partir dessa invenção, iniciou-se a busca de imagens cada vez mais parecidas com a realidade. As recentes evoluções verificadas no mundo da fotografia têm contribuído para a evolução das objetivas, nomeadamente ao nível das lentes. A necessidade de melhores imagens para todo o tipo de ambientes, provocou a utilização de diferentes materiais na construção das lentes. Desde a criação da lente, que a articulação entre a superfície ótica e o material que a reveste foi o principal problema na obtenção de boas imagens, devido à dificuldade de alinhamento entre estas superfícies. Ainda para mais com o crescente aumento do número de superfícies óticas.

Devido aos motivos anteriores, a empresa Leica identificou deficiências no seu processo de alinhamento de lentes, tornando-se necessário evolui-lo de forma a torná-lo mais autónomo, intuitivo para o operário e menos sujeito a falhas. Neste sentido a dissertação procura desenvolver um equipamento mais preciso no alinhamento entre superfícies óticas, reduzir tempos de processo, erros, e libertar o operário da tarefa repetitiva e desgastante do alinhamento lentes.

Apesar de existir alguns produtos no mercado capazes de efectuar o auto alinhamento das lentes, esta tecnologia é bastante dispendiosa pelo fato de existirem poucas empresas capazes de produzir lentes.

1.1 Motivação

A dissertação será desenvolvida na empresa Leica o que possibilita trabalhar numa área onde possa aplicar novas tecnologia no desenvolvimento de um produto com tantos cuidados na sua fabricação. A abrangência deste trabalho foi outra grande motivação, pois permite trabalhar em áreas como Mecânica, Ótica e Software.

1.1.1 Mecânica

Desenvolvimento de um protótipo que consiga se ajustar suavemente à posição mais adequada de todas as superfícies que constituem a lente. Esta mecânica terá de permitir oscilações em vários eixos e identificar a posição de cada superfície ótica. Isto para que se garanta que todas elas se encontram perfeitamente alinhadas entre si. O grande objetivo passa por conseguir a construção mecânica de uma forma mais económica e utilizando mecanismos existentes na empresa.

1.1.2 Ótica

O melhoramento ótico deste tipo de produto tem crescido desde a sua invenção, existindo atualmente diversas lentes para diferentes situações. Como tal, cada vez mais é possível encontrar numa lente diferentes tipos de superfícies óticas, o que acarreta um conhecimento profundo do percurso que a luz percorre ao passar pelas várias superfícies.

1.1.3 Software

Criação de um algoritmo de identificação dos desvios existentes entre superfícies óticas, permitindo retirar dados úteis para o operador ao longo do processo de alinhamento. Com base nos dados recolhidos, desenvolver algoritmos de previsão que permitam estimar posições de alinhamento de superfícies óticas, possibilitando futuramente utilizar esses dados em atuadores tornando o sistema autónomo.

1.2 Objectivos

A dissertação visa responder à necessidade de desenvolver um sistema de suporte para o processo de alinhamento das várias superfícies óticas que fazem parte de uma lente, tendo como objectivo apresentar uma solução tecnológica que possibilite o alinhamento mais preciso e mais rápido. Para além destes, a necessidade de se perceber os fenómenos

que se desenrolam ao longo do processo de alinhamento. Como tal, para desenvolver este projeto será necessário alcançar os seguintes objectivos:

- Analisar as várias soluções existentes no mercado e comparar com a solução existente;
- Compreender os fenómenos óticos que estarão na base do alinhamento das várias superfícies óticas da lente;
- Implementação de um algoritmo de análise de potenciais desvios entre as superfícies óticas existentes, bem como, com a superfície exterior da lente.
- Previsão de estados futuros que permitam o alinhamento da lente.
- Desenvolvimento de uma framework de processamento de imagem responsável pela caracterização do desvio existente e ajudar o operador no processo de alinhamento.

1.3 Estrutura

Esta dissertação é dividida segundo 6 capítulos.

O primeiro destina-se a detalhar as razões e os objetivos que esta dissertação se propõem responder.

A secção seguinte pretende a identificar os prós e os contras das tecnologias existentes no mercado, com a que é utilizada na empresa. E para além disso nesta área são detalhadas várias técnicas de previsão que podem servir de base na criação de algoritmos de alinhamento.

No terceiro capítulo são detalhados os conceitos e fundamentos óticos que servem de base para o alinhamento ótico de uma lente. Evidencia as consequências numa imagem adquirida com lentes desalinhadas.

No quarto capítulo é aprofundado o trabalho levado a cabo e os resultados obtidos com a dissertação .

Por último, o sexto capítulo é destinado às conclusões e ao trabalho a desenvolver no futuro.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo iremos discutir a solução existente na empresa Leica, descrevendo as suas funcionalidades e problemas que motivam o projeto descrito nesta dissertação.

De seguida, é apresentado um conjunto de equipamentos e técnicas existentes no mercado que permitem efetuar o alinhamento ótico de uma lente. Serão explicadas as suas características e técnicas utilizadas no alinhamento de diferentes tipos de lentes.

Consequentemente neste capítulo são detalhadas várias formas existentes aos dias de hoje de estimação da posição com recurso a técnicas de previsão.

Por último, são apresentadas as consequências do desalinhamento entre as várias superfícies óticas e o revestimento de uma lente.

2.1 Solução existente

A empresa possui um sistema equipado com um torno de correção de desvios existentes entre os vários elementos que constituem uma lente.

A lente é colocada numa garra que é fixa ao mecanismo que acompanha o movimento de rotação do motor. O motor é equipado por uma embraiagem para poder atingir velocidades baixas de forma a identificar o erro de alinhamento e velocidades elevadas para torneir a lente. Para além da lente se encontrar fixa a uma estrutura que possibilita a sua rotação, a peça mecânica encontra-se livre de movimentos laterais e verticais. Esta solução utiliza um sistema de ar comprimido que é acionado para fixar a peça mecânica, evitando existência de movimentos indesejáveis. O recurso ao ar comprimido a 3 Bar, permite deslocar a estrutura uniformemente para uma posição desejada sem que exista oscilações indesejadas da estrutura mecânica. Como a lente se encontra fixa a essa estrutura mecânica, torna-se possível ao deslocar-la produzir o mesmo movimento para

a lente. O ajuste posicional é feito com recurso a pequenos batimentos produzidos pelo operador na estrutura mecânica que sustenta a lente. Esses batimentos necessitam de ser bastante precisos, já que estamos a falar de deslocamentos de micrómetros.

Do lado direito da imagem 2.2, está presente o sistema responsável por medir o alinhamento das lentes, constituído por um revolver de objetivas, um autocolimador e uma câmara analógica. Como as lentes são constituídas por diferentes superfícies óticas com pontos focais diferentes, a utilização de um sistema de objetivas que permita alterar para a objetiva que melhor se adequa para inspecionar uma dada superfície, permite otimizar e reduzir o tempo de processo. Dessa forma, toda a estrutura do lado direito da imagem 2.2 está sob uma superfície mecânica que pode ser movida ao longo de uma guia linear, permitindo assim aproximar ou distanciar mediante o ponto focal de cada superfície ótica. O autocolimador presente nessa estrutura amovível, faz uso de um retículo e uma luz para permitir que o feixe que atravessa esse retículo incida na superfície ótica e seja vista pela câmara. Retículo esse com a forma geométrica de uma cruz, para a identificar é utilizado uma câmara analógica conectada a um monitor para acompanhar o processo ao longo das várias superfícies de uma lente. A cruz é projetada sob um referencial 2D que resulta da reflexão da luz na lente. Caso exista um erro de alinhamento, verifica-se a cruz em movimento, isto enquanto a lente gira em torno de si. Uma superfície ótica encontra-se alinhada quando a cruz se encontra parada, significando que o eixo ótico e o eixo mecânico da máquina estão coincidentes.

Para proceder ao alinhamento de uma superfície ótica, o operador aplica pequenos batimentos com uma peça metálica no mecanismo que fixa a lente de forma a inclina-la ou desloca-la, parte esquerda da figura 2.2. Como o objetivo é parar ou minimizar ao máximo a oscilação da cruz, este processo tem de ser efetuado para cada superfície ótica, segundo o fluxograma presente na figura 2.1.

Assim, estando todas as superfícies óticas paradas significa que os eixos óticos de cada uma das superfícies óticas que constituem a lente se encontram coincidentes com o eixo mecânico. A partir desse momento o operador aumenta a velocidade de rotação do motor e aproxima a ferramenta de torneamento da lente cuidadosamente, e tornea a lente segundo a posição encontrada para eliminar o erro verificado, garantindo assim a coincidência entre eixos. Esta máquina tem vários anos de funcionamento o que já vem evidenciando algum desgaste em alguns pontos, tais como folgas devido às forças aplicadas durante o torneamento. Para além disso, trata-se de uma tecnologia bastante antiga onde requer muita perícia do operador, o que pode levar por vezes ao surgimento de erros caso este não esteja bem familiarizado com o equipamento, nomeadamente no batimento na superfície mecânica para deslocar a lente para o ponto pretendido. A sua

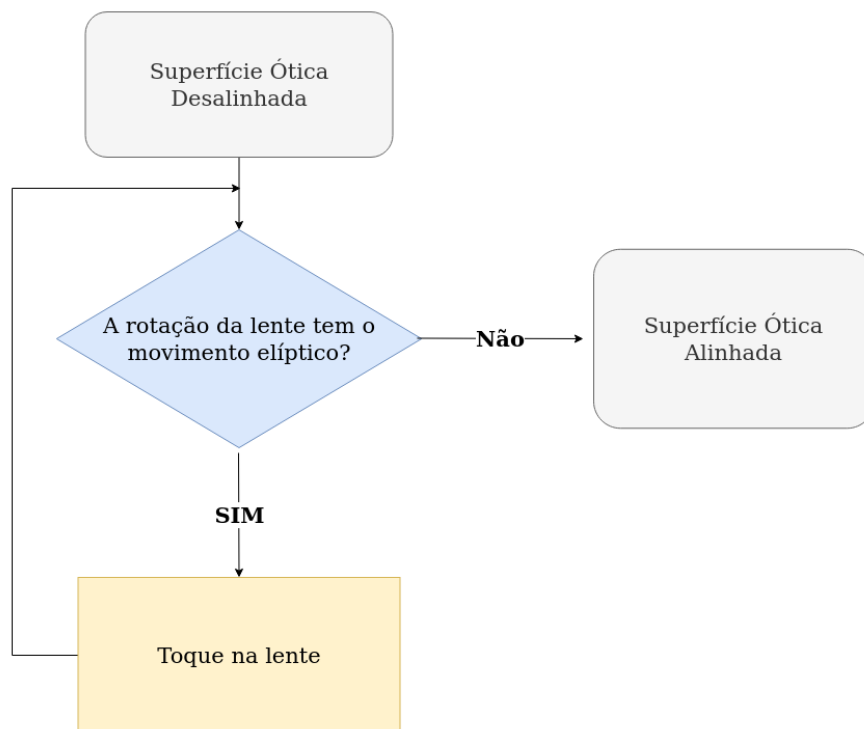


Figura 2.1: Fluxograma do processo de alinhamento de uma superfície ótica.

eficácia depende sobretudo da experiência adquirida ao longo dos anos, não se baseando em dados óticos nem matemáticos para sustentar a força e direção desse batimento.



Figura 2.2: Solução Existente na empresa Leica

2.2 Soluções comerciais existentes no mercado

O alinhamento ótico de uma lente é um mercado muito próprio devido à sua complexidade de manuseamento. O número de fabricantes a nível mundial é bastante reduzido o que leva a que este tipo de conhecimentos esteja num circuito bastante fechado, sobretudo ao nível de técnicas e máquinas utilizadas nos processos. Apesar da tecnologia atual permitir o aparecimento de soluções mais robustas e precisas do que a solução apresentada na figura 2.2, o fabrico desse tipo de máquinas está ao alcance de poucas empresas a nível Mundial. Uma das mais conhecidas, ou se não o mais importante neste mercado é a **Trioptics**. Seguidamente, são apresentados dois produtos deste fabricante e detalhado dois métodos de medição de inclinação e desfasamento de centros óticos em lentes.

As máquinas que são descritas nesta secção são bastante idênticas ao nível de funcionalidades, diferenciando-se nos tamanhos das lentes em que operam. Para além disso, ambas são equipadas por um software que agrega funcionalidades de medição do erro, de alinhamento e torneamento da peça.

2.2.1 ATS 100

A ATS 100 é uma unidade de alinhamento que recorre ao torneamento otimizado para a produção em série. Pode ser usada em produtos cujo diâmetro máximo seja de 100 mm e o peso não exceda os 3kg. De fabrico rápido, permite que os dados referentes a cada superfície sejam importados rapidamente. Com uma precisão é de excelência, consegue garantir precisões inferiores a $2.5 \mu\text{m}$ ao alinhar o eixo mecânico do suporte com o eixo ótico de cada superfície ótica.

Ao nível de espaço ocupado, a *ATS 100*, tem um 1.0 m x 1.0 m e uma altura de 2.0 m, o que para uma unidade fabril é bastante vantajoso. A sua base é constituída por um composto mineral robusto e bastante estável, evitando oscilações indesejáveis para o processo de medição e de torneamento. Para realizar a missão a que se destina a *ATS 100*, está equipada com uma plataforma automática de alinhamento *chuck*, rolamentos de rolos de alta precisão, autocolimador e outras tecnologias de medição. Para que a área de trabalho se encontre limpa, a *ATS 100* possui um sistema de extração a vácuo das limalhas que são depositadas durante o processo de torneamento das peças. A ferramenta de torneamento permite trabalhar peças que sejam constituídas por latão, alumínio e aço. Para além disso possui um sistema de medição de temperatura de modo a garantir o processo de torneamento eficiente e contínuo.

Utiliza um software robusto que articula a capacidade de medição, o ajuste e o torneamento da peça. Para medição das superfícies óticas que constituem uma lente, recorre a um autocolimado equipado com um software de análise designado de *MultiLens*. Inclui sensores de distância tátil ou ótico para garantir maior precisão no processo de torneamento. A *ATS 100*, figura 2.3, foi concebida na vertical, para evitar inclinações no fuso durante o torneamento e o mais fácil manuseamento da peça. Os eixos presentes na máquina, são aerostáticos de forma a garantir precisão e evitar desgaste.

2.2.2 ATS 200

A *ATS 200* é destinada para as mesmas funções que a *ATS 100*, contudo esta máquina permite o alinhamento de um leque mais alargado de lentes. Isto é, com a *ATS 200* é possível o alinhamento de lentes até um diâmetro e peso máximo de 150 mm e 5kg, respetivamente. Conseguindo atingir uma precisão a rondar entre $1 \mu\text{m}$ e $0.5 \mu\text{m}$, com a variante *ATS 200 UP*. Por último, ao contrário da *ATS 100*, contem dois sensores de medição: um de contato e um ótico de forma a obter medições ainda mais precisas da geometria da lente.

Os seus eixos são equipados com suporte de rolamentos livres de atrito e com motores



Figura 2.3: ATS 100 [1]

lineares de alta precisão. Que permite a obtenção da posição desejada suave e precisa.

A *ATS 200 UP* é uma variante da *ATS 200*, bastante similar ao nível da sua estrutura básica. Contudo, esta variante, apresenta uma precisão ainda maior em comparação com a *ATS 200*. Equipado com fusos extremamente estáveis e com mancais hidrostáticos, a sua rigidez e amortecimento provocam um aumento significativo na sua precisão, cerca de $0.5 \mu\text{m}$.

A família ATS é equipada com um software de medição destinado ao processo produtivo, *ATS Control Software*. A sua grande vantagem é gerir o volume de produções, efetua as medições necessárias para deslocar a ferramenta de maquinação de forma automática e monitorizar os seus resultados. Para além disso, o software disponibiliza uma ferramenta de controlo, onde indica todas as etapas ao utilizador durante o processo. No final destas serem concluídas, é disponibilizado um relatório de inspeção com todas as tolerâncias alcançadas. Este equipamento dispõe de um monitor touch para facilitar a inserção desses mesmos dados, figura 2.4. De forma a otimizar o tempo de produção este software calcula o melhor curso a descrever pela ferramenta de maquinação.

A *Trioptics* disponibiliza ainda funcionalidades extras para estas duas máquinas, como a inclusão de um autocolimador adicional situado na parte inferior da base, de forma a medir simultaneamente duas superfícies óticas de uma lente. Permitindo obter mais dados sobre a inclinação da lente. Também a inclusão de um autocolimador extra

possibilita a medição de lentes infravermelhas. É possível requerer este equipamento com um sensor ótico, para medir a geometria da lente sem que haja contacto, antes e depois do processo de torneamento. Outra funcionalidade que pode equipar este produto, é a inclusão de um revólver automático superior. Isto para que se reduza tempo na alteração das lentes de focagem. Para o fabrico de lentes asféricas, é disponível um sensor para alinhar o eixo ótico da lente com o eixo mecânico.



Figura 2.4: Monitor Touch para otimizar torneamento da lente.[1]

2.3 Métodos de inspeção

O método descrito nesta secção pretende tornar o processo de identificação de erros de alinhamento, nomeadamente ao nível do desfasamento e da inclinações, mais rápido. Adequando essa inspeção às necessidades de produções cada vez maiores e mais exigentes.

Para avaliar a qualidade da lente existem dois métodos de inspeção das várias superfícies óticas que a constituem, a inspeção por contacto e sem contacto.

2.3.1 Inspeção por contacto

O método por contacto, tal como o nome indica utiliza o contacto com a lente para inspecionar a superfície, é capaz de fornecer medições de vários nanómetros. Contudo este método requer elevadíssima precisão para entrar em contacto com a lente o que faz com que se torne um método bastante dispendioso.

2.3.2 Inspeção sem contacto

O método de inspeção sem contacto utiliza um interferómetro com um sistema de imagem para medir a geometria da superfície ótica. A inclinação da lente e o desfasamento são medidos com recurso a uma autocolimador. O sistema de processamento de imagem é usado para quantificar as imperfeições existentes nas superfícies óticas, nas direções, nos valores das inclinações e no desalinhamento.

Esta técnica utiliza uma câmara digital para efetuar o processamento das imagens captadas, possuindo um programa de análise de imagem para localizar os centros geométricos e óticos. Uma função de inspeção para calcular as imperfeições existente na lente, nomeadamente ao nível do desfasamento e da inclinação. Este método permite obter medições em 0.78s, com precisão na inclinação na ordem dos $0.14^\circ/\text{pixel}$ e no desalinhamento, cerca de $33\ \mu\text{m}/\text{pixel}$. Este método é rápido, económico, fácil de ser aplicado a projetos académicos e em aplicações industriais já que consegue fazer milhares de medições diariamente.

No capítulo Fundamentos Teóricos, contam a explicação do conceito *Isogyre* utilizado com este método, bem como os princípios de medição com Interferómetros e Autocolimadores.

2.4 Machine Learning

O *Machine Learning* (*ML*) é um método de análise de dados constituído por uma série de modelos matemáticos que possibilita aprendizagem de máquinas. O seu aparecimento deveu-se à tomada de consciência de que os computadores podem aprender a realizar tarefas específicas, que eram realizadas apenas por humanos, levando ao surgimento de estudos de que as máquinas eram capazes de apreender através de dados analíticos. A partir de um conjunto de dados é possível treinar uma máquina a que quando sujeita a novos dados consiga dar uma resposta com base no treino efetuado. Apesar de não ser uma tecnologia nova, nos últimos anos tem vindo a ter maior importância e visibilidade devido a capacidade de aplicar cálculos matemáticos complexos a grandes quantidades de dados (big data). Hoje em dia estamos rodeados de aplicações de *ML* tais como: Carros autónomos, Publicidades na Amazon ou Netflix, Detecção de fraudes, Identificação de nomes no Twitter.

A diferença entre o conceito Inteligência Artificial *IA* e *ML* é que a *IA* é a ciência dos computadores que imita comportamentos dos humanos, enquanto que a *ML* são os vários modos de como as máquinas apreendem a partir de dados. [14]

O *ML* é constituído por uma série de métodos que se adequa a diferentes circunstâncias, sendo divididos em quatro tipos de aprendizagens:

- Aprendizagem supervisionada.
- Aprendizagem não supervisionada.
- Aprendizagem semi-supervisionada.
- Aprendizagem por reforço.

A aprendizagem supervisionada utiliza dados para treinar modelos que já possuem dados desejados, recebe um conjunto informação como dados de entrada correspondentes e aprende comparando esses dados reais com os previstos. A aprendizagem não supervisionada, utiliza dados que não possuem informações prévias, o que equivale dizer que a resposta é dada ao sistema, e este responde de acordo com as estruturas que consegue encontrar nos dados utilizados. O terceiro item, é aprendizagem semi-supervisionada que apresenta semelhanças com aprendizagem supervisionada, já que são utilizadas nas mesmas aplicações, com a diferença que utiliza dados que contem informações prévias desejadas e dados que não têm qualquer tipo de informação prévia para treinar. Assim sendo, para treinar os modelos, a quantidade de dados de saída são substancialmente inferiores aos dados que não contem qualquer informação prévia, isto devido aos dados sem

informação prévia serem menos pesados computacionalmente. Este tipo de aprendizagem pode ser utilizada em métodos de classificação, regressão e previsão, sendo bastante úteis em situações em que o custo de classificação é bastante elevado, como é o caso da identificação de uma pessoa através de uma webcam. A última categoria é aprendizagem por esforço, bastante utilizada em robôs, jogos e navegação, utiliza uma técnica de tentativa/erro para averiguar quais as ações que produzem melhores benefícios. Esta aprendizagem dividi-se em três componentes principais: o agente, o ambiente e ação. O agente é o aluno, o ambiente é tudo o que o aluno interage e a ação é o que o aluno pode fazer. O objetivo é que o agente escolha ações que maximizem a recompensa esperada em um determinado período de tempo. [14] De forma a simplificar a interpretação destes conceitos, iremo-nos focar apenas na aprendizagem supervisionada e não-supervisionada, já que as restantes assentam em cada um destes princípios.

2.4.1 Aprendizagem Supervisionada

Tendo como princípio a técnica de *ML* de aprendizagem supervisionada, é importante entender as razões da utilização desta aprendizagem. Desta forma, o utilizador produz dados que sejam vistos como *output's* de experiências anteriores que contribuem na otimização da sua performance e ajuda na resolução de vários problemas de computação no mundo real. Para melhor elucidar este tema nada melhor que um exemplo concreto de como esta aprendizagem pode ser utilizada no dia a dia, o modelo de aprendizagem supervisionada utilizado para determinar o tempo de viagem do emprego até casa. Primeiramente é necessário construir um *dataset* para treino, que contenha o tempo de viagem e fatores meteorológicos. Com base neste *dataset* de treino, esta técnica de *ML* irá averiguar a existência de relações directas, como a quantidade de chuva e o tempo até chegar a casa. Verificando-se que quanto mais chove, maior é o tempo de viagem, e as horas do dia em que esse tempo é maior. O modelo através das relações diretas entre os dados reconhece o impato que a chuva tem na forma como as pessoas conduzem e que o volume de pessoas a viajarem é maior a certas horas do dia. [14]

Dessa forma podemos traduzir esta técnica de *ML* num expressão matemática 2.1:

$$Y = f(X) \tag{2.1}$$

O objetivo é aproximar a função de forma a que novos dados, X , possam prever as variáveis de saída Y . A resposta é conhecida e o algoritmo sucessivamente faz previsões do *dataset* de treino. A aprendizagem é dada como concluída quando o algoritmo apresentar um alto nível de performance.

Os problemas de aprendizagem supervisionada são agrupados em dois grupos, um de *classificação* e um outro de *regressão*.

- **Classificação:** quando um resultado é uma categoria, como um azul ou vermelho ou verdadeiro ou falso.
- **Regressão:** quando um resultado é um valor real, como euros ou o peso.

Sendo que alguns dos algoritmos de supervisão mais comuns para resolver os problemas a cima descritos são:

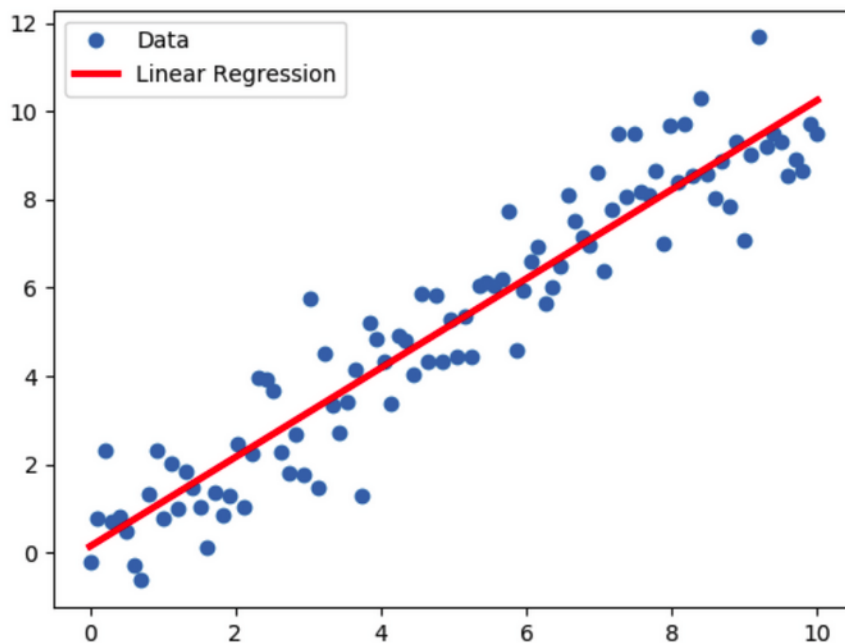
- Linear regression para problemas de regressão.
- Random forest para problemas de classificação e de regressão.
- K-nearest neighbors para problemas de classificação e de regressão.

Linear Regression

Linear Regression é o algoritmo que relaciona duas variáveis pelo ajuste de uma equação aos dados observados, sendo uma variável exploratória e a outra considerada como um variável dependente. Antes de se iniciar o associação das variáveis, uma boa política é averiguar se existe uma significativa associação entre as variáveis. Uma ferramenta bastante útil disponível numa biblioteca em *Python* é o *scatterplot*, que determina a força de relação entre as duas variáveis. Caso não exista associação entre variáveis, o gráfico exibido pela função *scatterplot*, não indica nenhuma tendência crescente ou decrescente, significando que para estas variáveis o algoritmo *Linear Regression* não é recomendado. O valor numérico que indica se associação entre variáveis é forte, é o coeficiente de correlação dado pela fórmula 2.2, que varia entre -1 e 1. Para um valor numérico positivo, a associação entre as variáveis tem uma tendência positiva, figura 2.5, caso seja nulo não existe correlação, logo o gráfico não possui qualquer tendência. Para um valor negativo, o gráfico apresenta uma tendência negativa.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

A equação de *Linear Regression* é descrita pela fórmula $Y = a + bX$, onde **X** é a variável exploratória e **Y** a variável dependente. O **b** é o coeficiente de correlação e indica o declive da linha, e o valor **a** significa a interseção com a linha (o valor de **y** quando **x** = 0). [15]

Figura 2.5: Exemplo de um gráfico de *Linear Regression*.

Random Forest

O algoritmo *Random Forest* como o nome sugere, consiste num grande número de árvores de decisão individuais que funcionam em conjunto. Antes de prosseguir com a explicação do algoritmo é fundamental entender o conceito *Decision Trees*. Imagine-se que um *dataset* contem dois valores, 0 e 1, tal como a figura 2.6. É desejado separar os números em 0 e 1 em features, isto é, em características das variáveis, que para este caso em análise são as cores vermelha e azul. A escolha da divisão de cores permite dividir as *features*, contudo essa divisão contem um 0 na feature azul o que justifica a pergunta se é vermelho. Podemos entender um nó numa árvore como o ponto onde o caminho se divide em dois, as observações que respondem à pergunta Sim, descem num ramo e as que respondem Não, descem pelo ramo Não. Como o objectivo é dividir todos os 0's e 1's, apenas iremos dividir a árvore em outro nó na *feature* vermelha. Já que a *feature* azul já se encontra apenas com valores 0's. De salientar que os valores 1's estão sublinhados, por isso podemos perguntar quais os valores estão sublinhados para dividir o nó. E dessa forma, a resposta afirmativa coloca os 1's num ramo e o negativo num outro ramo com o valor 0. Assim sendo foi possível dividir os valores 0 e 1 usando duas *features* segundo o conceito de *Decision Tree*. [16]

Cada árvore individual no *Random Forest* fornece uma previsão por classe, aquele

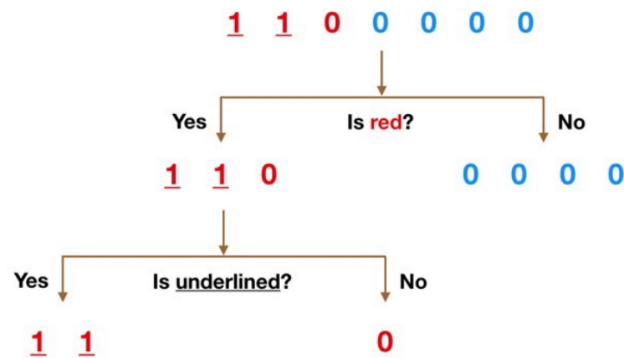
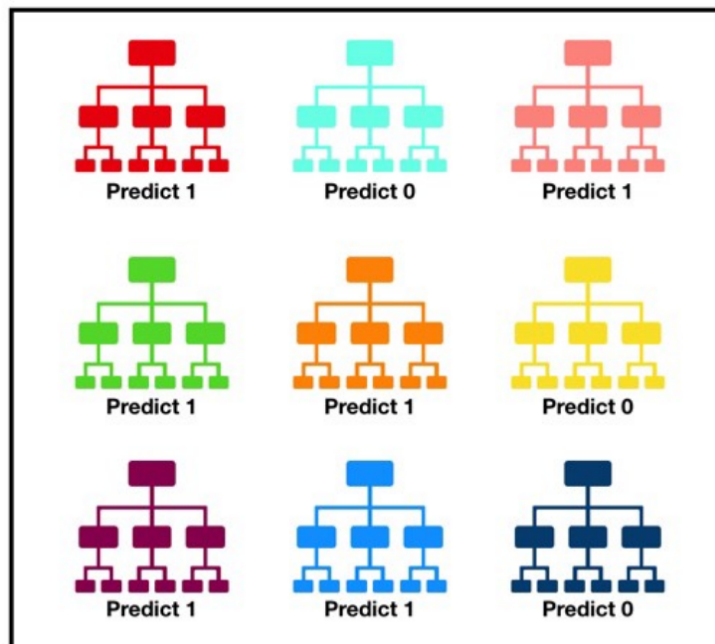


Figura 2.6: Exemplo de Decision Tree

que contiver mais votos é designado como a previsão do algoritmo. Um ponto fulcral deste algoritmo é a baixa correlação entre variáveis. Assim os algoritmos não correlativos podem produzir previsões de conjuntos mais precisas do que individualmente. Isto deve-se ao fato de cada árvore proteger os seus erros individualmente, enquanto que muitas árvores podem estar erradas muitas outras estão certas, e como estas formam um grupo, as árvores tendem a seguir a direção correta, tal como no exemplo da imagem 2.7. [16]

Figura 2.7: Exemplo de previsão do valor 1 segundo o modelo *Random Forest*.

K-nearest neighbors

O algoritmo *K-nearest neighbors* (*KNN*) assume por princípio que as coisas similares estão perto umas das outras. É um classificador de vizinhos de forma a determinar a classe formada por esses vizinhos. Assim a estratégia desta técnica é determinar os vizinhos mais próximos e de seguida encontrar a classe usando-os. A figura 2.8, representa um exemplo que será usado para entender o conceito deste algoritmo. Assim, temos duas classes, a *O* e a *X* e pretende-se tomar duas decisões, q_1 e q_2 , através de três vizinhos. A decisão q_1 é mais direta porque os vizinhos desta pertencem todos à mesma classe. Já no caso q_2 , dois dos vizinhos pertencem à classe *X* e o outro à classe *O*, o que obriga a que haja outro procedimento para decisão da classe. Podendo ser através de votação da maioria ou do peso de cada uma das distância a q_2 . [17]

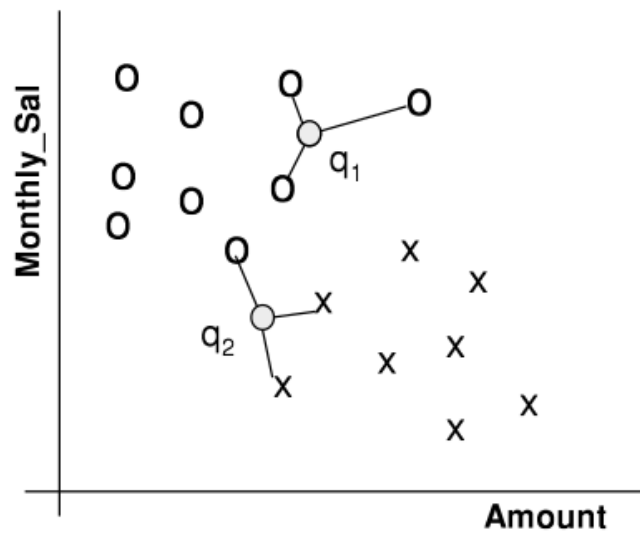


Figura 2.8: Exemplo de *3-Nearest Neighbour Classification*.

A forma mais usual para calcular a distância entre pontos é recorrendo à fórmula matemática da distância euclidiana 2.3.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^i (q_i - p_i)^2} \quad (2.3)$$

A escolha do número de vizinhos a utilizar para fazer as previsões com este algoritmo, pode ser por vezes confuso de ser alcançado, para contornar isso, é implementado todo o algoritmo em relação ao *dataset* que se pretende estudar. Correr o algoritmo várias vezes

com valores diferentes K e escolher o que apresentar menor percentagem de erro entre os valores esperados e previstos. Tendo em atenção na escolha do valor de K valores que causem previsões instáveis, como é o caso do $K=1$. Um exemplo é desejar-se um determinado ponto e em torno deste existir pontos a vermelho e a verde, sendo que a verde existe apenas um vizinho, isto é, em termos lógicos pensar-se-ia que o ponto a vermelho teria maior probabilidade, no entanto pode não ser verdade, devido ao $K=1$ o algoritmo incorretamente irá prever que o ponto desejado seria verde, por este estar mais próximo. Por outro lado, se aumentarmos demasiado o valor de K , o número de erros irá aumentar porque o *gap* entre valores previstos e desejados irá aumentar. A imagem 2.9, mostra a organização standard do algoritmo KNN . [18] As vantagens da utilização do algoritmo KNN são:

- simples e de fácil implementação.
- não é necessário construir um modelo, ou efetuar grandes ajustes para efetuar as previsões.
- versátil, pode ser usado para classificação e regressão.

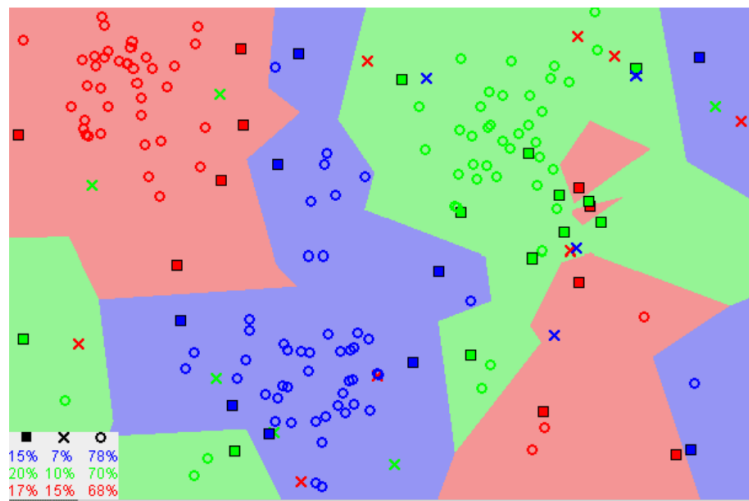


Figura 2.9: Padrão Standard do algoritmo KNN .

2.4.2 Aprendizagem Não Supervisionada

Tal como a ideia deixada acima sobre aprendizagem não supervisionada em ML , é necessário permitir que o modelo funcione por conta própria para descobrir informações.

Possuindo apenas dados de *input* (X) e não tendo qualquer variável de *output* nos dados, esta aprendizagem permite ser utilizada em tarefas mais complexas do que a aprendizagem supervisionada. É possível descobrir padrões e *features* desconhecidos nos dados e ocorre em tempo real para que todos os dados de entrada sejam analisados e identificados.

Nada melhor que um exemplo para entender em que circunstâncias esta técnica pode ser aplicada. É utilizado o exemplo de um bebé e um cão de um amigo da família, figuras 2.10. Uma semana atrás, um familiar leva um cão para brincar com o bebé, passado algumas semanas de o bebé ter estado a brincar com o cão, a criança consegue identificar algumas características ao ver o cão de estimação de sua casa. O bebé identifica características, como tendo duas orelhas, dois olhos e quatro patas, o que significa numa identificação de que o novo animal é um cão. Este caso trata-se de uma aprendizagem não supervisionada, onde não existe nenhuma explicação, mas sim semelhanças que são retiradas dos dados. Se fosse uma aprendizagem supervisionada, o amigo da família que levou o cão a brincar com a bebé teria-lhe dito que o animal era um cão. [2]

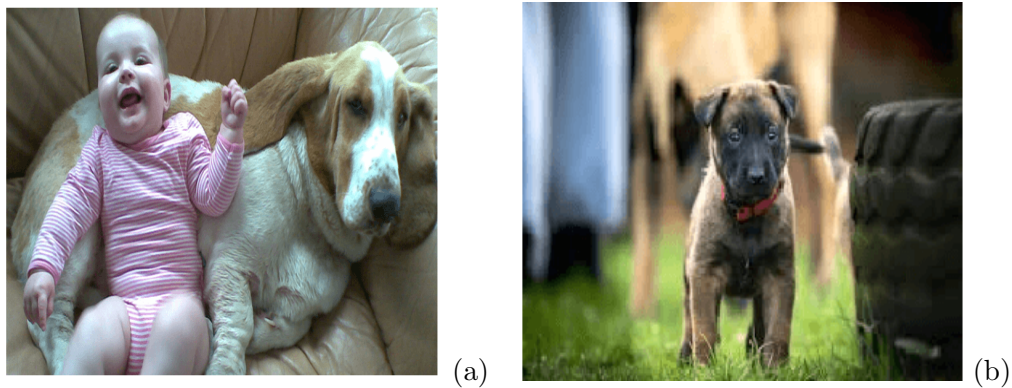


Figura 2.10: Exemplo de aplicação da técnica de aprendizagem não supervisionada. (a) Bebé com animal de estimação. (b) Cão de amigo.[2]

Os problemas de aprendizagem não supervisionada são agrupados em dois grupos, *Análise de agrupamento de dados* e *Association*.

- **Clustering:** é onde se deseja descobrir os agrupamentos inerentes nos dados, como agrupar clientes por comportamentos comerciais.
- **Association:** é quando se quer descobrir regras que descrevem grandes partes dos dados, como uma pessoa que compra X também quer comprar Y.

Sendo que um dos algoritmos não supervisionados mais comuns para resolver os problemas a cima descritos é o k-means, utilizado em problemas de clustering.

K-means Análise de agrupamento de dados

O *k-means* é um algoritmo não supervisionado que faz deduções a partir de conjuntos de dados que não se referem a qualquer resultado conhecido. Assim se pode dizer que o objetivo do *K-means* é agrupar conjuntos de pontos similares e descobrir padrões subjacentes, recorrendo a um número fixo de aglomerados (k) num dataset. K refere-se ao número de centroides necessários no *dataset*. As representações dos centros dos aglomerados podem ser localizações imaginárias ou reais. Os dados são alocados a cada aglomerado conforme a proximidade que estejam destes. [3]

Um exemplo prático da aplicação deste algoritmo no mundo real é na monitorização de dados de uma corrida, onde o *dataset* contém dados relativos aos quilómetros percorridos, duração (minutos) e ao número de dias desde a última corrida. A questão que se coloca para interpretar os dados do *dataset* é "Como se pode identificar sessões de treinos similares?". Pela similaridade entre sessões de treino é possível ter uma ideia geral da performance e dos melhoramentos que se têm vindo a registar com os treinos, comparando a distância percorrida com a duração é possível verificar se existe uma correlação linear entre estas variáveis, figura 2.11.



Figura 2.11: Correlação linear entre a distância percorrida e a duração.[3]

Contudo, na figura 2.12, comparando a distância e duração com o número de dias desde a última sessão de treinos, verifica-se que não existe correlação entre estas.

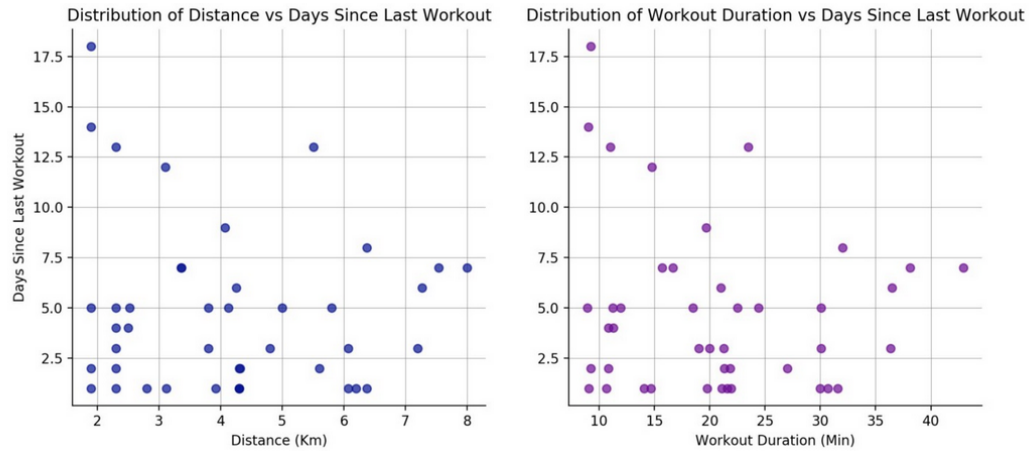


Figura 2.12: Relação da distância percorrida e duração com o número de dias depois da última sessão de treinos.[3]

Na figura 2.13, está presente o resultado da aplicação do algoritmo *k-means* para $K=5$, onde é possível verificar a divisão dos dados em cinco aglomerado de dados. O próximo passo para este caso de estudo em concreto, requer a intervenção humana, a fim de interpretar os resultados e obter informações adicionais.

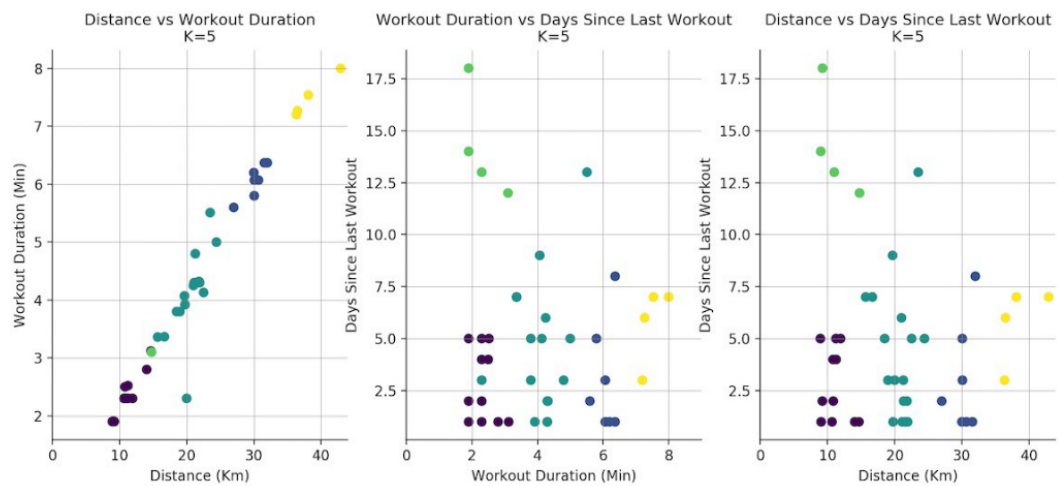


Figura 2.13: Resultados obtidos com aplicação do algoritmo *K-means* para $K=5$. [3]

As vantagens deste algoritmo são a facilidade de implementação, a rapidez e a

eficiência, necessitando apenas do ajuste do parâmetro K para melhorar a sua eficiência.

2.5 Time Analysis

As *Time Analysis (TSA)* são séries estatísticas de análise de dados, bastante utilizado nos mercados financeiros. Estas relacionam a evolução de um determinado objeto ao longo do tempo, tais como, petróleo, diesel, ouro, prata e alimentos. A utilização deste tipo de séries temporais ao relacionar-se com os dados que se pretende estudar possibilita efetuar previsões. Para além da sua grande utilidade em dados financeiros e serviços, estas também são utilizadas em *ML*.

As séries temporais contêm pontos de dados sequenciais mapeados ao longo de um determinado tempo, incorporando métodos que tentam fazer previsões. Estas usam significativos modelos de previsão do futuro tendo como base conhecimentos passados. Como é o caso do exemplo seguinte em que, a previsão do número de clientes de um restaurante é feita conforme o número de clientes num período de tempo específico.

Tal como detalhado anteriormente, *ML* é uma técnica muito poderosa no processamento de imagem, contudo apresenta limitações quando esses dados estão afetados pelo tempo, existindo variações substanciais das características, propriedades, atributos, escalas temporais e dimensionalidade. Assim para análises de séries temporais, é necessário algoritmos de classificação que permitam aprender padrões dependentes do tempo. Para dar resposta a esse elemento, vários modelos e métodos são usados na previsão de séries temporais. Nomeadamente os métodos, podem ser divididos em previsão de uni-variáveis de séries no tempo e em previsão de multi-variáveis de séries temporais. Os métodos de previsão uni-variáveis de séries no tempo, contêm problemas de previsão com apenas duas variáveis sendo que uma é a variável temporal e a outra que se pretende prever. Um caso específico é, prever a média da temperatura de uma cidade para a próxima semana, a partir de um parâmetro tempo (semana e a outra é o tempo da cidade). Por outro lado, os métodos de previsão multi-variáveis de séries temporais, contêm problemas de previsão de múltiplas variáveis, mantêm uma variável como o tempo e as outras com múltiplos parâmetros. Um exemplo para este método, é a previsão da temperatura para próxima semana, a partir de variáveis como a chuva, tempo de duração da chuva, humidade, velocidade do vento, precipitação e pressão atmosférica. Os modelos de previsão de séries temporais em *ML* são: [19]

- ARIMA Model
- Vector Autoregressive Model

- Long-short term memory(LSTM)

ARIMA

ARIMA combina *Autogressive*(*AR*) e *Moving Average*(*MA*) para construir um modelo de séries temporais. *AR* é um modelo de regressão que usa dependências entre as observações e o número de observações anteriores(p). 2.4

$$x_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i x_{t-i} + \epsilon_t \quad (2.4)$$

Onde x_t é a variável estacionária, c é uma constante, ϕ_i são coeficientes de autocorrelação de 1,2,..p e ϵ_t são os erros residuais das séries de ruído branco Gaussiano com média zero e variância σ_ϵ^2 . *MA*, têm em consideração as observações e os erros residuais, de forma a que a média seja ajustada ao longo do tempo (q), equação 2.5

$$x_t = \mu + \sum_{i=0}^q \theta_i \epsilon_{t-i} \quad (2.5)$$

μ é a expectativa de x_t (normalmente assumida como zero), o θ_i são os pesos aplicados aos valores atuais e anteriores numa série anterior. Estes dois modelos podem ser combinados e formar o modelo *ARIMA* (p,q):

$$x_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i x_{t-i} + \epsilon_t + \sum_{i=0}^q \theta_i \epsilon_{t-i} \quad (2.6)$$

Integrated I , integra para tornar a série temporal estacionária, medindo a diferença de observações ao longo do tempo (d). De forma a tornar uma série não estacionária numa série estacionária. Criando o modelo *ARIMA* denominado de (p,d,q).[20]

Vector Autoregressive Model

O *Vector Autoregression* (*VAR*) é um algoritmo de previsão utilizado em duas ou mais séries temporais com influência mútua. Cada variável (série temporal) é modelada em função dos valores passados, isto é, os valores previstos são os atrasos da série (valores do tempo perdido). A grande diferença entre este modelo e os modelos de Autogressão como *ARIMA* é fato de este ser um modelo bidirecional, ou seja, as variáveis influenciam-se mutuamente, ao contrário do que se verifica no modelo *ARIMA* que é unidirecional. [21]

Long-short term memory(LSTM)

O *Long-short term memory(LSTM)* é uma espécie de *Recurrent Neural Network (RNN)*, que tem a capacidade de recordar valores de estados iniciais de forma a poder usa-los futuramente. Antes da descrição do *LSTM*, torna-se necessário umas breves noções do que se entende por *RNN*.

RNN são constituídas por pelo menos três grupos de camadas, podendo ser constituídas por uma ou mais camadas em cada um desses grupos. As primeiras são as camadas de entrada, as segundas as camadas ocultas e as terceiras as camadas de saída. O número de *features* corresponde ao número de nós da camada de entrada, são conectadas através de ligações designadas como "*synapses*" aos nós criados na camada oculta. Essas ligações possuem diferentes pesos, força ou a extensão da camada oculta, de forma a que seja feita um processo de seleção dos sinais de entrada relativamente aos que devem ser considerados ou não. Uma rede neuronal basicamente aprende ajustando o peso de cada ligação. Na camada oculta, os nós aplicam uma função (sinusoidal ou tangente hiperbólica ($\tanh$)) à soma dos pesos de entrada de forma a transformar os valores de entrada em valores previstos. A camada de saída gera um vector com as probabilidades dos vários valores previstos e seleciona aquele que apresenta menor taxa de erro ou custo, minimizando as diferenças entre valores esperados e previstos. A taxa de erro obtida através do treino da rede inicialmente não fornece os melhores resultados, o que obriga a que estes sejam enviados de volta para a rede a partir da camada de saída até às camadas ocultas, de formar a que estes sejam minimizados. Esse processo é repetido várias vezes com as mesmas observações. Assim os pesos vão se ajustando até que os valores previstos se aproximem dos valores esperados, diminuindo o custo das previsões. A partir do momento em que o custo é mínimo, o modelo encontra-se treinado.

RNN é um caso especial de uma rede neuronal onde o objetivo é prever o próximo passo na sequência de observações em relação aos passos anteriores observados na sequência. A ideia inerente é utilizar as observações e aprender a partir dos estados anteriores os futuros. Assim sendo, os estados anteriores têm de ser lembrados de forma a preverem os estados futuros. Para tal, a camada oculta funciona como uma zona de armazenamento de dados anteriores da rede. A rede neuronal chama-se recorrente pelo fato, de efetuar a mesma tarefa por todos os elementos da sequência, com a característica de utilizar a informação adquirida anteriormente para prever estados futuros não identificados na sequência de dados. A desvantagem desta rede neuronal é de apenas conseguir recordar poucos passos da sequência de cada vez. Esse problema pode ser resolvido com o uso da linha de memória introduzido pelo algoritmo LSTM. O *LSTM* é um tipo de *feature* que

se diferencia das restantes, sendo adicionadas para memorizar uma sequência de dados, para isso utiliza células ao longo da linha de memória para memorizar as tendências anteriores dos dados. Assim sendo, as células assemelham-se a linhas de transporte que se conectam, transmitindo dados anteriores a células seguintes, devido à existência de *gates* em cada célula, os dados podem ser descartados, filtrados ou adicionados à células seguintes. Essas *gates* são baseadas na camada de rede neuronal sinusoidal, o que permite que as células opcionais deixem os dados passarem ou serem descartados. Cada camada sinusoidal produz números entre zero e um, o que representa a quantidade de dados que passam de cada célula, isto é, a estimação do valor zero significa que nada transite e a estimação de um significa que todos os dados são transmitidos. [20]

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo iremos endereçar o estudo de conceitos óticos na produção de lentes. São detalhados os vários fenómenos verificados nas superfícies óticas consoante o seu tamanho e forma. Comparação entre os instrumentos e métodos mais utilizados para medir o alinhamento de uma lente. Por último, as várias aberrações nas imagens captados por lentes desalinhadas.

3.1 Montagem de Lentes

Para melhor enquadramento dos fenómenos óticos existentes numa lente começaremos por perceber o que são centros óticos, centros mecânicos e a importância destes na conjuntura de uma lente.

Os centros óticos estão presentes em todas as superfícies óticas, variando a sua posições no espaço consoante a sua forma e diâmetro. Por esse centro, é traçado um eixo ótico imaginário de referência. A superfície ótica é revestida em seu torno por materiais como cola, latão e alumínio. A partir desse ponto, esse conjunto é designado por lente individual, contudo não significa que a partir desse momento a imagem obtida pela lente seja a ideal. Visto que à parte ótica é adicionado uma parte mecânica, os centros destes dois elementos normalmente não são coincidentes, o que significa que para verificar se ambos os centros são coincidentes é necessário conhecer o centro mecânico formado pelo revestimento. Uma lente encontra-se alinhada quando o eixo descrito pelo centro mecânico, designado como eixo mecânico, é coincidente com o eixo ótico formado por todas as superfícies óticas que fazem parte de uma lente. Caso estes não sejam coincidentes, é possível conhecer os desvios existentes através da relação entre eixos. [5]

Na parte superior da figura 3.1, está presente uma lente biconvexa, com ambos os

centros óticos de cada superfície presentes sobre a linha de referência, o que significa dizer que a lente tem todas as suas superfícies óticas alinhadas com essa linha. Para isso, os centros óticos têm de estar presentes sob uma linha reta, mais conhecida por eixo ótico.

Por outro lado, na parte inferior da figura 3.1, a lente utilizada é uma plano-convexa e encontra-se inclinada face ao eixo mecânico o que significa que o eixo ótico não coincide com a linha de referência. A não coincidência do eixo ótico com a linha de referência, origina aberrações na imagem como será aprofundado mais em diante.

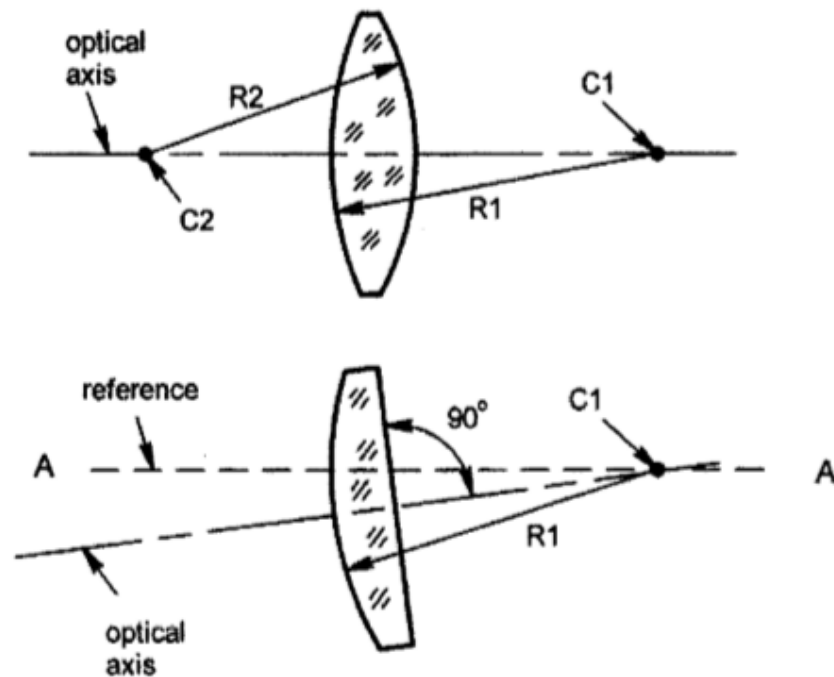


Figura 3.1: Relação entre linha de referência e eixo ótico.[4]

Ao contrário da figura anterior, na figura 3.2, é relacionado o eixo ótico com o eixo mecânico, formado pelo revestimento. Nesta fase é dado mais um pequeno passo para entender o conceito de eixo ótico e eixo mecânico. Ao contrário do que acontece na figura 3.1, a linha de referência é substituída pelo eixo mecânico, formado pelo material que reveste o contorno das superfícies óticas.

Assim na figura 3.2, são utilizadas quatro imagens que descrevem algumas das situações mais comuns. A imagem (a) ilustra um alinhamento perfeito, isto é, o eixo mecânico coincide com o eixo de rotação da lente, o que significa que o eixo ótico e mecânico são coincidentes. As figuras seguintes, descrevem os três erros de alinhamento

mais comuns, normalmente causados pela não uniformidade do material depositado em torno das superfícies óticas. Na imagem (b) é possível ver-se que a lente se encontra desalinhada em relação ao eixo mecânico. No caso (c) o eixo ótico está inclinado e os centros da superfície ótica encontram-se fora do eixo mecânico. Por último, a situação seguinte mostra uma inclinação de uma das superfícies enquanto que a outra se encontra alinhada. *C1* está alinhado mas inclinado, o que resulta que o *C2* fique desalinhado. [4].

Depois de entendido como as superfícies óticas se relacionam com o revestimento, torna-se necessário perceber como se procede numa lente constituída por várias superfícies óticas. Uma lente depende em número e tipo de superfícies óticas, consoante o seu fim. Desse modo, e prendendo atenção numa lente com apenas duas superfícies, estas são coladas uma em relação à outra. A colagem é realizada no contorno exterior das superfícies, através da cola Ultravioleta (UV). A parte em torno da ótica da lente pode ser revestida de três formas:

- Cola UV, figura 3.3
- Cola UV e latão
- Cola UV e alumínio

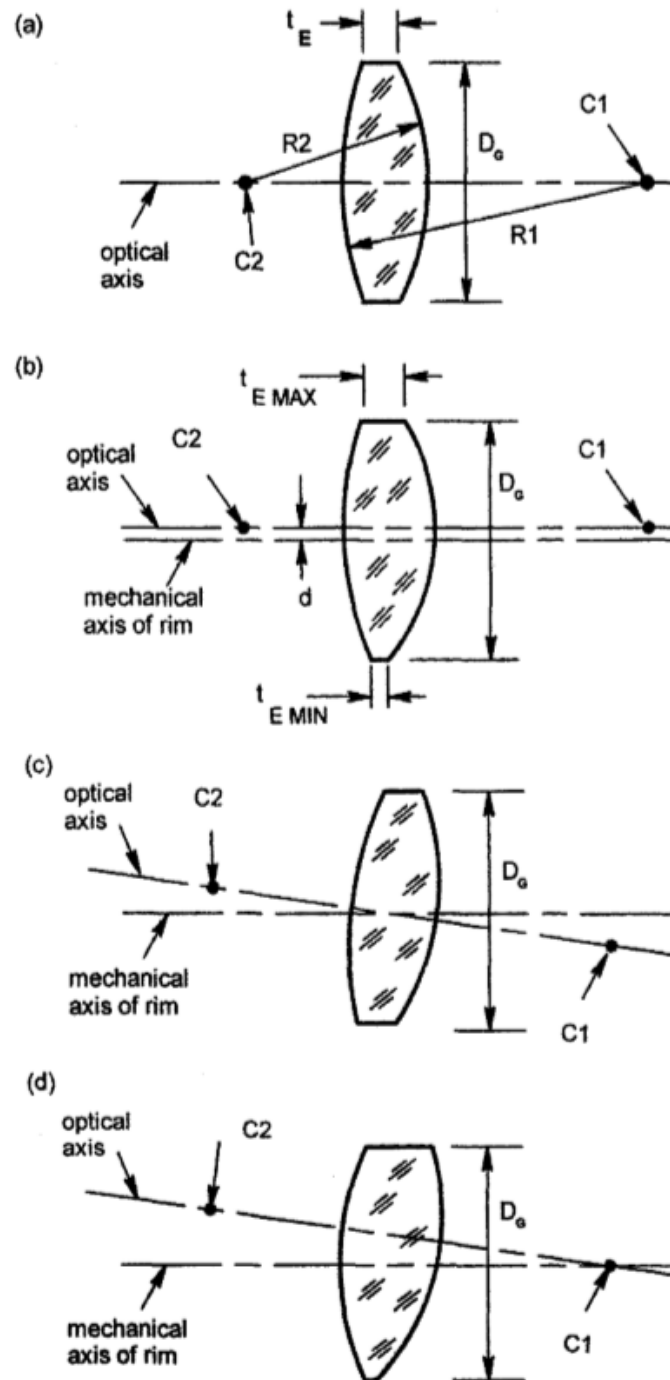


Figura 3.2: Casos de lentes descentradas em relação ao eixo de referência.[4]



Figura 3.3: Lente com duas superfícies óticas coladas.

A cola UV é o elemento comum nos três tipos de revestimentos de uma lente, para além de fixar as várias superfícies entre si, existe casos de lentes revestidas apenas pela secção de cola que circunda a lente. Isto é, a cola UV para além de fixar as superfícies também serve de apoio no manuseamento ou na colocação da lente na aplicação desejada. O segundo revestimento, utiliza a cola UV para fixar as superfícies óticas e em redor destas é utilizado revestimento em latão, fazendo uso da mesma cola para fixar a superfície ótica ao revestimento. Por último, e o mais comum de se encontrar numa lente devido à facilidade de trabalhar o material e pela robustez que dá às superfícies óticas que protege, é o alumínio. Dessa forma, à semelhança das formas anteriores, a cola UV cola as superfícies óticas entre si e fixa o revestimento em alumínio. Pelos centros óticos de cada superfície é percorrido uma linha reta, eixo ótico que permite ao comparar com o eixo mecânico identificar se as superfícies estão desalinhadas com o eixo mecânico e quantificar esses desvios. Normalmente analisando os eixos óticos com o eixo mecânico, verifica-se que estes não se encontram coincidentes. Levando a um processo de polimento, figura 3.4, ou fresagem do revestimento da lente.

A lente é fixa a uma garra em metal pela parte do revestimento, já que é a parte mais robusta da lente, garantindo sempre a fixação da lente. Para poder movimentar a lente de forma ajustar à posição que permite alinhar os eixos óticos com o mecânico, é utilizado o

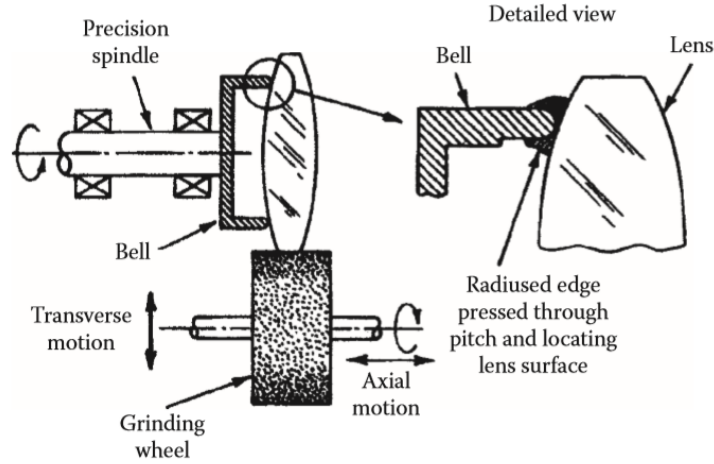


Figura 3.4: Comum processo de polimento de uma lente.[4]

sistema de vácuo, por onde passa pela zona central da garra e que permite que se desloque toda a estrutura. Permitindo correções, suaves da inclinação e do deslocamento do eixo ótico com o eixo mecânico. Para visualizar o desalinhamento entre eixos, a estrutura da garra com a lente fixa, é colocada a girar em torno de si. Quando todos os eixos óticos da lente se encontrarem coincidentes com o eixo mecânico é aproximado o mecanismo de polimento ou de fresagem, para retirar material do revestimento em excesso.

Na figura 3.5, é utilizado duas figuras onde são relacionados o eixo mecânico da máquina e o eixo ótico das superfícies. De salientar que o eixo mecânico da máquina é o mesmo que o eixo mecânico formado pelo revestimento da lente, já que a parte da lente que está em contato com a garra é o revestimento. Para que se conclua que a lente está desalinhada com o eixo rotacional da máquina é necessário recorrer a um exemplo concreto de dois desses casos, como é representado pela figura 3.5.

Na figura 3.5 é verificado duas situações comuns no processo de polimento de uma lente. No caso (a) o ponto focal $C1$ encontra-se sob o eixo mecânico, ao passo que o $C2$ se encontra fora. O que equivale dizer que o eixo ótico não está alinhado com o eixo mecânico. Para tal é possível quantificar o ângulo de inclinação da lente a partir da equação 3.1.

$$\theta = w/2h \quad (3.1)$$

Onde w é o indicador da distância horizontal entre o desvio dos dois extremos e h a altura entre o eixo mecânico e a extremidade da lente. Também é possível com esta

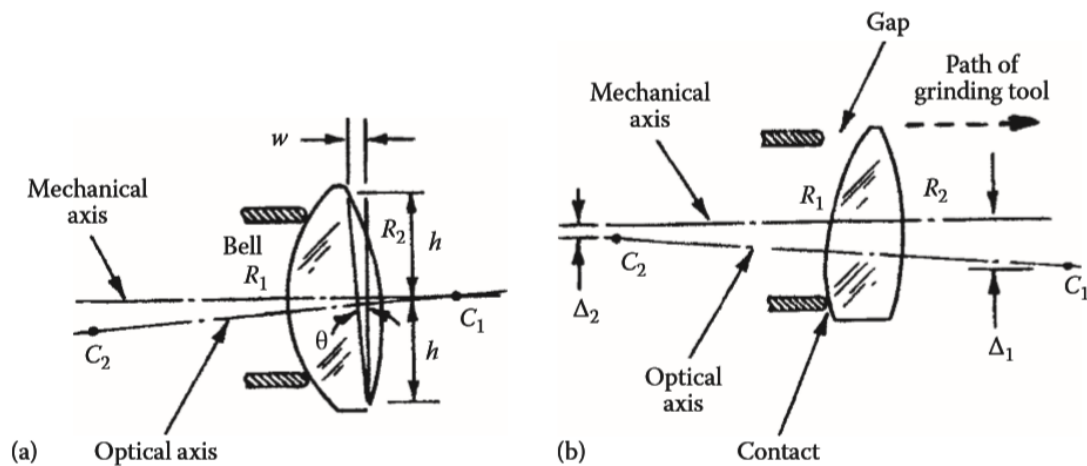


Figura 3.5: Lentes desalinhadas durante o processo de polimento.[4]

informação saber o ângulo de desvio do feixe transmitido através da equação 3.2:

$$\delta = (n - 1)\theta \quad (3.2)$$

Onde n é o índice de refração, que habitualmente é o do vidro. Ambos os ângulos são apresentados em radianos. Para apresentar na nomenclatura utilizada em ótica, ângulos por minuto, estes são divididos por 0.00029. [5]

O processo de polimento para alinhar uma lente, pode ser utilizado recorrendo a várias variantes. O processo mais simples para entender se uma lente se encontra alinhada ou não, é observar as imagens de uma fonte de luz refletida de uma superfície ótica em movimento circular pelo fato, deste processo utilizar diretamente a capacidade do olho humano de identificar esses movimentos na imagem é bastante limitada. A figura 3.6, ilustra como se pode adicionar uma lupa ou um telescópio para ampliar o movimento efetuado.

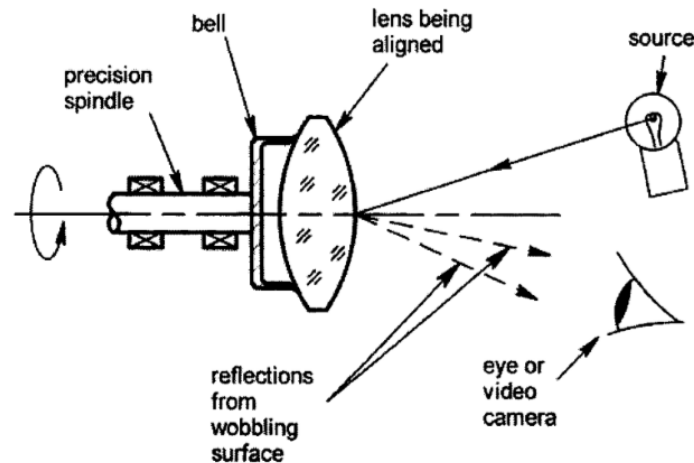


Figura 3.6: Processo de análise quanto ao alinhamento da lente.[4]

Através da rotação de uma lente iluminada por um feixe torna-se possível verificar se esta se encontra alinhada ou desalinhada. Isto é, quando o ponto projetado se move segundo uma grande elipse, significa que esta se encontra desalinhada. A partir dos eixos X e Y torna-se possível identificar o erro fase ao eixo mecânico identificado num monitor. À medida que o erro se for aproximando desse eixo mecânico, a elipse descrita pelo movimento circular da lente diminui. A lente está alinhada quando a elipse anteriormente descrita se aproximar de um ponto.

Outra técnica utilizada para medir o desalinhamento da superfície de uma lente, está presente na figura 3.7. Fazendo uso de um colimador para linearizar os feixes de luz de uma fonte luminosa que incide sobre um retículo com o formato de uma cruz, o feixe colimado por esse processo ao incidir na lente é dividido em dois, um transmitido e um refletido. Na parte inferior da figura 3.7, encontra-se uma lente que reflete o feixe de forma a que este seja novamente colimado, a partir daí é possível observar a imagem refletida. Caso a imagem da cruz refletida não coincidir com o centro, a lente encontra-se desalinhada. Observe que, na figura 3.7, a lente é presa entre dois fixadores de alinhamento opostos em eixos coaxiais. Se a lente estiver inclinada, uma força axial exercida no revestimento da lente, permite colocar a lente na direção correta para o alinhamento. [5]

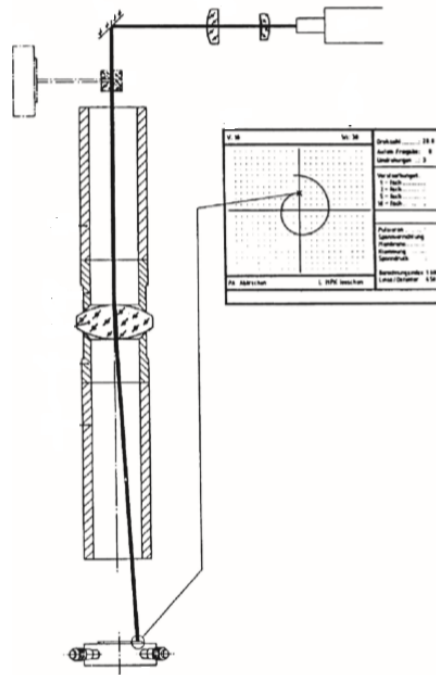


Figura 3.7: Processo de alinhamento de lente por reflexão. [5]

Um método mais comum utilizado para medir o desvio do alinhamento ótico da lente com o eixo de rotação do fuso oco é fazer com que esse mesmo feixe passe pelo autocolimador antes de passar pela lente. Durante o movimento medir o movimento da imagem e o plano focal da lente, com recurso a um microscópio. O primeiro exemplo presente na figura 3.8, mostra esta técnica a ser utilizada numa lente com campo focal positivo, podendo também ser usada em lentes com campo focal negativo. Deste modo, é inserido uma lente positiva entre o autocolimador e a lente de teste para que a imagem seja criada na parte esquerda da figura 3.8. Permite assim observar o desvio existente com um microscópio equipado com um retículo calibrado com uma escala angular, para se quantificar o erro de alinhamento da lente em estudo.

A técnica seguinte utiliza um processo mais automatizado e controlado para efetuar o alinhamento da lente. Recorre a uma máquina de CNC de precisão para retirar o material dispensável do revestimento da lente. Na figura 3.9 é possível verificar a versatilidade desta técnica perante diferentes situações de desalinhamento da lente. A vista (a), representa uma lente perfeitamente alinhada numa célula cilíndrica sem folgas radiais entre o revestimento e a ID da célula. Assim o eixo ótico é alinhado com o eixo mecânico.

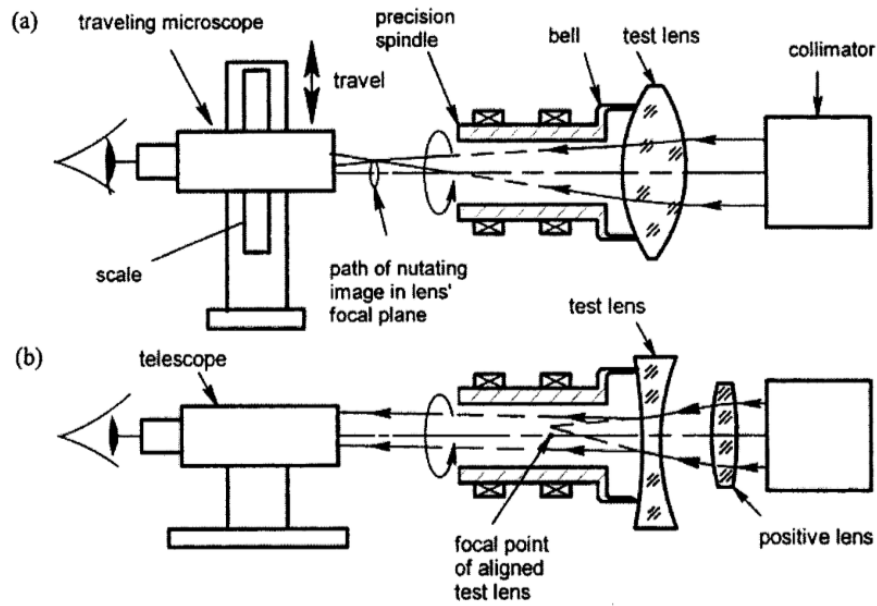


Figura 3.8: Processo de análise quanto ao alinhamento de uma lente, com recurso a um autocolimador. [5]

No caso (b), estamos perante uma situação em que o eixo ótico está completamente fora do eixo mecânico, o resultado do feixe transmitido indica que a lente está inclinada. Por fim, nas últimas duas vistas da figura 3.9, estamos perante duas situações em que o eixo ótico da lente está desalinhado do eixo mecânico, mas paralelo, o que mais uma vez em termos de análise do feixe transmitido representa uma inclinação entre eixos.

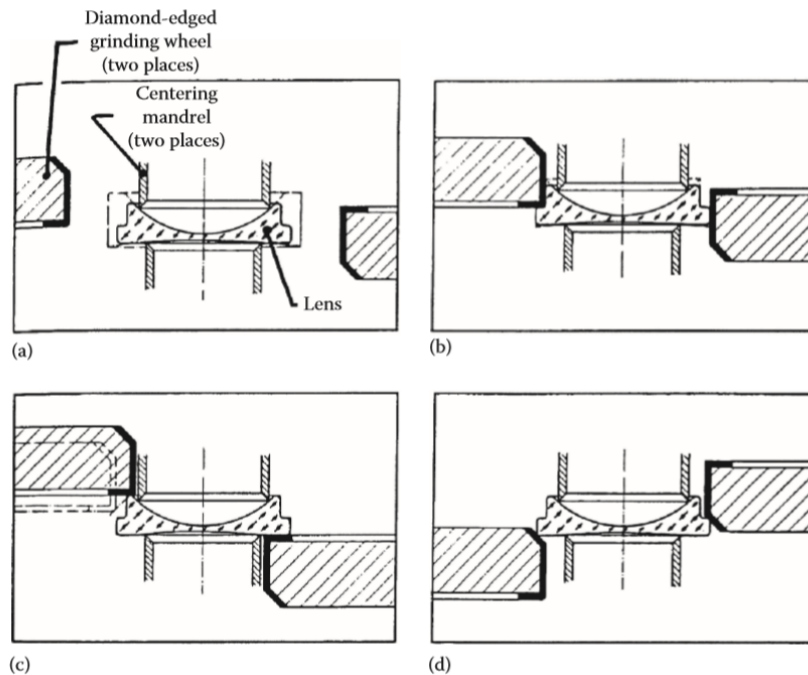


Figura 3.9: Alinhamento com recurso a uma CNC.[5]

3.2 Princípio de medição de erro de alinhamento de uma lente

Nesta secção é detalhado os princípios para medir o alinhamento de superfícies óticas que constituem uma lente, sendo estas constituídas por uma ou várias superfícies. Com base na informação anteriormente referenciada, as causas das perturbações na imagem de uma lente são o deslocamento e a inclinação do eixo ótico formado entre as várias superfícies óticas e o eixo mecânico. A maioria das técnicas existentes hoje em dia, são acompanhadas por rolamentos de ar de alta precisão que para além de permitirem encontrar o eixo mecânico possibilitam comparar este com o eixo ótico a estudar. A medição do erro do alinhamento pode ser feita segundo duas configurações, na vertical [22] ou na horizontal.

A qualidade de imagem de um sistema ótico depende fundamentalmente do alinhamento entre elementos que constituem a lente, provocando imagens desfocadas ou mesmo pouco nítidas, como serão detalhadas numa fase posterior deste trabalho. Para isso, houve a necessidade da criação de uma norma que servisse de guia orientadora para solucionar o erro de alinhamento [23]. Segundo a [23] o erro de alinhamento ocorre quando

o eixo ótico da lente não coincide com o eixo de referência ou eixo mecânico.

A elevada precisão que o manuseamento da ótica requer, leva a que este erro surja em três situações distintas na cimentação, no alinhamento e na fixação da lente. Nos primórdios o alinhamento ótico era feito através de métodos mecânicos, contudo estes apresentavam limitações. O que levou ao aparecimento de novas técnicas nomeadamente ligadas ao mundo ótico. Desse modo, as técnicas mais comuns para medir os deslocamentos angulares numa lente são a autocolimação e a interferometria.

3.2.1 Interferometria

No caso da Interferometria, é baseada no princípio da interferência de dois feixes que atravessam percursos óticos distintos isto quando existe um deslocamento angular e linear na superfície a estudar. Este é constituído por um laser, um divisor de feixe, um conjunto de espelhos e um foto-detetor. Ao contrário da autocolimação, esta técnica não necessita que o feixe enviado e recebido tenham a mesma direção. Para além disso o laser oferece coerência temporal e espacial. Algumas desvantagens são o tempo a efetuar a medição e o custo, em comparação com a técnica que utiliza o autocolimador. [24] A Interferometria é utilizada em bastantes áreas da Engenharia até à Física, devido a ser um método eficaz e abrangente. Na base deste fenómeno encontra-se a interferência de raios de luz. Em 1801, Young descobriu uma técnica, figura 3.10, onde fez incidir uma luz numa fenda dupla e verificou que depois desta passar pela duas fendas se relacionavam. [6]

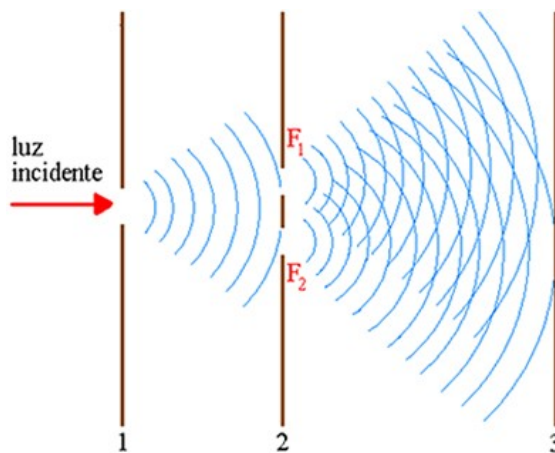


Figura 3.10: Técnica de Interferência por duas fendas.[6]

A relação entre as interseções pode ser descrita segundo uma onda sinusoidal, variando em fase e intensidade. A interferência pode ser construtiva ou destrutiva, dependendo

das diferenças de fase verificadas entre as ondas em análise. Assim sendo, se as ondas estiverem em fase o resultado destas será o dobro da amplitude inicial, estando perante uma interferência construtiva, figura 3.10. No caso da subtração de duas ondas cujo seu resultado for inferior à onda com maior amplitude, estamos perante uma interferência destrutiva.

Hoje em dia, existem vários tipos de interferómetros óticos que têm como princípio base a descoberta de Young. Para além da descoberta de Young, a interferometria assenta num outro conceito igualmente importante, o Conceito de Moiré [7]. Este último conceito é utilizado na indústria para determinar objetos com superfícies irregulares [25].

É bastante utilizado para entender os fundamentos básicos por de trás da interferometria. São imagens produzidas quando observadas através de duas estruturas periódicas sobrepostas em movimento, com padrões semelhantes de onda, leva à formação de franjas claras e escuras, denominadas franjas de **Moiré**. Estas estruturas são chamadas de retículos e os mais comuns de serem encontrados são de linhas claras e escuras, paralelas e equidistantes entre si. O centro das faixas (claras ou escuras) é chamado linha de grade, e a distância entre os centros de linhas de grade de duas faixas escuras (ou duas faixas claras) contíguas são o período do retículo, o inverso do período é a frequência do retículo (f), geralmente dado em linhas por milímetro. A figura 3.11 mostra duas fendas idênticas de linhas retas (a), enquanto que no caso (b) duas fendas idênticas rodadas entre si segundo um pequeno ângulo. O que ao nível da imagem (b) significa que uma franja escura é produzida onde as franjas escuras estão fora do intervalo em meio período e uma franja branca é produzida sob a grade de linhas escuras. O que permite medir em termos angulares esses ângulos entre retículos, significando que pequenos ângulos entre dois retículos correspondem a grandes deslocamentos nas franjas de **Moiré**. [7]

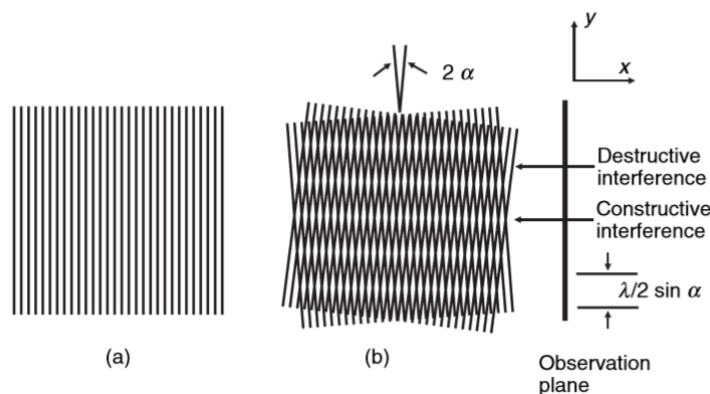


Figura 3.11: Conceito de Moiré. [7]

A sobreposição de dois conjuntos de linhas de grade figura 3.11, e as duas ondas em fase resultam em franjas. As claras são denominadas por interferência construtiva, enquanto que as que se encontram fora de fase resultam em franjas escuras e são chamadas de interferência destrutiva.

Um dos interferômetro mais conhecidos é o interferômetro de Fizeau, onde de seguida será brevemente apresentado.

Interferômetro de Fizeau

Existem vários tipos de interferômetros de medição de fenômenos óticos, no entanto para medição de pequenas oscilações angulares e de deslocamentos utilizados são os Interferômetros de Fizeau. O Interferômetro de Fizeau [8], figura 3.12, é constituído por um laser e por um orifício localizado no ponto focal de uma lente de colimação, o feixe resultante incide num divisor de feixes, que os divide em dois. Cada um deles percorre caminhos diferentes até incidirem na superfície em estudo, depois de serem refletidos. Ao incidirem de novo no divisor, esses feixes resultantes são direcionados a uma lente que faz com que esses feixes se recombinem num detetor. Nesta fase, a partir da interferência entre os feixes, é possível retirar informações quanto à sua inclinação e deslocamento. [8]

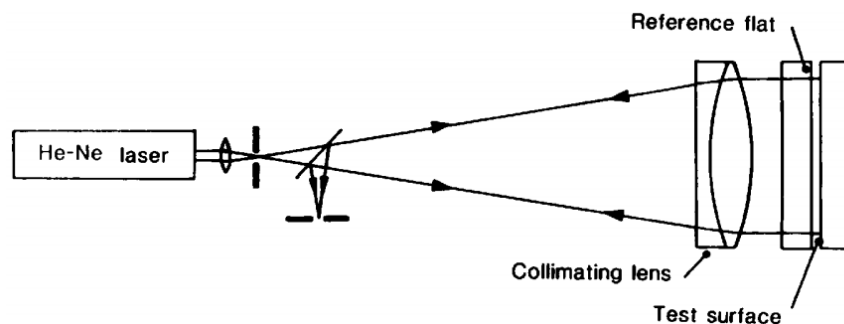


Figura 3.12: Interferômetro de Fizeau.[8]

3.2.2 Autocolimação

A autocolimação mede a variação angular entre o feixe de luz emitido e o recebido. Para efetuar essa medição, o autocolimador através de um foco de luz lineariza os feixes de luz tornando-os praticamente paralelos, designado como feixe de luz colimada. Desse modo, a lente frontal do autocolimador projeta o feixe colimado na superfície ótica a ser medida, o feixe é refletido de volta segundo o ângulo criado pela inclinação ou desfasamento da superfície em estudo. Esse ângulo é convertido pela lente frontal num desvio espacial que por fim é detetado pela ocular. Atualmente essa captação da imagem é feita digitalmente com recurso a câmeras *charge-coupled device (CCD)*. Um exemplo de medição de uma dada superfície em estudo está presente na figura 3.13. Equipado com um sensor *CCD* para visualizar a posição dos raios de luz refletida, possibilita adquirir um maior conjunto de imagens do que a olho nu, isto devido à grande taxa de aquisição que este tipo de sensores possuem hoje em dia. A partir das imagens adquiridas é possível relaciona-las em um referencial através de um retículo escalonado colocado no autocolimador, o que permite visualizar a imagem sob este. Possibilitando dessa forma averiguar mais facilmente os desfasamentos registados pela medição. Os referenciais utilizados são de duas dimensões, o eixo x dá-nos informação quanto à inclinação horizontal ou rotação em torno do eixo, enquanto que o eixo y fornece-nos dados quanto à inclinação vertical ou rotação em torno do eixo horizontal [9]. Os Autocolimadores são utilizados em várias aplicações, com calibrações e medições de superfícies óticas.

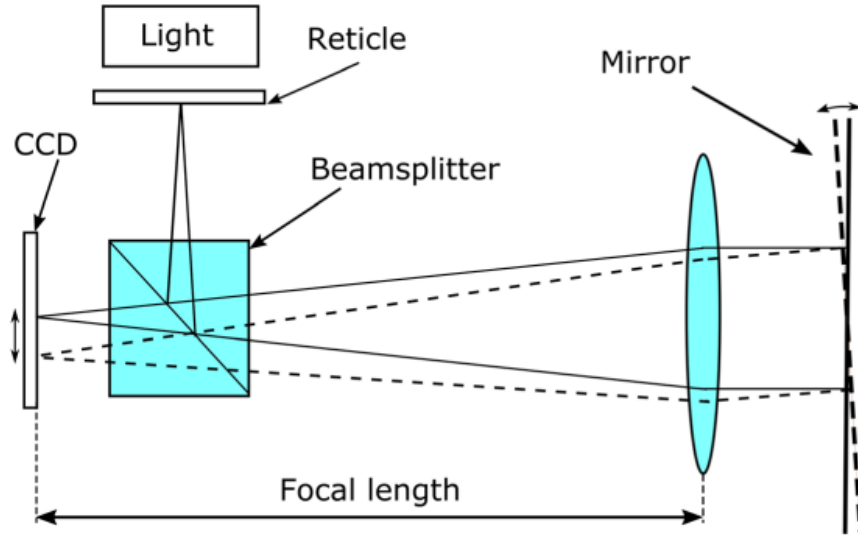


Figura 3.13: Técnica de medição de uma lente com auxílio de um autocolimador eletrônico. [9]

Um autocolimador é essencialmente um telescópio focado no infinito. Um feixe de luz ao incidir num retículo localizado no plano focal é enviado para o infinito pela objetiva que o constitui [7]. Quando um feixe incide numa superfície refletora e a sua reflexão não é perpendicular, significa que existe um determinado deslocamento. Assim sendo, torna-se possível calcular essa quantidade de deslocamento d , da equação 3.3:

$$d = 2\alpha f \quad (3.3)$$

A inclinação de uma superfície ótica, figura 3.14, pode ser expressa em graus e é representado por α . O ângulo de incidência do feixe sob a superfície ótica a ser medido é dado por $\xi = \alpha$. A partir da reflexão do feixe pela superfície ótica, é possível calcular o erro entre o centro mecânico e o feixe, pelo ângulo incidente na superfície ótica é possível calcular-se o ângulo que representa o desfasamento angular entre o feixe e o eixo mecânico, $\sigma = 2\xi$.

Esse conhecimento permite entender mais concretamente os deslocamentos nos vários eixos que levam à formação desse ângulo. Assim sendo com base nesse ângulo é possível saber o deslocamento nos seus eixos, representado pela letra y , da equação 3.4:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} = \Delta\Theta y \quad (3.4)$$

Com base no deslocamento em y , torna-se possível calcular o ângulo de inclinação,

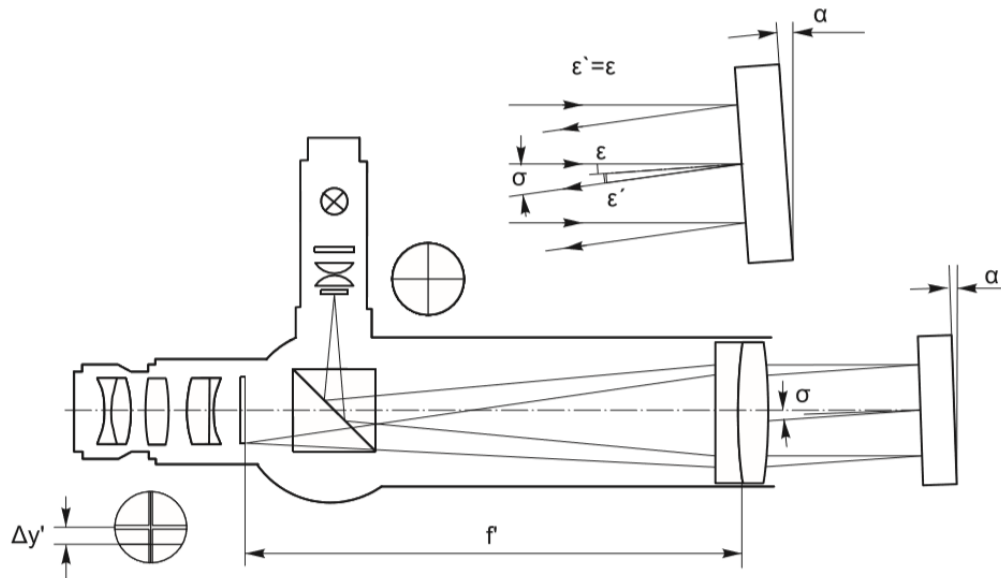


Figura 3.14: Autocolimador.[10]

3.6:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} = \frac{\Delta y}{2f'} \quad (3.5)$$

Na base nas equações anteriores está um Teorema bem conhecido, Teorema de Pitágoras. Que com base nos deslocamentos nos dois eixos no retículo é possível saber o ângulo de inclinação com mais precisão. Isto dependendo da precisão da escala presente no retículo.

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} = \sqrt{\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{4f'^2}} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{2f'} \cdot 206265 \text{ arcmin} \quad (3.6)$$

O ângulo de inclinação da superfície ótica é dado por α , enquanto que σ , é o ângulo do feixe relativo ao eixo mecânico do autocolimador. Já o $\Delta x'$ e $\Delta y'$ são os deslocamento da imagem no . O comprimento focal do autocolimador é dado por f' . Por último, $\Delta\theta_x$ e $\Delta\theta_y$ são os ângulos de leitura do autocolimador calibrado.

Assim sendo, com recurso do autocolimador é possível identificar o erro da lente em estudo. Assim quando se verifica na imagem desfasamentos apenas num dos eixos, estamos perante um problema de *shift*. Caso os desfasamentos verificados sejam nos dois eixos, trata-se de um problema de *tilt*. [10]

Medição do erro de alinhamento de uma superfície esférica

A medição do erro de alinhamento assenta em princípios óticos característicos do autocolimador, ao coloca-lo na direção de uma lente, segundo um movimento rotacional é possível medir o erro de alinhamento entre o eixo ótico e o eixo mecânico, figura 3.15. Inicialmente deve ser medido a primeira superfície ótica, o que significa que se deve encontrar o ponto focal desta. Para que isso seja possível a distância entre o autocolimador e a lente em estudo deve variar consoante o tipo de superfície ótica em análise. Quando a distância focal entre o autocolimador e a lente estiver no limiar da distância necessária, é visto o feixe de luz com a forma desse . Normalmente este tem a forma de uma cruz, o que a partir da comparação dessa projeção com o referencial é possível estudar o erro de alinhamento.

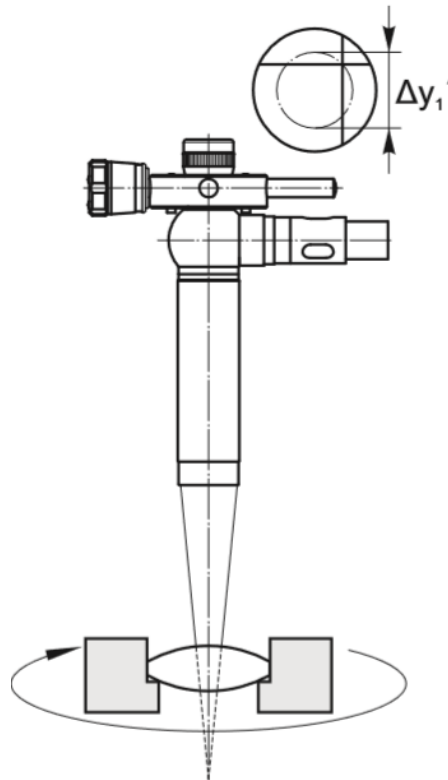


Figura 3.15: Análise quanto ao erro de alinhamento da primeira superfície ótica.[10]

Quando a cruz formada pela rotação da lente não coincide com o eixo mecânico, significa que existe um erro associado. Desse modo, esse erro é dado por:

$$a = \Delta y' \frac{f'_{va}}{4f'_{Ak}} \quad (3.7)$$

ou

$$\sigma = \frac{a}{R} [.343808 \text{ arcmin}] = \frac{\Delta y'}{R} \frac{f'_{Aa}}{4f'_{Ac}} [.343808 \text{ arcmin}] \quad (3.8)$$

A letra a representa a distância entre o centro de curvatura e o eixo de rotação. O ângulo do feixe relativo ao eixo mecânico do autocolimador é dado por σ . $\Delta y'$, o diâmetro do movimento do círculo, o f'_{Aa} comprimento focal do acessório e o f'_{Ac} comprimento focal do autocolimador, por último, R representa o raio de curvatura da superfície ótica.

Concluído o alinhamento da primeira superfície ótica é possível iniciar o processo de medição do erro de alinhamento da segunda superfície ótica, figura 3.16, de acordo com o exemplo utilizado.

Este exemplo utilizado para explicar o processo de medição do erro de alinhamento recorreu a uma medição por reflexão, no entanto existe uma outra forma, a medição por transmissão.

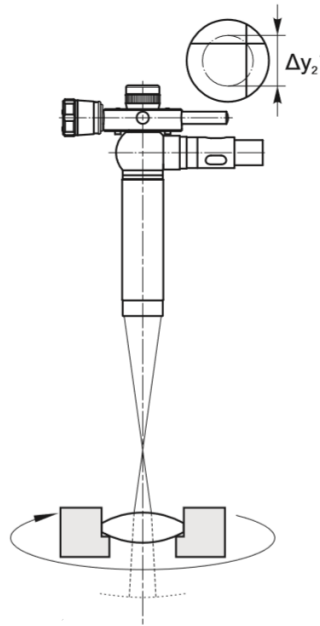


Figura 3.16: Análise quanto ao erro de alinhamento da segunda superfície ótica.

3.2.3 Medição por Transmissão

A medição do erro de alinhamento com recurso à transmissão dos feixes de luz apresenta uma alteração bastante importante no processo de propagação dos feixes em elementos óticos. Ao contrário da medição anterior, a análise efetuada por este método baseia-se no estudo da posição dos feixes depois da transmissão destes nas lentes. Para realizar esta medição é necessário outra distribuição do ensaio de teste, isto porque requer que a incidência do feixe luminoso seja aplicado numa posição contrária da lente onde é analisado. Ao passo que o método anterior, a análise do feixe é feita depois de passar pela lente. Esta distribuição deve-se ao fenómeno que serve de base para a medição, a transmissão, para isso, é utilizado um colimador com um onde é inserido a fonte luminosa de um dos lados da lente. A fonte de luz ao incidir no ganha a forma de uma cruz, utilizada para medir o alinhamento, depois de sair do , os feixes de luz ao percorrer o colimador tendem a se dispersar ao longo do mesmo. Por essa razão é que o colimador possui uma objetiva na sua extremidade que lineariza os feixes. De seguida, através de um prisma os feixes são direcionados para a lente. Os feixes são transmitidos na lente em análise, criando no caso da figura 3.17 o ponto focal dessa lente.

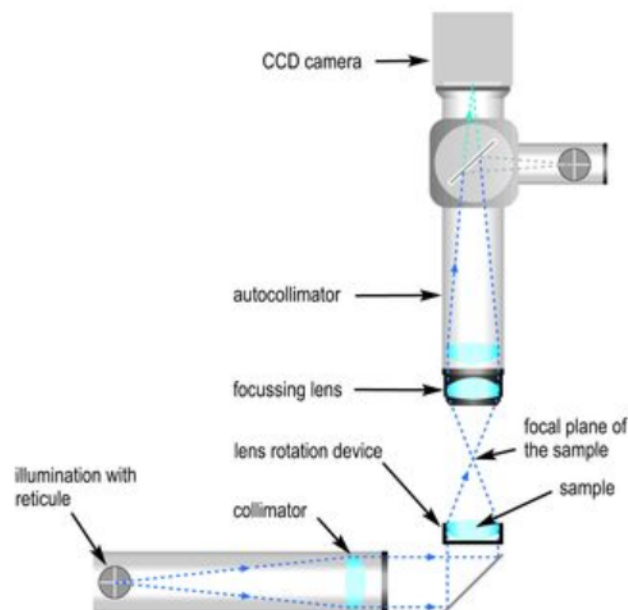


Figura 3.17: Medição por transmissão.[11]

A inclusão do autocolimador verificado na parte superior da figura 3.17, deve-se à necessidade de encaminhar e linearizar novamente os feixes. Isto porque um feixe de luz

tende a dispersar-se no ambiente, daí a necessidade da colocação de um autocolimador imediatamente acima do ponto focal, de maneira a que esses se linearizem novamente e se torne possível de os visualizar. O feixe percorre o autocolimador até encontrar outro prisma que direciona o feixe para outro . esse que permite escalonar os eixos. Como todos os elementos de medição estão perfeitamente alinhados, o centro desse retículo escalonado representa o centro do eixo mecânico do sistema. Por fim, o feixe é transmitido para a câmara CCD para ser estudado tal como na Medição por Reflexão. [11]

Assim sendo, torna-se importante entender quais são as grandes diferenças entre os dois métodos. Os valores resultantes destas duas medições são diferentes comparando-os num mesmo caso de estudo, isto é, torna-se possível definir a discrepância de valores entre métodos com recurso à seguinte expressão matemática.

$$T = (n - 1) \times R$$

T é o ângulo do modo de transmissão, n o índice de refração do vidro e o R o erro de inclinação da superfície superior, medida obtida pelo método de reflexão. A partir desta relação matemática é possível ter informações de um método, através de informações conhecidas do outro. Para que a escolha recaia num ou noutro método, torna-se necessário perceber quais as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Pelo método de transmissão, é possível saber que uma lente tem um erro de alinhamento, no entanto não permite saber qual das superfícies provoca esse erro. Para além disso, em certos casos, uma lente medida por transmissão pode não exibir qualquer erro de alinhamento. No caso de colocar a lente em estudo fixa por um mecanismo que utilize o ar para a fixar e ajustar, com o método de transmissão não é possível detetar a inclinação da lente. Se a escolha de colocação da lente for num dispositivo que utilize o vácuo para a fixar, este é menos sensível às vibrações e a intensidade da imagem é mais fácil de ser detetada. Para medição de dupletos utilizando um dispositivo motorizado de rotação de lentes, os resultados pelo método de medição por transmissão podem não ser conclusivos, já que os feixes são afetados por esse erro duplamente, pela cimentação da superfície e pelo topo da mesma. Por último, para medição de uma lente montada num dispositivo de rotação motorizada, é impossível detetar o inclinação da lente.

O método de medição por Reflexão, apresenta mais eficácia relativamente à medição do alinhamento com Transmissão, já que são utilizados mecanismos de ar para movimentar as lentes. Com um sistema de vácuo, a medição do alinhamento por reflexão apresenta resultados mais precisos que a técnica anterior. Para além disso, consegue medir diretamente o erro de inclinação da superfície. Contudo, este método apresenta

uma desvantagem, não é útil para teste de concentricidade.

A medição de alinhamento de uma lente varia consoante o tipo de superfícies que constituem a lente que se está a trabalhar. A medição de uma simples lente é diferente da medição de um dubleto, bem como de um triplete, para além do número de superfícies que diferencia o melhor método aplicar, também o seu tipo interfere nesta análise. [11]

3.2.4 Medição e Alinhamento de conjuntos óticos através do torneamento

O método com recurso a torneiar a lente é o único que permite alinhar todos os constituintes de uma lente depois de montada. A sua versatilidade, permite que diferentes tamanhos de secções sejam corrigidas. Inicialmente, o casquilho com a lente é fixo numa posição perfeitamente alinhada com o eixo mecânico conhecido.

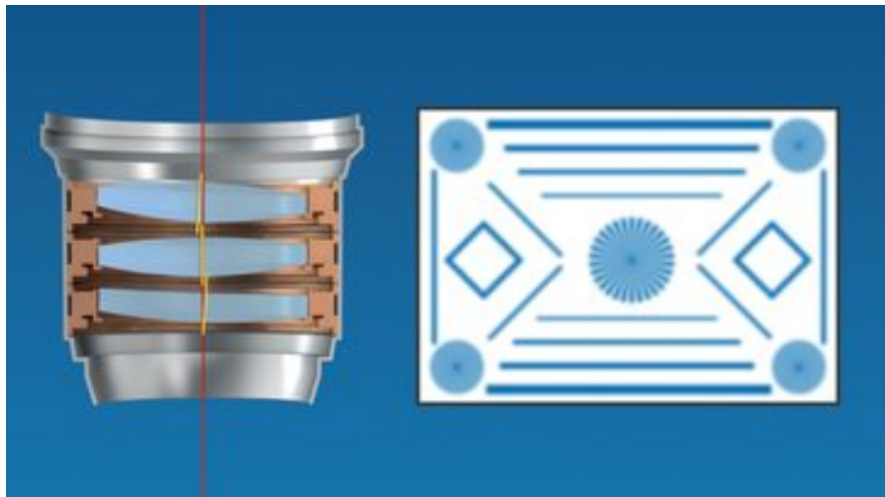


Figura 3.18: Eixo ótico desalinhado em relação ao eixo mecânico. [11]

Algumas técnicas utilizam ferramentas de medição do desfasamento do eixo ótico face ao eixo mecânico, ao passo que outras técnicas, utilizam apenas a rotação do conjunto ótico para medir esse desfasamento. Esse eixo mecânico é formado pela rotação do fuso, quando ambos os eixos se encontrarem coincidentes, significa que todos os elementos do conjunto ótico se encontram alinhados. Iniciando aproximação da ferramenta de corte do conjunto ótico, enquanto este gira em torno de si mesmo. Esta ferramenta encontra-se colocada paralelamente ao eixo do fuso para abranger toda a superfície do conjunto, desloca-se na vertical à medida que o fuso com a lente se encontra a girar.

Apesar deste ser o princípio básico do alinhamento com recurso a torneamento, algu-

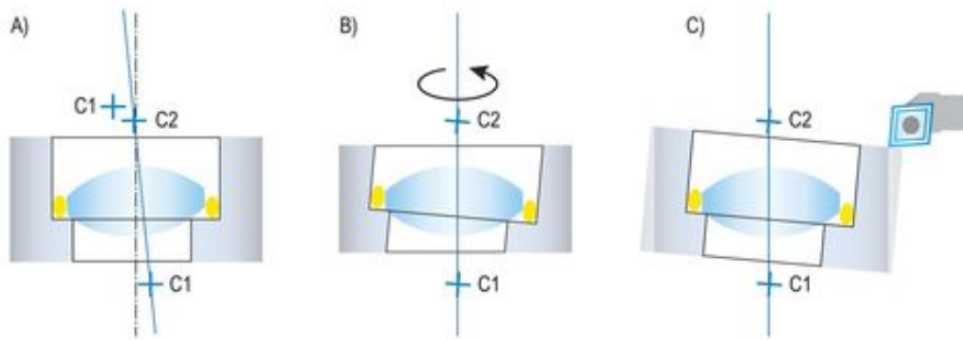


Figura 3.19: (a) Eixo óptico desalinhado com o eixo mecânico, (b) casquilho alinhado com a lente e (c) casquilho maquinado na posição de alimento. [11]

mas empresas adicionam tecnologia de precisão nos seus produtos para os tornar ainda mais precisos. Como é o caso da Trioptics que inclui sensores de distância tátil e óticos que garantem as zonas efetivas onde deve ser feito o torneamento da superfície, isso significa que à medida que é feito o torneamento da superfície esses sensores vão fornecendo dados. Com este processo a Trioptics garante que a precisão do alinhamento das superfícies óticas com a parte mecânica pode ser inferior a $0,5\mu\text{m}$. Alguns desses dispositivos são o ATS 100, figura 2.3, e a ATS 200. [11]

3.3 Isogyre

Consiste numa sombra escura numa figura de interferência, que representa o local de todos os pontos que correspondam às direções de transmissão através de uma lente na qual o estado de polarização dos raios incidentes é inalterado ao passar pela mesma. Este termo permite descrever a intensidade e os padrões de contorno observados quando uma lente é colocada entre o feixe polarizado e o local de observação. Este princípio é testado em lentes plano convexas e côncavas-convexas, posteriormente é analisado o efeito ótico deste termo, usando geometria ótica e a simulação *Code V*. Os resultados obtidos são usados para inspecionar as medidas da inclinação e desfaseamento das lentes.

Lentes Plano-Convexo

Para ilustrar o modelo matemático *Isogyre*, é colocado entre a fonte emissora de raios polarizados e o local de observação uma lente plano-convexa, figura 3.20.

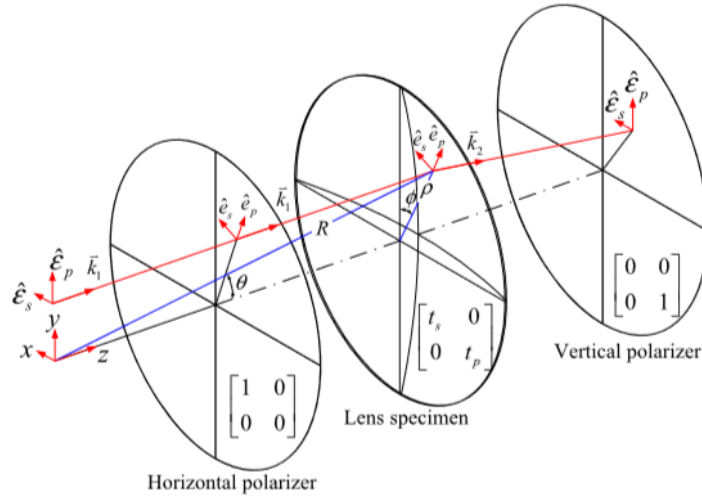


Figura 3.20: Setup ótico do modelo *Isogyre* com as respectivas coordenadas.[12]

E_0 representa a intensidade do campo elétrico da fonte de luz colimada, os vetores unitários dos eixos verticais e horizontais são representados por $\hat{e}_s$ e $\hat{e}_p$, enquanto que o $\hat{e}_s \cdot \hat{e}_p = 0$. A luz do feixe é projetada noutra secção do plano de forma a calcular-se os coeficientes de refração, onde o ϕ é o ângulo de rotação, $\vec{k}_1$ e $\vec{r}$ são vetores das ondas incidentes e das observações, respetivamente. t_s , equação 3.9, e t_p , equação 3.10, são coeficientes de transmitância, definidos pela equação de *Fresnel*, segundo as direções $\hat{e}_s$ e $\hat{e}_p$ respetivamente.

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (3.9)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad (3.10)$$

A razão de transmitância depende do ângulo incidente e do índice de refração do material. Os ângulos incidentes e de refração estão presentes nas equações através de θ_1 e θ_2 . Por sua vez, existe dois meios diferentes onde o feixe de luz se propaga, existindo diferenças nessa propagação. Como os meios em causa são o meio ambiente e o material ótico da lente, nas equações dos coeficientes de transmitância são representados por n_1 e n_2 . Os vetores de propagação das ondas incidentes e refratadas são obtidos através da lei de *Snell*, 3.11.

$$\vec{k}_1 \cdot \vec{r} = \vec{k}_2 \cdot \vec{r} \quad (3.11)$$

Assim torna-se possível escrever as equações de campo elétrico que descrevem as direções no eixo $\hat{e}_s$, equação 3.12 e no eixo $\hat{e}_p$, equação 3.13.

$$\vec{E}_1 = \hat{e}_s E_0 e^{-j \vec{k}_1 \cdot \vec{r}} = (\hat{e}_s E_0 \cos \phi + \hat{e}_p E_0 \sin \phi) e^{-j \vec{k}_1 \cdot \vec{r}} \quad (3.12)$$

$$\vec{E}_2 = (\hat{e}_s t_s E_0 \cos \phi + \hat{e}_p t_p E_0 \sin \phi) e^{-j \vec{k}_2 \cdot \vec{r}} \quad (3.13)$$

Devido às duas ondas elétricas se encontrarem ortogonais entre si, a onda sob o eixo $\hat{e}_s$ acaba por se anular, dando origem a uma equação de campo elétrico resultante, dado pela equação 3.14

$$\vec{E}_{res} = \hat{e}_p \sin \phi \cos \phi (t_p - t_s) E_0 e^{-j \vec{k}_2 \cdot \vec{r}} \quad (3.14)$$

Outros dados importantes de ser calculados com base no figura 3.20 são $\sin \theta_1 = \rho/R$, $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - (\rho/R)^2}$ e $\cos \theta_2 = \sqrt{1 - (n_1 \rho / n_2 R)^2}$, onde R é a curvatura da superfície ótica, ρ é o local do feixe incidente da luz entre 0 e metade da abertura ($D/2$). A equação resultante pode ser rescrita utilizando ótica geométrica tal como a equação 3.15:

$$\vec{E}_{res} = \hat{e}_p \sin \phi \cos \phi \times \left[\frac{2n_1 \cos \theta_1 (n_1 - n_2) (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{(n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2) (n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1)} \right] \times E_0 e^{-j \vec{k}_2 \cdot \vec{r}} \quad (3.15)$$

Podendo também ser representada sob a forma de matriz como mostra na equação

3.16:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_{res} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\epsilon \\ E_\psi \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Lentes Côncavas - Convexas

Estas lentes têm duas superfícies o que significa que os cálculos para este tipo de lentes são mais complexas em comparação com as lentes plano - convexas. Tal como as lentes anteriormente abordadas, as lentes côncavas - convexas seguem as equações de Transmissão de *Fersnel* como apresentadas nas Equações de 3.9 a 3.13. Como se trata de duas superfícies é necessário calcular o campo elétrico criado em cada superfície refratada, descritas pelas equações 3.17 e 3.18, onde a i representa o número de refrações numa dada superfície, o E_s e o E_p são as amplitudes polarizadas ao longos das direções $\hat{e}_s$, e $\hat{e}_p$, respetivamente.

$$\begin{bmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{bmatrix}_i E_i = \begin{bmatrix} t_s & 0 \\ 0 & t_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \end{bmatrix}_i \quad (3.17)$$

$$\vec{E}_{i+1} = \left(\frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_{i+1} \cos \theta_{i+1}} \hat{e}_s E_{s(i)} + \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_{i+1} + n_{i+1} \cos \theta_i} \hat{e}_p E_{p(i)} \right) e^{-j \vec{k}_{i+1} \cdot \vec{r}} \quad (3.18)$$

Assim sendo, numa lente côncava - convexa o campo elétrico resultante é dado pela equação 3.19:

$$\vec{E}_{res} = \hat{\xi}_p \sin \phi \cos \phi (t_{p(2)} t_{p(1)} - t_{s(2)} t_{s(1)}) E_0 e^{-j \vec{k}_3 \cdot \vec{r}} \quad (3.19)$$

A partir da equação 3.19 que define o efeito de *Isogyre* numa lente côncava-convexa, torna-se possível verificar que este efeito, neste tipo de lente, é menor que em comparação com a lente plano-côncava ou plano convexa, isto porque o residual $(t_p - t_s)$ diminui. Permitindo concluir que a intensidade de *Isogyre* diminui quanto maior for o número de superfícies e transmissões de uma lente.

A evolução das lentes, provoca um aumento do número de superfícies óticas, de forma a obter cada vez melhores imagens e para diferentes aplicações. A inclusão de mais superfícies óticas e novos materiais no revestimento, levou ao aparecimento de mais erros nas imagens obtidas a partir da lente. A esses erros verificados nas imagens de uma lente, são conhecidos por aberrações. São provocadas por inclinações ou desfasamentos das

superfícies óticas face ao revestimento mecânico. Algumas das aberrações encontradas por esses erros são o coma e o astigmatismo.

De forma a poder quantificar a inclinação e o não alinhamento da lente, foi atribuído à primeira superfície como a base, em relação ao eixo de referência, usando o $\hat{e}_\alpha$ e $\beta\hat{e}_\beta$ para descrever a inclinação interior e o desalinhamento. O ângulo dado por α e β são valores escalares que representam a inclinação (graus) e o alinhamento (milímetros), fase ao eixo de referência. O $\hat{e}_\alpha$ é o vetor unitário que representa a rotação do eixo, enquanto que o $\hat{e}_\beta$, é o vetor unitário que representa a direção do não alinhamento. A figura 3.21 (a) representa uma lente perfeita, sem qualquer tipo de erro de inclinação ou de alinhamento. Ao passo que na figura 3.21 (b), a lente encontra-se inclinada com $\alpha = 2$ e com uma direção de $\hat{e}_\alpha = (1, 0)$. Por último, a lente encontra-se não alinhada segundo eixo que serve de referência em $\beta = 2mm$, segundo a direção $\hat{e}_\beta = (0, 1)$. A análise do diagrama de pontos tem sido usado para prever a qualidade da lente desde 1963. Os diagramas pontuais apresentados na figura indicam que a influência da inclinação é igual à influência do desalinhamento. Isso também seria observado no contorno *Isogyre*.

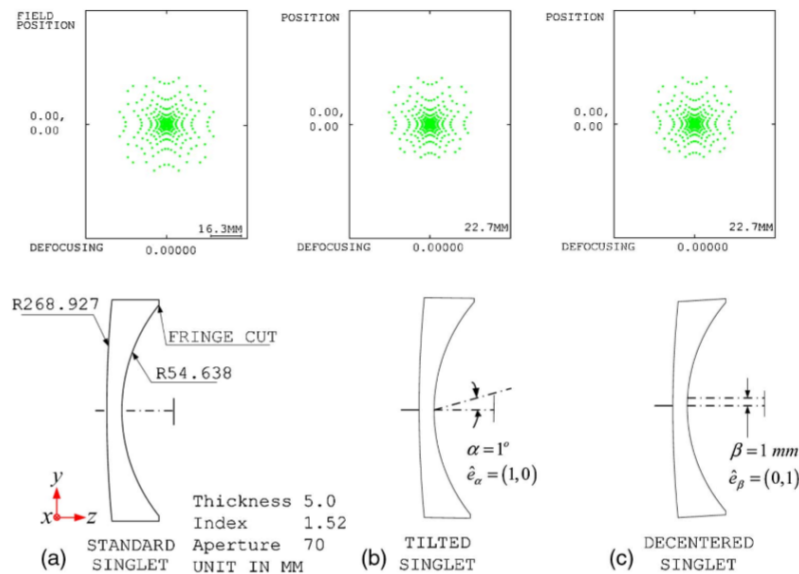


Figura 3.21: (a) lente sem erros, (b) lente inclinada e (c) lente descentrada. [12]

O método aqui detalhado é capaz de produzir cerca de 8000 amostras diárias. Um autocolimador é utilizado para medir a inclinação e o alinhamento. Para inspecionar a lente é utilizado o programa *CodeV* e uma análise numérica. O que representa uma rápida e precisa inspeção. Desse modo, o método de inspeção envolve a produção de imagens *Isogyre* utilizando processamento de imagem, como o recurso a uma câmera

digital. A imagem é então analisada para determinar a localização do centro da lente simples.

O procedimento de inspeção ótica automática envolve a construção de um círculo de melhor ajuste, selecionando os pixels x_i e y_i em torno do limite da lente. Permitido assim calcular o centro geométrico a partir das coordenadas desses pixels. As fórmulas 3.20 e 3.22 permitem calcular os centros:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} x_i, \quad (3.20)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} y_i, \quad (3.21)$$

Utilizando as equações 3.20 e 3.22 para calcular o centro dos vários pixels existentes na amostra, é possível definir a origem das coordenada polares em $(\bar{x}, \bar{y})$. Permitindo a partir dessa origem calcular o centro ótico de uma imagem *Isogyre*, equações 3.22 e 3.24.

$$\sigma_\rho = \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \rho \left| \vec{E}_{res} \right|^2 \rho d\rho d\phi \quad (3.22)$$

$$\hat{\sigma}_\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \frac{1}{\phi} \left| \vec{E}_{res} \right|^2 \rho d\rho d\phi \quad (3.23)$$

Nas equações anteriores a componente $\left| \vec{E}_{res} \right|^2$ representa o resultado da intensidade da imagem *Isogyre* calculados através das equações 3.14 e 3.19. D é o diâmetro da abertura da lente, enquanto que σ_ρ e σ_ϕ são as localizações azimutais do centro ótico. Representando também a variância lateral e azimutal entre o centro geométrico e ótico. Assim sendo, existe uma relação entre a definição de inclinação ($\alpha\hat{e}_\alpha$) e o desalinhamento ($\beta\hat{e}_\beta$), com o valor escalar resultante do cálculo da variância lateral (σ_{rho}) e com o vetor da variância azimutal ($\hat{\sigma}_\phi$). Os dois indicadores (σ_{rho}) e ($\hat{\sigma}_\phi$) permitem quantificar as imperfeições interiores de uma lente e indicar as suas direções. Uma lente está perfeitamente alinhada quando o centro geométrico e o centro ótico são coincidentes.

A figura 3.22 (a) representa uma lente plano-convexa perfeitamente alinhada. Uma cruz vermelha encontra-se centrada, que representa o centro geométrico. Uma outra cruz, neste caso verde encontra-se na mesma posição que a anterior, significando o centro ótico da lente. A relação entre as duas cruzes permite afirmar que o centro geométrico e ótico são simétricos, logo a lente está alinhada. Por outro lado, a figura 3.22 (b) representa uma lente plano-convexa com uma inclinação de 1. Essa inclinação permite concluir que

o centro ótico tem uma localização diferente do centro geométrico. O que equivale dizer que a lente não está alinhada.

O centro geométrico é obtido através da borda da lente, o que equivale dizer que este ponto mantém-se sempre enquanto se utilizar a mesma lente. A localização do centro ótico situa-se numa posição diferente devido ao ângulo de inclinação presente. A lente deve ser colocada numa posição não colinear com a utilizada para definir o centro geométrico. Logo, a inclinação da lente é diretamente proporcional à posição do centro ótico. O método proposto utiliza o efeito *Isogyre* para fornecer uma capacidade com uma alta velocidade de inspeção (0,78 s ou menos). Esse valor pode ser ainda melhor caso a velocidade do computador seja superior.

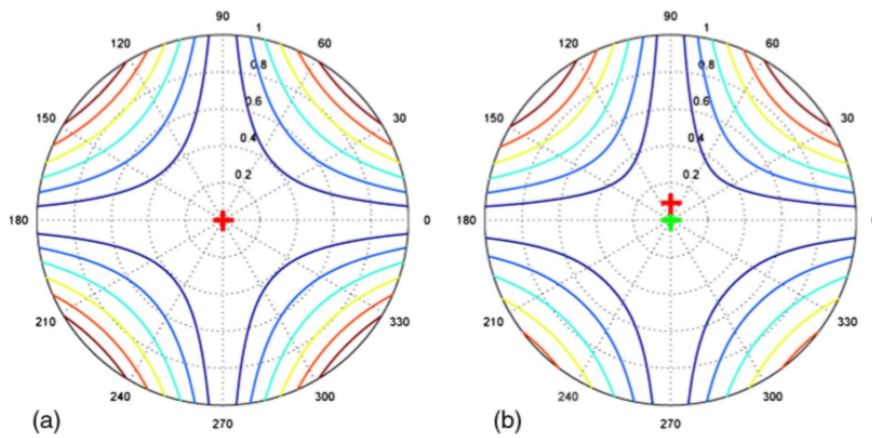


Figura 3.22: Contorno *Isogyre* (a) uma lente plano-convexa alinhada e (b) lente plano-convexa inclinada. [12]

Este método descreve funções de inspeção para detetar erros em lentes, primeiro para a variância lateral (σ_{rho}) e segundo para a variância azimutal ($\hat{\sigma}_\phi$). A variância lateral entre o centro geométrico e o centro ótico é utilizada para quantificar a inclinação ou o desalinhamento da lente. Enquanto que a variância azimutal é utilizada para conhecer as direções óticas dessas imperfeições. Estes dados podem ser obtidos utilizando o traçado de raio inclinado [26]. Neste estudo os resultados numéricos obtidos foram tidos como base o traçado de raio inclinado para lentes de plano-convexo e *CodeV* para lentes complexas. Foi calculado inicialmente a intensidade de campo total do *Isogyre*, e de seguida, com recurso ao *MATLAB* é construído as funções de inspeção.

A função de inspeção desenvolvida neste estudo contém 12 variáveis, variável lateral (σ_ρ), variável azimutal ($\hat{\sigma}_\phi$), ângulo de inclinação (α), direção da inclinação ($\hat{e}_\alpha$), valor

do não alinhamento β , direção do não alinhamento $\hat{\epsilon}_\beta$, primeiro raio de curvatura R_1 , segundo raio de curvatura R_2 , índice de refração do meio ambiente n_1 , índice de refração da lente n_2 , espessura da lente t e abertura da lente D , equação 3.24.

$$f(\sigma_\rho, \hat{\sigma}_\phi) = g(\alpha, \hat{\epsilon}_\alpha, \beta, \hat{\epsilon}_\beta, R_1, R_2, n_1, n_2, t, D) \quad (3.24)$$

f e g são duas funções com múltiplas variáveis que podem ser rescritas tal como mostra a equação 3.25. Isto porque, (σ_ρ) e $(\hat{\sigma}_\phi)$, são resultados das medições, (α) , $(\hat{\epsilon}_\alpha)$, β e $\hat{\epsilon}_\beta$ são variáveis de controlo da simulação e por último, R_1 , R_2 , n_1 , e n_2 , são variáveis independentes. A função pode ser adaptada de forma a que seja possível quantificar o valor da inclinação e do alinhamento para isso utiliza-se as equações 3.25 e 3.26:

$$f_1(\sigma_\rho) = g_1(\alpha, \beta) \quad (3.25)$$

$$f_2(\hat{\sigma}_\phi) = g_2(\hat{\epsilon}_\alpha, \hat{\epsilon}_\beta) \quad (3.26)$$

De forma a diminuir o tempo de inspeção, este método utiliza duas equações (3.27) e (3.28) que relacionam as imperfeições $(\sigma_\rho, \hat{\sigma}_\phi)$, possibilitando através destas saber o valor concreto do centro ótico. De C_1 a C_5 são os coeficientes da função de inspeção.

$$\sigma_\rho = C_1\alpha + C_2\beta + \epsilon_\rho \quad (3.27)$$

$$\hat{\sigma}_\phi = C_3\hat{\epsilon}_\alpha + C_4\hat{\epsilon}_\beta + C_5\hat{\epsilon}_\phi \quad (3.28)$$

Um caso de estudo consiste em utilizar valores de curvatura de lente plano-convexa de $R_1 = \infty$ e $R_2 = 150, 200, 250$ e 300 . O diâmetro de abertura da lente utilizada é de 70 mm e a inclinação da lente varia entre $\alpha = 0$ e $\alpha = 6$, com $\hat{\epsilon}_\alpha = (1, 0)$. No caso em estudo a lente tem não alinhamento igual a zero ($\beta = 0$) e a função de inspeção é resumida sob a forma de $f_1(\sigma_\rho) = g_1(\alpha)$. O resultado da função anterior é uma função ímpar, porque o sinal da variância lateral é coincidente com o valor positivo ou negativo da inclinação verificada. A inclinação das curvas ilustra que quanto maior for a inclinação interior maior será o deslocamento do centro. O raio da superfície R_2 vai aumentando e com ele aumenta igualmente a distância focal. Recorrendo ao gráfico da figura 3.23 é possível verificar que a inclinação interior tem maior influência em lentes com maior distância focal. As curvas presentes na figura 3.23 incluem regiões lineares e não lineares ao longo da sua forma. No que diz respeito à região linear esta é descrita por uma função

de inspeção para medir a qualidade da lente, ao passo que a região não linear é mais adiante detalhada a sua funcionalidade, contudo é o resultado da inclinação excessiva de uma lente que distorce substancialmente a imagem *Isogyre*.

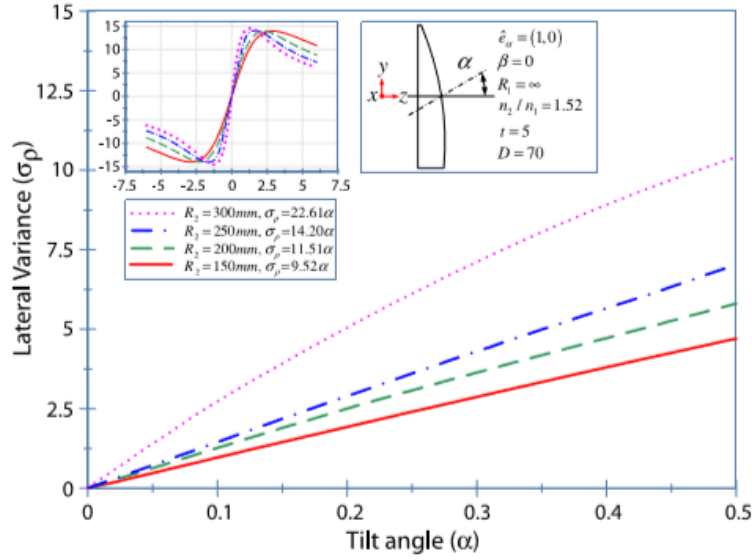


Figura 3.23: Função de inspeção para inclinações em diferentes superfícies de lentes plano-convexas. [12]

No caso do não alinhamento de uma lente côncava-convexa com a inclinação, o seu raio $R_1 = 268.927mm$ e $R_2 = 54.628mm$, a espessura entre as suas superfícies é de $5mm$ medido em relação ao centro da lente. O diâmetro da lente é de cerca de $70mm$ enquanto que o índice de refração é uma variável controlada que varia de valor de 1.50 a 1.56 com aumentos de 0.2. A inclinação varia de $\alpha = 0$ a $\alpha = 2$ com $\hat{e}_\alpha$.

De ressaltar que de acordo com o gráfico da figura 3.24, as superfícies que maior se notou não estarem alinhadas entre si foram as que utilizaram um índice de refração de 1.50. A região linear utilizada variou de $\alpha = 0$ a $\alpha = 1$ ou de $\beta = 0$ a $\beta = 1$.

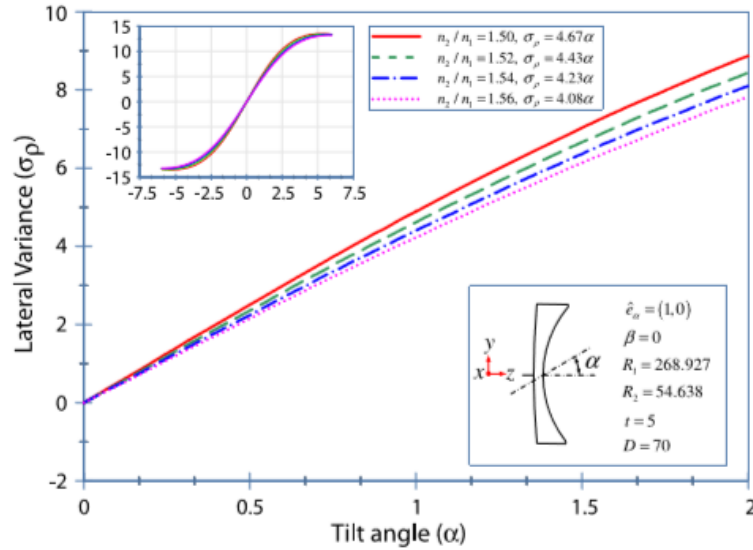


Figura 3.24: Função de inspeção para inclinações de superfícies de lentes plano-convexas com diferentes índices de refração.[12]

Ao passo que pela figura 3.25 está presente uma lente côncava-convexa não alinhada, com um a inclinação média de 0,99, ao passo que na lente côncava-convexa inclinada apresenta uma inclinação média de 4,35. Comparando o gráfico da figura 3.24 com o gráfico da figura 3.25, verifica-se que o efeito do não alinhamento da lente apresenta menor efeito na inclinação média.

Posto isto, com recurso a dois programas em *MATLAB*, com o objetivo de analisar, guardar os resultados e aplicar a função de inspeção aos dados obtidos durante o processo de medição de uma lente, o primeiro programa é utilizado para construir uma lente, que no caso foi uma lente côncava-convexa simples. E o segundo programa, controla as variáveis usadas na análise numérica, como α , $\hat{e}_\alpha$, β , $\hat{e}_\beta$, $n-1$ e n_2 , e guarda a intensidade do *Isogyre* sob a forma de vetores.

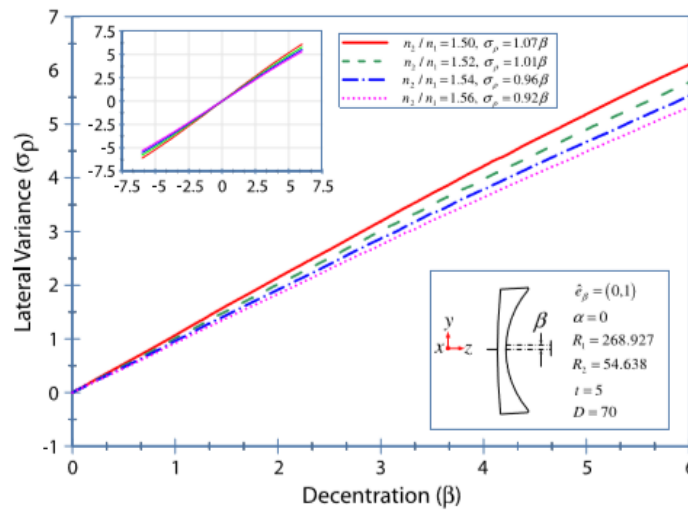


Figura 3.25: Função de inspeção para superfícies não alinhadas que fazem parte de lentes plano-convexas com diferentes índices de refração. [12]

Experiência

É utilizado um sistema de inspeção de lentes óticas, figura 3.26, de forma a medir possíveis erros numa lente simples. Recorre a uma câmara digital para registar a intensidade *Isogyre*. O sistema de inspeção recorre a uma luz colimada, a um polarizador horizontal, a uma lente simples ou a uma lente com várias superfícies e a um sistema de imagens. Um programa automático de inspeção ótica, usa as funções de inspeção detalhadas anteriormente.

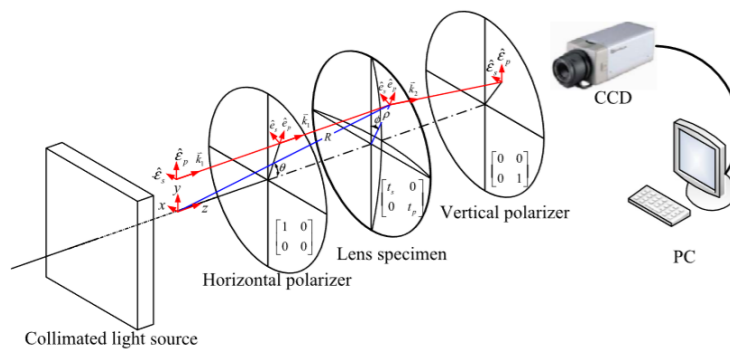


Figura 3.26: Sistema ótico de inspeção automática. [12]

Iniciando pela parte inferior do sistema ótico de inspeção automática figura 3.27, na sua base situa-se um polarizador sob uma fonte de luz colimada para produzir uma onda

linear polarizada. O segundo elemento é um suporte de lentes ajustáveis, para segurar as lentes a serem inspecionadas com rapidez e com precisão. Um sistema de ajuste da lente é ajustado à posição, de forma a centra-la. Também utiliza um segundo polarizador abaixo do sistema onde a câmera digital se encontra acoplada.

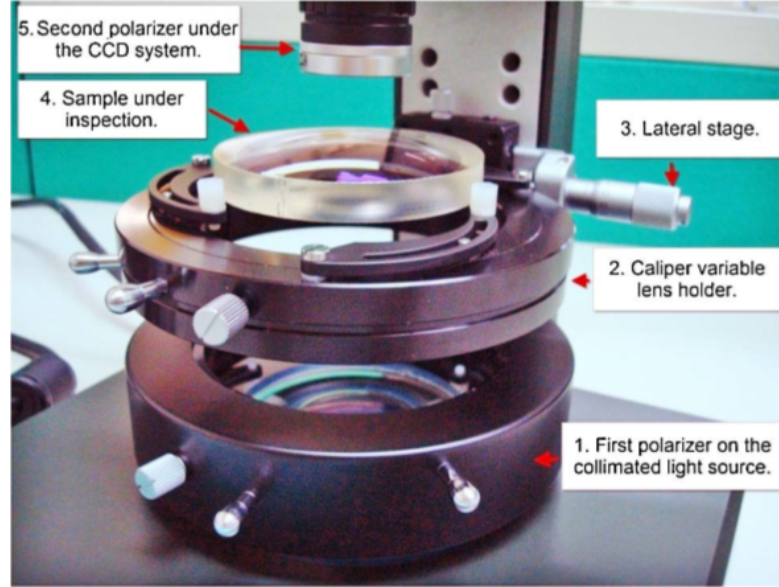


Figura 3.27: Base do sistema ótico de inspeção automática. [12]

A intensidade ao longo da amostra e a localização do centro são analisados a partir do processamento digital de imagem. A partir desses dados é possível calcular concretamente o local do centro ótico com base nas equações 3.20 e 3.22. A medição do perfil da lente pode ser realizada usando-se pontas de varredura ou interferometria. Este estudo pressupõe que o perfil da superfície não é influenciado pela inclinação ou pelo não alinhamento, mantendo assim uma forma simétrica ao longo do eixo de referência.

A resolução do método proposto (σ_{res}) depende principalmente da resolução espacial da câmera CCD (I_{res}) e do coeficiente da curva de inspeção C_1 ou C_2 , equação 3.29:

$$\sigma_{res} = I_{res} \times C \quad (3.29)$$

Em que I_{res} é $mm/pixel$ baseado no campo de visão e do número máximo de pixels que a câmera CCD consegue fornecer. De ressaltar que as unidades de σ_{res} são em $/pixel$ para medições de inclinações e $mm/pixel$ no caso de medições do alinhamento. Desse modo, o método descrito depende principalmente de três fatores, do coeficiente da função inspeção, do diâmetro da lente e dos pixels da câmera.

Foi utilizado uma interface que permite inserir os dados da lente a ser trabalhados bem como verificação dos dados relevantes durante o processo de inspeção. Desse modo, o painel de controlo é dividido em duas áreas da figura 3.28, o lado esquerdo é a área destinada à imagem e o lado direito os resultados obtidos. Pela imagem da inspeção da lente é possível verificar a distribuição da intensidade e os centros. A verde a cruz que assinala o centro geométrico e a vermelho a cruz do centro ótico. Os resultados obtidos, nomeadamente, a variância lateral, a variância azimutal, bem como a inclinação o descentramento, são mostrados no lado direito do painel de controlo. O histograma ilustra os resultados da medição de um lente por lote com os valores estatísticos relativos às imperfeições, uma forma de avaliar a qualidade da lente.

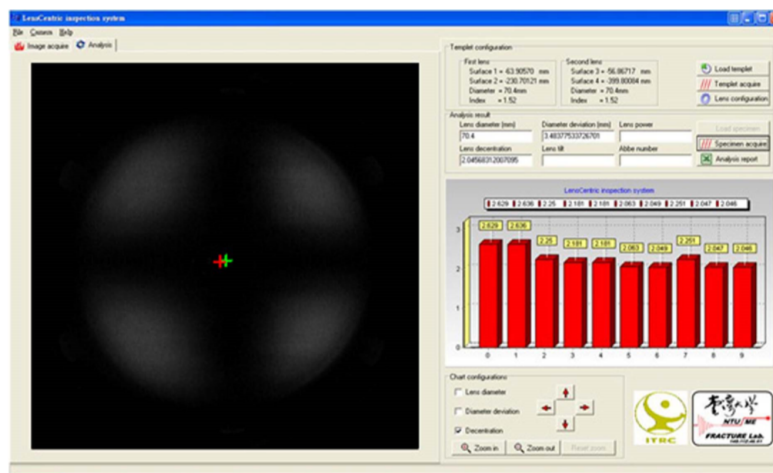


Figura 3.28: Sistema ótico de inspeção automática. [12]

Este método propõe uma nova abordagem para a inspeção de lentes quanto à sua inclinação e alinhamento. Baseia-se em teoremas analíticos para calcular os centros, utilizando as variâncias laterais e azimutais para determinar o ângulo, a direção da inclinação e o alinhamento. O programa desenvolvido permite a inspeção ótica automática de lentes com um diâmetro de 70 mm, obtendo uma resolução teórica de $0,14 \text{ /pixel}$ na inclinação e de 33 m/pixel no alinhamento. O tempo que leva a efetuar uma inspeção é de apenas 0,78 s. Por último, o sistema proposto é mais rápido que os métodos convencionais que utilizam interferômetros ou autocolimadores. [12]

3.4 Aberrações Óticas

Todos os fenómenos que prejudiquem a qualidade de uma imagem, a nível ótico são designados por aberrações. Algumas das mais comuns e importantes para esta dissertação serão abordadas de seguida. Aberração Cromática, figura 3.29, é um problema óptico que ocorre quando uma lente é incapaz de colocar todos os comprimentos de onda no mesmo plano focal, resultado do efeito de dispersão, da variação do índice de refração com o comprimento de onda. A distância focal de uma lente depende do seu índice de refração e portanto os seus comprimentos de onda diferem para cada superfície ótica. Ao nível da imagem, existe o aparecimento de bordas coloridas a vermelho, verde, azul, amarela, roxa e magenta. Este fenómeno é bastante comum em torno de objectos com alto contraste.



Figura 3.29: Aberração Cromática. [13]

Aberração Coma, figura 3.30, surge quando os raios de um ponto fora do eixo

mecânico da lente passam através do perímetro da lente e são focados fora desse eixo. Esse nome é dado devido à semelhança a um cometa quando os seus raios emergem entre o foco paraxial e marginal, esta aumenta consoante abertura e inclinação dos raios da luz. Este fenómeno pode ser visto em qualquer sistema óptico. O uso do diafragma ajuda a evitar o aparecimento do coma, isto porque limita abertura do sistema óptico.

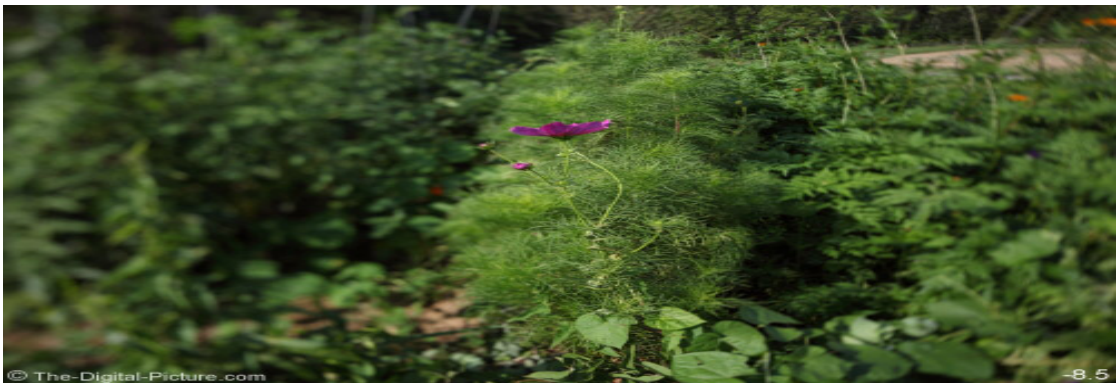


Figura 3.30: Aberração Coma. [13]

Inclinação da Lente, figura 3.31 (a), significa que o plano da lente não está paralelo ao plano da imagem, ou sensor da imagem, o que significa que a imagem pode ficar desfocada em certas zonas. O deslocamento da lente 3.31 (b), ao contrário da inclinação, o plano da lente está paralelo face ao plano da imagem. No entanto, o primeiro plano encontra-se deslocado do eixo mecânico, significando que os centros dos dois planos não são colineares entre si.[13]



(a)



(b)

Figura 3.31: (a) Lente com eixo ótico deslocado. (b) Lente com eixo ótico inclinado.[13]

Capítulo 4

Implementação e Resultados

O objetivo da dissertação é o desenvolvimento de um sistema de apoio ao processo de alinhamento de lentes que possa ser integrado com a máquina já disponível na empresa. Explorando e resolvendo problemas ambíguos para os seus utilizadores e sobretudo tornar este processo menos susceptível a falhas. Devido ao elevado custo em obter um protótipo robusto capaz de receber o input do software e efectuar todo o processo necessário até ao alinhamento da lente, levou a que existisse uma mudança do objectivo inicial. A construção do protótipo de alinhamento foi abandonado, devido ao preço elevado para a sua obtenção.

Apesar do protótipo não ter sido construído, nesta dissertação é apresentado o projeto para uma máquina de alinhamento de lentes, para além disso, é realizado o estudo de todo o processo de alinhamento da lente com recurso a ferramentas tecnológicas que permitam perceber os fenómenos existentes no processo. As imagens obtidas são processadas de forma a serem utilizadas em prol da evolução do processo de alinhamento de uma lente. A divisão seguinte permite que o trabalho desenvolvido seja uma base para a obtenção de um mecanismo de alinhamento de lentes:

- Protótipo Proposto.
- Processamento de imagem - deteção do ponto de cruz emitido pela luz emissora.
- Relacionar o Objecto com o Dataset.
- Desenvolvimento da estrutura no Sistema ROS.
- Processamento de dados
- Previsão

4.1 Protótipo Proposto

O protótipo projetado pretende ser extremamente robusto e eficiente no processo de alinhamento. Dessa forma a sua configuração vertical permite maior robustez, principalmente durante o processo de torneamento, já que durante esse processo são aplicadas forças elevadas que originam ao longo do tempo desgaste, razão essa que se privilegiou a construção vertical em detrimento da horizontal. Para efetuar a medição do alinhamento de lentes, o protótipo desenvolvido utiliza o método por reflexão devido à sua versatilidade, como apresentado no capítulo Fundamentos Teóricos.

A utilização de uma guia linear com cerca de um metro de comprimento permite que toda a estrutura de aquisição da imagem possa se mover para se encontrar os pontos focais das superfícies óticas, nessa estrutura estão acoplados um autocolimador, uma fonte de luz e uma câmera CCD. O Autocolimador contém um retículo que permite dar a forma de uma cruz à luz projetada e outro escalonado com a função de referencial. Apesar de no desenho não estar presente, na extremidade do autocolimador é adicionado um revolver de objetivas para permitir uma ampla margem de superfícies óticas a serem estudadas. Toda esta estrutura está perfeitamente alinhada com o sistema que fixa a lente. Esse sistema permite fixar e mover a lente, com recurso a um sistema de ar comprimido. Para verificar o alinhamento é necessário colocar a lente a girar sobre si mesma, com recurso a um motor com um sistema de correias de forma a controlar todo este processo, figura 4.1. Com esta configuração pretende-se atingir velocidades baixas adequadas para o alinhamento de cada superfície ótica quando todas as superfícies estiverem alinhadas entre si, e que seguidamente possa atingir velocidade elevadas de rotação para torneir a estrutura exterior da lente. O peso, a robustez e o custo foram igualmente elementos que contribuíram aquando da elaboração deste sistema de rotação, figura 4.1.

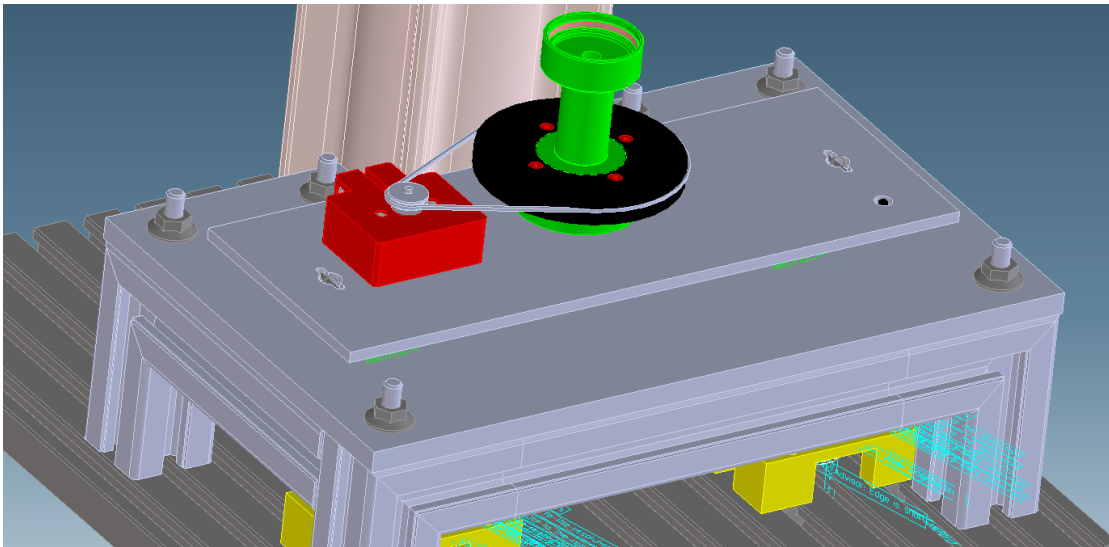


Figura 4.1: Sistema de rotação da lente a ser alinhada.

A parte seguinte é a parte mais sensível e possivelmente a zona de todo este protótipo que mais dificuldades causou na sua projeção. Esta zona é responsável por inclinar e deslocar a lente na ordem dos micros de forma a alinhar cada superfície ótica. Dessa forma o sistema contém dois motores extremamente precisos que permite empurrar a base do sistema de rotação, fazendo com que esta se incline devido à existência de uma pequena esfera que suporta toda essa estrutura, permitindo desse modo mover toda essa base superior em x e em y, figura 4.2. Esta abordagem permite reduzir consideravelmente o custo deste sistema, já que aquisição de mecanismos capazes de se moverem em vários eixos com estas grandezas seriam bastante dispendiosos e estariam limitados em termos de tamanho.

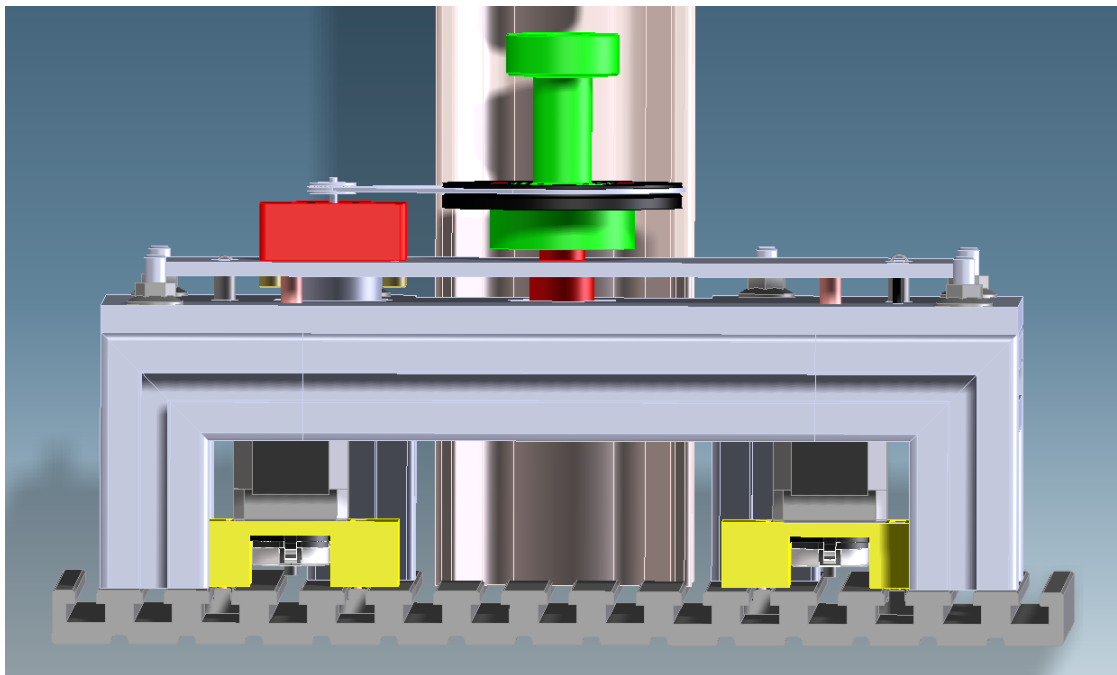


Figura 4.2: Mecanismo de inclinação e deslocamento.

No protótipo, não está presente a ferramenta que irá torner a lente quando esta estiver alinhada, visto ser um ponto que não foi debatido no âmbito da dissertação. Contudo pelas pesquisas efetuadas no mercado facilmente pode ser colocado um equipamento do lado direito da imagem para torner a lente.

As imagens 4.3, mostram todo o protótipo elaborado com esta dissertação, o que permite poupar bastante mais espaço em comparação com o equipamento presente atualmente na empresa, aumentar a precisão, torná-lo autónomo e bastante menos dispendioso em comparação com os equipamentos presentes no mercado.

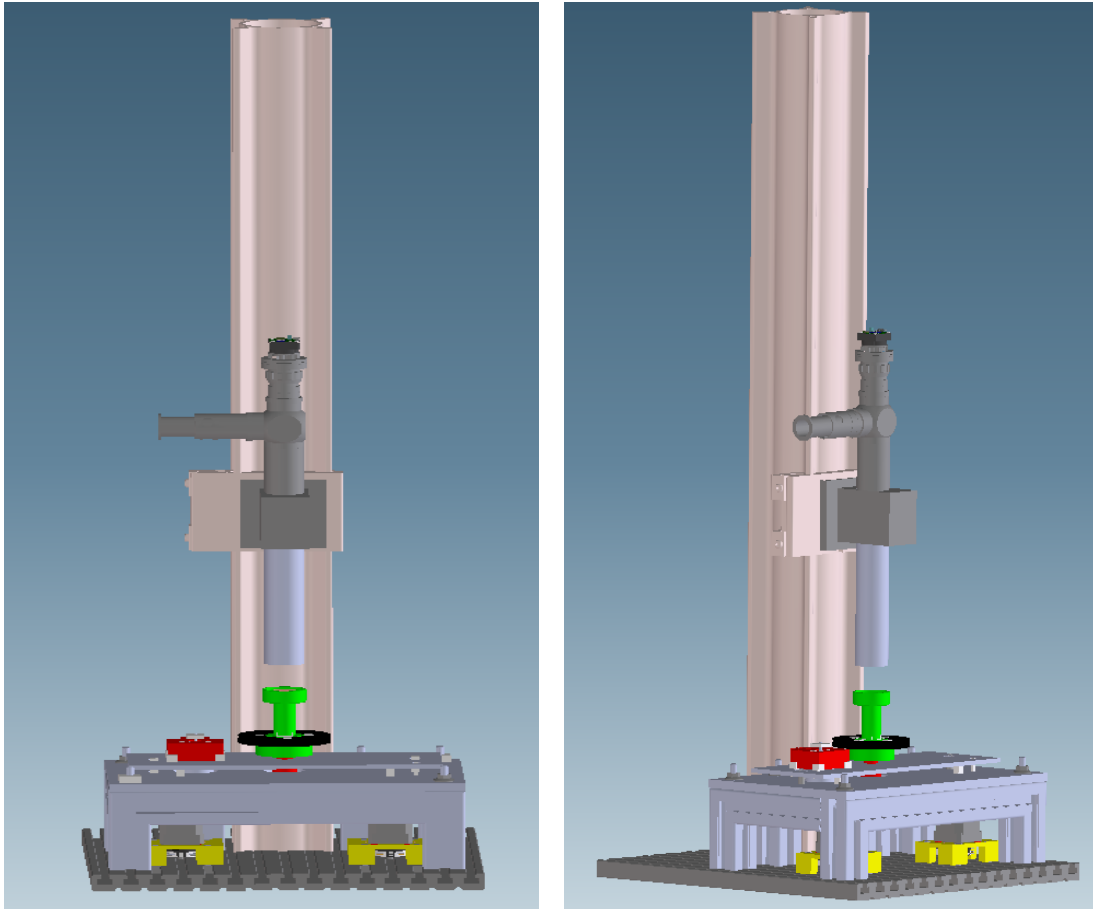


Figura 4.3: Protótipo projetado.

4.2 Processamento de Imagem

O processamento de imagem parte da identificação em cada superfície do comportamento de uma cruz sob uma superfície ótica que permite retirar informações sob o seu alinhamento. Esse feixe de luz é enviado por uma lâmpada de 60 watts de cor amarela que incide num retículo com a forma de uma cruz antes de percorrer o autocolimador e chegar à superfície ótica. Para retirar dados sobre o alinhamento de cada superfície ótica e por consequência da lente que se encontra a girar segundo um eixo mecânico perfeitamente alinhado com o feixe de luz emitido, o processamento de imagem foca-se na identificação da cruz ao longo do tempo, já que esta tende a mover-se consoante o desalinhamento existente entre a superfície onde a luz incide e o feixe de luz. O que significa que o desalinhamento é tanto maior quanto maior for a oscilação da cruz, sendo

que o alinhamento ocorre quando o feixe de luz coincide com o centro ótico da superfície ótica, o que representa em termos visuais uma cruz sempre na mesma posição ao longo do tempo.

A implementação do projecto descrito nesta fase da dissertação, tem como base o processamento de imagem. Implicou a colocação na máquina actualmente existente uma câmara digital, da A1280-54um (CS-Mount) - Basler dart, de forma a poder efetuar a aquisição de imagem, servindo assim como base para o algoritmo descrito em diante. As imagens contêm a forma geométrica de uma cruz, tal como é possível verificar através da imagem (a) 4.4. Cruz essa formada pela incidência de uma luz sob um retículo, com essa mesma forma geométrica, sendo o único indicador possível de ser usado para estudo ao longo do processo.

Assim sendo, é elaborado um *script* em Python que recorre à biblioteca OpenCV, que permite a identificação do objecto na imagem, utilizando técnicas de binarização e de reajuste do tamanho da imagem extraída. A esta é efetuada a binarização, ajustado a intensidade e colocado um filtro para realçar o contorno da cruz, imagem (b) 4.4.

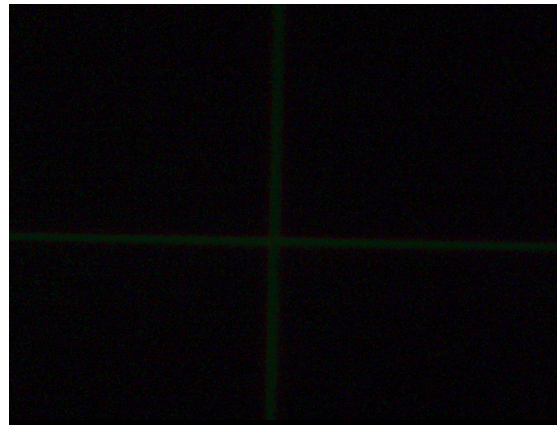
```

1
2 def process_image(msg):
3     try:
4         bridge = CvBridge()
5         orig = bridge.imgmsg_to_cv2(msg, "bgr8")
6         # drawImg = orig
7
8         # resize image (half-size) for easier processing
9         resized = cv2.resize(orig, None, fx=0.5, fy=0.5)
10        drawImg = resized
11
12        # convert to single-channel image
13        gray = cv2.cvtColor(resized, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
14        drawImg = cv2.cvtColor(gray, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
15
16        # threshold grayscale to binary (black & white) image
17        threshVal = 5
18        ret, thresh = cv2.threshold(gray, threshVal, 255, cv2.THRESH_
19        THRESH_BINARY+cv2.THRESH_OTSU)
20        binary_image = cv2.cvtColor(thresh, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
21
22        # Median Blurring filtering
23        blur = cv2.medianBlur(binary_image, 5)
24        ret3, th3 = cv2.threshold(blur, threshVal, 255, cv2.THRESH_BINARY+

```

```
)  
24     drawImg = th3  
25  
26     #ROI  
27     ROI = drawImg[320:430 , 300:415]  
28     # print drawImg.shape  
29     cv2.imwrite("ROI.png",ROI)  
30     showImage(ROI)
```

Listing 4.1: Algoritmo de extração da região de interesse.



(a)



(b)

Figura 4.4: (a) Imagem original. (b) Imagem após binarização.

A fase que agora é detalhada, consiste em relacionar e identificar a imagem processada com as várias imagens a estudar e extrair todos os dados relevantes destas. Para permitir a futura inclusão deste protótipo numa futura máquina, os dois *scripts* que nesta fase são abordados foram desenvolvidos em *Python* segundo o Robot Operating System (ROS). Isto para que possibilite aproximar ainda mais estas técnicas ao ambiente industrial.

Inicialmente, é criado um nó que lê todas as imagens que se deseja trabalhar. Com recurso à biblioteca *OpenCV* em *Python* é extraído os dados das imagens para que a imagem enviada para o subscritor contenha os dados relativos ao tamanho da imagem, como é o caso do acesso aos pixels de cada uma delas.

Esse subscritor, tal como o nome indica irá receber essas imagens publicadas, figura 4.5.



Figura 4.5: RQT-Graph dos nodes desenvolvidos.

E nessa fase, o segundo script relaciona os dados das imagens publicadas com a imagem trabalhada. Assim sendo, um passo muito importante para todo o trabalho efectuado futuramente, está relacionado com a extração do que é realmente importante ao comparar as imagens. Como tal, como recurso às ferramentas disponíveis na biblioteca *OpenCV* é feito o *matching* entre as imagens, traduzindo-se no desenhar de um rectângulo na zona de cada imagem em análise, onde é encontrado o *matching*. Permitindo a partir desta técnica conhecer o centro desse *matching*, com ajuda da técnica do rectângulo, como pode ser visto na figura 4.6. A obtenção do ponto central da cruz é extremamente importante para conhecermos o posicionamento da mesma num dado referencial, bem como na correlação entra as várias imagens.

```

1
2  def process_image(self, msg):
3
4      bridge = CvBridge()
5
6      orig = bridge.imgmsg_to_cv2(msg, "bgr8")
7      img1 = cv2.imread('/home/rui/catkin_ws/src/lens/ROI.png', cv2.IMREAD_
8      IMREAD_GRAYSCALE)
9
10     # convert image to grayscale image
11     w, h = img1.shape[::-1]
  
```

```

11     gray_orig = cv2.cvtColor(orig, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
12     count = count + 1
13     count_array = count_array + 1
14
15     # Apply template Matching
16     res = cv2.matchTemplate(gray_orig, img1, cv2.TM_CCOEFF_NORMED)
17     min_val, max_val, min_loc, max_loc = cv2.minMaxLoc(res)
18
19     #Draw rectangle around matching
20     top_left = max_loc
21     bottom_right = (w + top_left[0], h + top_left[1])
22     cv2.rectangle(orig, top_left, bottom_right, 255, 2)
23
24     #draw line between to points that define rectangle
25     cv2.line(orig, top_left, bottom_right, (255, 0, 0), 3)
26
27     #centroid of rectangle
28     centroid = ((top_left[0]+bottom_right[0])/2, (top_left[1]+↵
bottom_right[1])/2)
29     cv2.circle(orig, centroid, 7, (255, 255, 255), -1)
30
31     # Coordinates (x,y) of each centroid image
32     centroid_buffer_x = arr.array('i', centroid)
33
34     #convert Pixels to Micrometers
35     centroid_X = centroid_buffer_x[1] * 3.75
36     centroid_Y = centroid_buffer_x[0] * 3.75

```

Listing 4.2: Algoritmo de extração da região de interesse.

O excerto do segundo script anterior explicita a forma como foi identificado em cada imagem o centro da cruz. Este script relaciona a imagem que resultou do processo desenvolvido no primeiro script com as imagens subscritas de um alinhamento. Com recurso à biblioteca OpenCV cada imagem recebida é feita uma binarização e comparada com a imagem tipo, a essa região identificada é desenhado um retângulo. As dimensões do retângulo resultante do matching entre imagens permite calcular o centroide do retângulo. Esse centroide corresponde a uma coordenada situada na zona central da cruz permitindo assim verificar a evolução espacial desta ao longo do alinhamento.

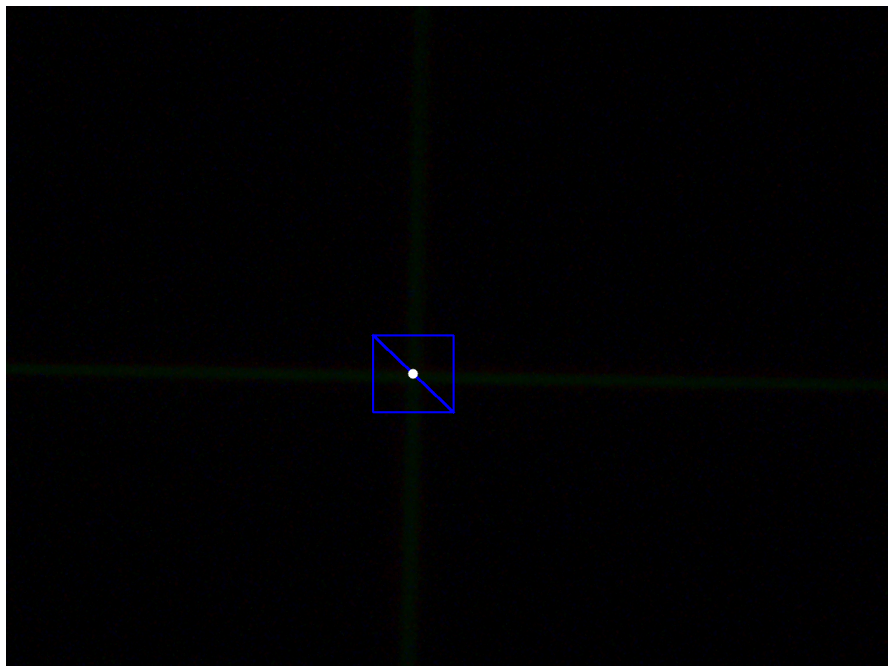


Figura 4.6: Imagem que representa o centro da cruz num dado momento.

Dessa forma como as coordenadas estão em pixels, recorre-se ao estudo da divisão por pixels que a câmera digital utiliza para dividir o seu campo de visão de modo a obter as coordenadas em micrómetros (μm). Essa conversão é efetuada através das seguintes equações 4.1 e 4.2.

$$X[\mu m] = Xcoordinate[pixel] * 3.75[\mu m] \quad (4.1)$$

$$Y[\mu m] = Ycoordinate[pixel] * 3.75[\mu m] \quad (4.2)$$

Normalmente, este tipo de alinhamento da lente, requer algum tempo de ajuste, sobretudo quando esse ajuste é feito por tentativa erro como é feito até aos dias de hoje na máquina existente. O que leva a que exista um número enorme de imagens que são tiradas durante esse alinhamento. O fato de utilizarmos uma câmera que consegue adquirir 54 fotos por segundo, tem vantagens mas também acarreta desvantagens. As vantagens é que permite ter um conjunto muito mais vasto da evolução dos pontos, o que permite melhor eficiência no processo, enquanto que as desvantagens residem sobretudo no grande número de dados que implica processar.

Para tal, foi idealizado uma técnica de minimização do número de pontos a processar de cada vez, com a finalidade de reduzir o número de pontos a serem utilizados para fins computacionais. Reduzindo-se 26% do número total, o que permite perceber a evolução temporal de um conjunto de pontos e reduzir consideravelmente o tempo de processamento. Para efetuar essa redução recorreu-se às equações 4.3 e 4.4, onde através de quatro pontos consecutivos, representado por p as coordenadas X e q as coordenadas em Y , é possível encontrar novas coordenadas.

$$X = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4 \quad (4.3)$$

$$Y = (q_1 + q_2 + q_3 + q_4)/4 \quad (4.4)$$

Perante os vários testes efectuados com e sem esta técnica, verificou-se que com esta, para além de permitir uma redução bastante significativa do tempo de processamento e permite uma melhor interpretação da evolução dos pontos ao longo do tempo.

A forma descrita por todos os pontos registados em diferentes experiências apresentam a forma geométrica de uma elipse. Desse modo, é possível concluir que ao rodar uma lente desalinhada sob si, a trajetória por ela descrita é de uma elipse como pode ser comprovado através da imagem 4.7.

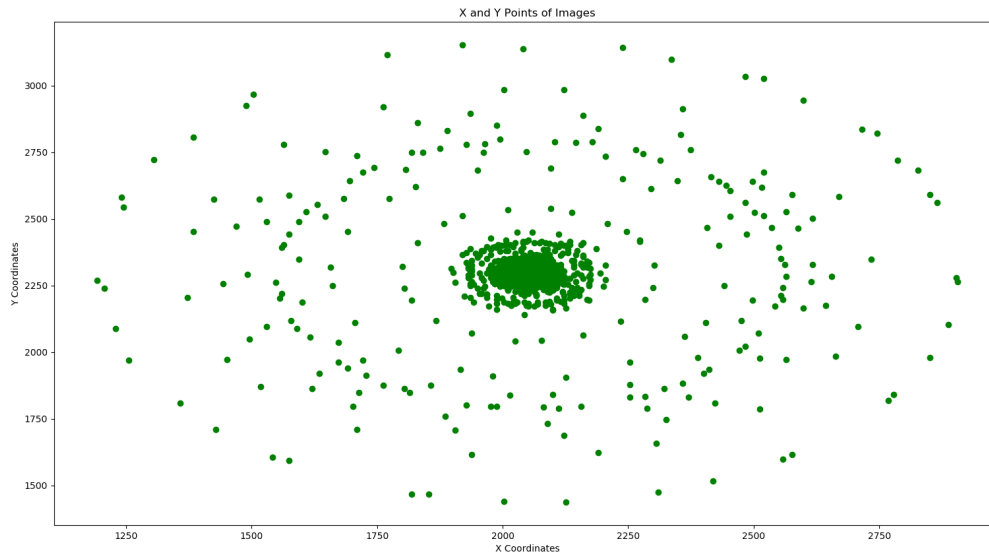


Figura 4.7: Dados recolhidos sem processamento.

Como como ser visto figura 4.7, uma lente desalinhada tem o aspeto de uma elipse e tende para um círculo ou ponto à medida que as suas superfícies óticas vão sendo alinhadas. Segundo os conceitos básicos de elipses, a figura 4.8 representa a nomenclatura utilizada para descrever os seus eixos e as equações 4.5 e 4.6, definem se uma elipse é do tipo horizontal ou vertical.

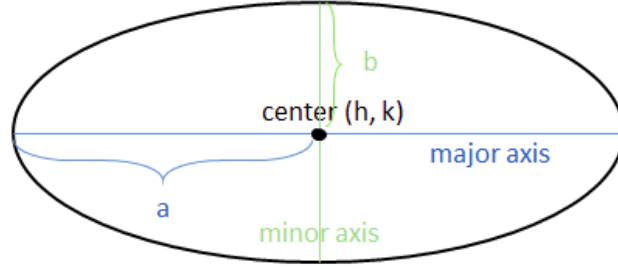


Figura 4.8: Eixos de uma Elipse.

$$\frac{x_2}{a_2} + \frac{y_2}{b_2} = 1 \quad (4.5)$$

$$\frac{x_2}{b_2} + \frac{y_2}{a_2} = 1 \quad (4.6)$$

Com esse conceito em mente, são formadas elipses através de quatro pontos de forma a melhor identificar a tendência ocorrida ao longo do tempo. Para encontrar o centro de cada de cada elipse é identificado num universo de quatro pontos as coordenadas máximas e mínimas em X e Y, e assim é calculado a média para cada coordenada. O processo é sempre retido ao longo de todo o log. Ao utilizar quatro pontos e conhecer as coordenadas máximas e mínimas permite-nos conhecer para cada elipse formado por esses pontos os valores de a e b . Como pode ser comprovado na imagem 4.8 esta trata-se de uma elipse horizontal, o que equivale dizer que o a é superior ao b . Mas utilizando a mesma equação 4.5, e aumentarmos o b fase ao a , esta descreve uma elipse vertical. Estas equações 4.7 e 4.8 permitem saber qual o tipo de eixo teve maior impacto durante o processo de alinhamento.

$$a = (x_{max} - x_{min})/2 \quad (4.7)$$

$$b = (y_{max} - y_{min})/2 \quad (4.8)$$

A partir deste ponto já é possível calcular as equações que definem uma elipse, para isso utiliza-se as equações 4.9 e 4.10:

$$ellipse_X = Centroid_X + a * \cos t \quad (4.9)$$

$$ellipse_Y = Centroid_Y + b * \sin t \quad (4.10)$$

Onde $Centroid_X$ e $Centroid_Y$ representam o centro da elipse calculado com base nos quatro pontos que a define.

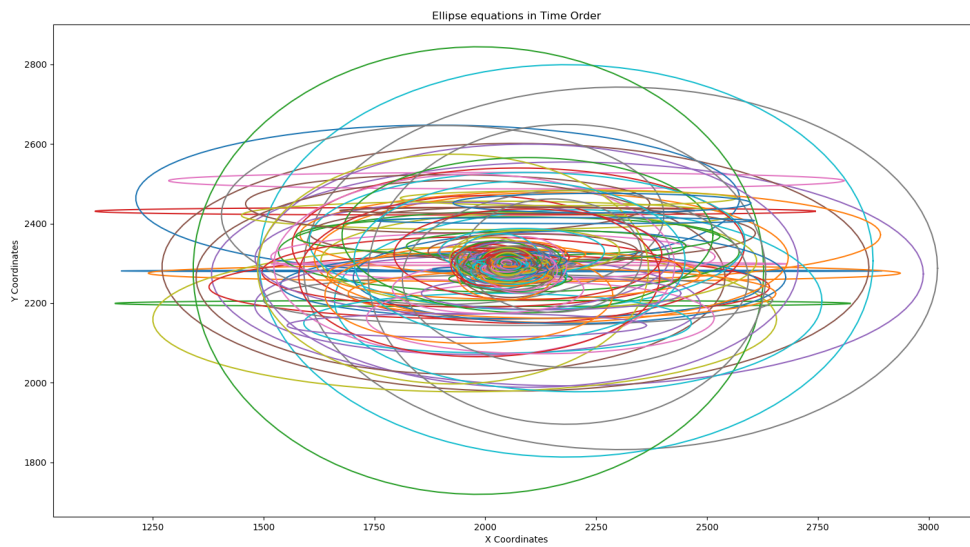


Figura 4.9: Elipses criadas a partir de quatro pontos.

Os resultados aqui alcançada provocaram grande surpresa junto da empresa, pois segundo esta, a trajectória prevista de uma lente antes de tornear deveria ser um círculo e não uma elipse como estava a ser comprovado com esta dissertação.

Dessa forma, tornou-se necessário encontrar a causa por de trás deste fenómeno. Numa primeira fase, foi averiguado criteriosamente se todo o processo de aquisição das imagens foi correctamente adquirido. Nomeadamente, os testes de aquisição de imagens com a câmara em diferentes posições, persistindo o mesmo fenómeno. Salvaguardada a qualidade da aquisição das imagens, tornou-se fundamental estudar a construção da lente.

A lente é constituída pela parte óptica e pela parte mecânica. Para fixar a superfície óptica à superfície mecânica é necessário aplicar cola UV para esse efeito. Cola essa

que é colocada por uma máquina destinada unicamente a esse fim. Esta é aplicada em todo o redor da lente, contudo como foi comprovado, a distribuição dessa cola não é feita uniformemente em todo o redor da lente. O que acaba por criar ovalizações quando colocadas a rodar em torno de um eixo. Para chegar a essa conclusão foi efectuado um conjunto de testes, com diferentes lentes e foi possível comprovar este acontecimento. Um caso mais fácil de se verificar, é numa lente em que é constituída por duas superfícies ópticas. A sua superfície mecânica, neste caso, é apenas constituída pela cola, que fixa as duas superfícies ópticas. O que significa dizer que não existe colocação de qualquer superfície de metal ou de plástico, em redor destas superfícies. Daí o eixo mecânico formado é dado exclusivamente pela cola e o eixo óptico apenas pelas superfícies que constituem a lente. Ao analisar cuidadosamente a cola ao longo da superfície exterior da lente é possível verificar que existe zonas em que a colocação é mais acentuada do que em outras, o que equivale dizer que a superfície mecânica formada pela cola, não é uma círculo perfeito. Colocando esta lente na máquina que esta dissertação pretende melhorar, e encontrando o alinhamento como é feito até então, e torneada a cola. Por fim, ao analisar a lente, colocando-a em rotação em torno de si, é possível verificar que a trajetória descrita é agora circular. Isto é, a lente só apresenta uma trajetória circular depois de ser torneada, até então apresenta uma trajetória elíptica.

O fato de tal fenómeno ter sido uma novidade deve-se sobretudo ao processo existente na empresa ter uma baixa resolução.

Voltando à explicação do script desenvolvido, mais concretamente à razão da abordagem de criar elipses a partir de quatro pontos, deveu-se à necessidade de tentar perceber desde logo com poucos pontos, como estes vão evoluído ao longo do processo. Assim ao aplicarmos a equação de "fit" a uma elipse, torna-se possível ter dados importantes para o alinhamento de uma lente, nomeadamente o tipo de elipse que tendencialmente possuímos no caso em análise. Permitindo entender qual o maior eixo da elipse que necessidade tem em ser intervencionado. Ao analisar os dois eixos, figura 4.8, também é possível verificar qual é o ponto ou os pontos onde a lente se encontra alinhada. Permitindo assim retirar todas as informações relevantes com vista ao alinhamento da lente a partir da análise entre as várias elipses criadas.

Como referido anteriormente, a criação de elipses permite a partir do centro de cada uma delas calcular a evolução desses centros, isto é, relacionando os centros de elipses adjacentes é possível perceber o afastamento e a sua posição angular ao longo do tempo. Tal como na figura 4.10, inicialmente com a lente desalinhada a distância entre centros é enorme e ao longo do processo essa distância vai aproximando-se de zero. Perante esse raciocínio e com o conhecimento espacial de cada centro no referencial, figura 4.11, é possível saber a posição ou as posições que garanta o alinhamento da lente.

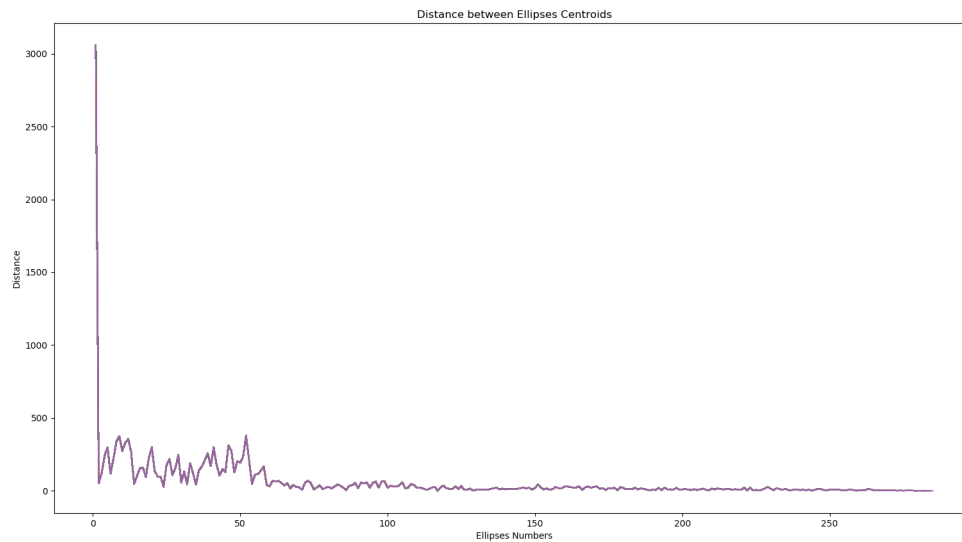


Figura 4.10: Distância entre Centros das Elipses.

Pela figura 4.11, as coordenadas de cada centro tendem a ser mais concentradas numa dada região, designada zona de menos excentricidade. Comparando com a figura 4.7, as coordenadas que alcançamos têm menor excentricidade na zona com maior densidade de pontos, o que significa dizer que o processo levado a cabo para encontrar os pontos de estabilização bem como as informações que permitem saber a posição para centrar uma lente foi alcançado com sucesso.

Para ser possível realizar a última fase desta dissertação, todos os dados importantes para o processo de alinhamento são guardados num ficheiro de texto.

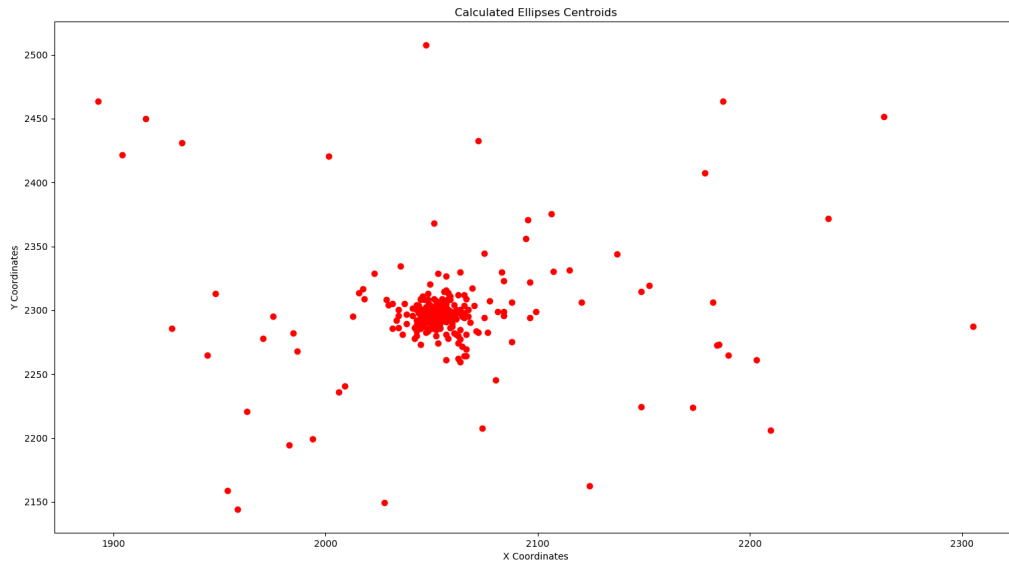


Figura 4.11: Centros das Elipses.

4.3 Modelo de Previsão

A realização desta dissertação tem como objectivo fornecer *outputs* extremamente úteis para o operador e tornar a máquina mais eficiente. Nesta fase são detalhados dois modelos de previsão tendo como base, a informação obtida nas fases anteriores.

Os modelos de previsão partem de um conjunto reduzido de pontos estimar estados futuros, permitindo assim encontrar o ponto ou a zona de estabilidade que se pretende. Para além disso, estes modelos são o passo fundamental para tornar o processo de alinhamento da lente autónomo. A sua robustez e eficiência permitirá servir de *input* a ferramentas de manipulação da lente de acordo com os dados debitados pelos modelos. Assim foram utilizados dois modelos distintos de previsão de novos estado, tal como é detalhado no capítulo de Estado de Arte as técnicas de previsão.

4.3.1 Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

Para fazer previsões das posições que levam ao alinhamento da lente recorreu-se aos dados anteriormente obtidos, que apresentam informações que poderão ser utilizadas pelo operador no alinhamento de lentes. Assim sendo, como o objectivo é conhecer as coordenadas geométricas de cada ponto com recurso ao modelo de previsão ARIMA, foram apenas utilizadas as coordenadas X e Y dos centros das elipses. Para realizar a previsão com o ARIMA, foi utilizado uma **class** em **python** *statsmodels.tsa.arima_model.ARIMA*, que permite utilizar várias funções indispensáveis para a previsão. Nomeadamente, no ajuste do modelo, através das variáveis p, d, q , fit aos dados e à previsão, onde p é o número de desfasagem do modelo auto-regressivo, d é o grau de diferenciação isto é o número de vezes que os dados tiveram valores passados subtraídos e q é a ordem do modelo de média móvel.

```

1
2 # fit model and convert 2D array and 1D
3 model = ARIMA(series.values.reshape(-1).tolist(), order=(5,1,0))
4 model_fit = model.fit(dispatch=0)

```

Listing 4.3: Valores de ajuste do fit de dados à previsão.

O excerto de código seguinte, mostra a forma como foi utilizada a previsão com este modelo, recorrendo a apenas 5 % do conjunto dos dados para efetuar a previsão, ao longo do log.

```

1
2 #Convert 2D array in 1D
3 X = series.values.reshape(-1).tolist()
4 #Train size
5 size = int(len(X) * 0.05)
6 #Define Train Size and Test size
7 train, test = X[0:size], X[size:len(X)]
8 #Cicle of all position on train
9 history = [x for x in train]
10 #define predixtions list
11 predictions = list()
12 #Cicle for all Test positions
13 for t in range(len(test)):
14     #Arima model for Train data
15     #order(p,q,d) = (Auto Regressive, Moving Average, differencing)
16     model = ARIMA(history, order = (5,1,0))
17     #Fit model

```

```
18     model_fit = model.fit(dispatch = 0)
19     #Forecast by model
20     output = model_fit.forecast()
21     #Predict in first column of forecast model
22     yhat = output[0]
23     predictions.append(yhat)
24     #Expect values
25     obs = test[t]
26     history.append(obs)
27     print('predicted=%f, expected=%f' % (yhat, obs))
```

Listing 4.4: Excerto de código de previsão a partir de um conjunto de dados.

A figura 4.12(a), representa a comparação em termos gráficos das coordenadas em X esperadas com as previstas ao longo do número de observações feitas. A azul representa as coordenadas em X esperadas e a laranja as previstas. A imagem 4.12(b), apresenta a relação existente entre as coordenadas em Y esperadas e previstas, com a cor azul e laranja, respectivamente. Analisando estes dois gráficos 4.12, a resposta dada pela série temporal tende acompanhar a tendência dos valores esperados, contudo verifica-se que com alterações mais significativas das variâncias o *gap* tende a aumentar entre os valores esperados e previstos. Principalmente nas fases iniciais quando a oscilação de valores é bastante brusca, o erro é maior. O erro tende a diminuir ao longo das observações, o que é o mesmo que dizer que os valores previstos aproximam-se dos valores esperados. O erro entre os valores previstos e os esperados, ao longo da simulação é de 42.303 μm . O que é manifestamente um valor bastante interessante, já que a grande percentagem diz respeito à fase inicial onde a discrepância de valores previstos para os esperados é superior.

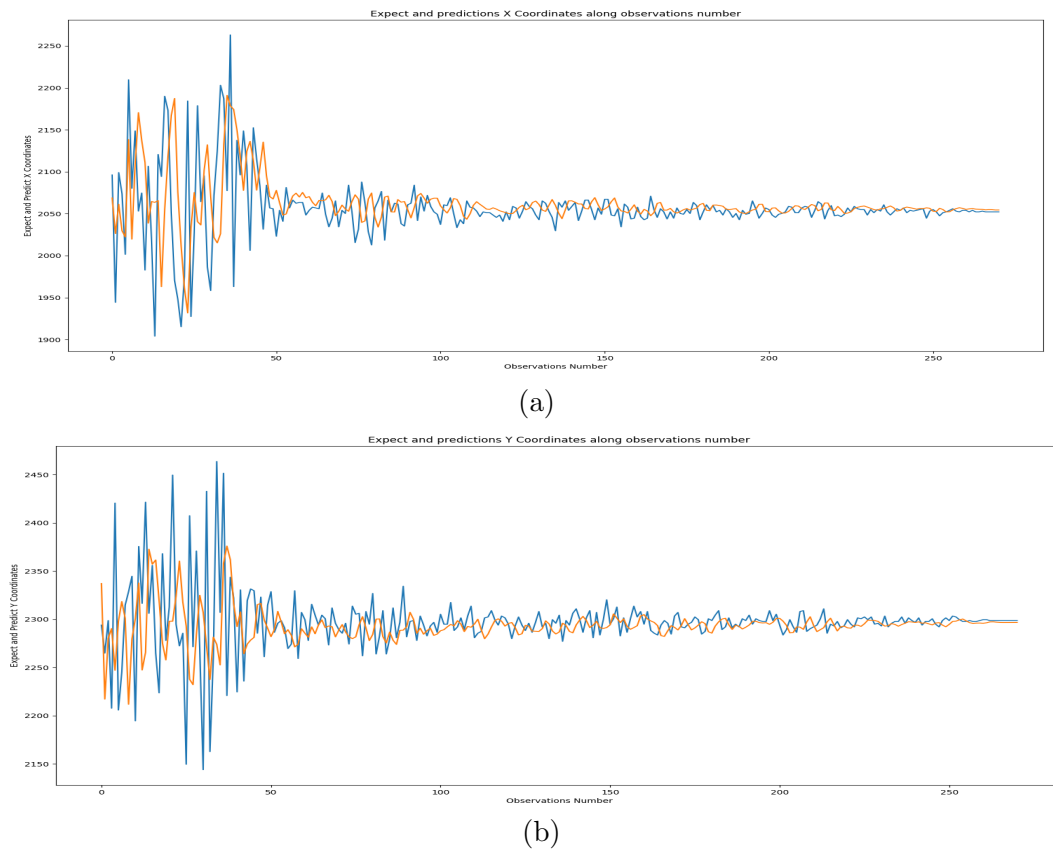


Figura 4.12: Relação das coordenadas Esperadas (cor azul) com as Previstas (cor laranja) ao longo do número de observações. a) Relação entre coordenadas em X esperadas e previstas. b) Relação entre coordenadas em Y esperadas e previstas.

Na figura 4.13, é mostrada a evolução dos centros esperados, testados e previstos ao longo das observações efectuadas. Verificando que a tendência da previsão acompanha claramente, tanto dos valores testados como previstos. Apenas não é previsto 5% das coordenadas totais.

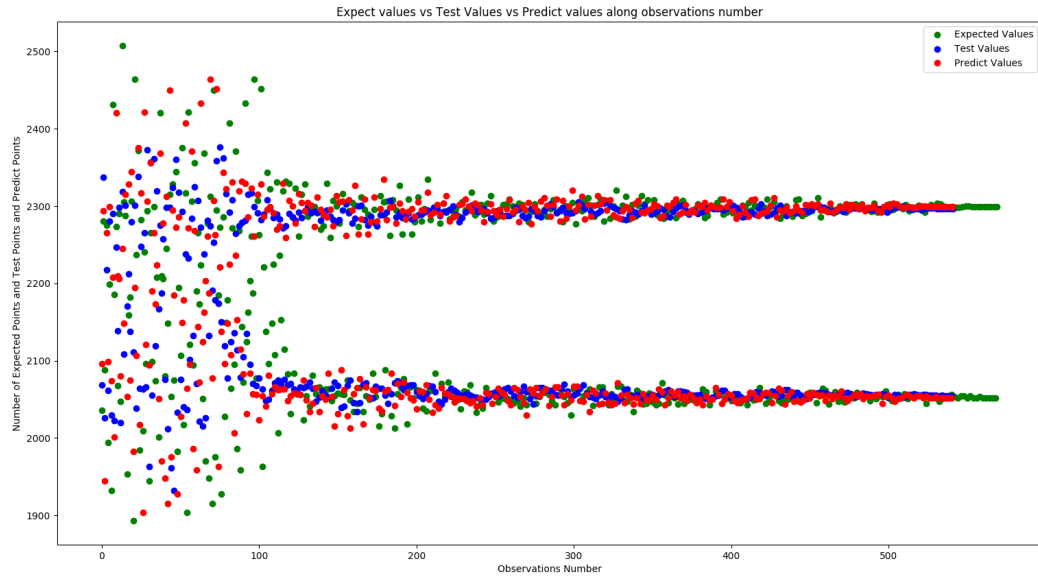


Figura 4.13: Valores esperados vs valores previstos ao longo do número de observações.

A figura 4.14 efetua a comparação entre os centros previstos fase aos esperado. Sendo os esperados azul e a vermelho os previstos, é possível verificar a tendência e a proximidade que estes valores descrevem. Para tal, é calculado a eficiência entre os valores previstos e os esperados e o resultado é de 88.7%. Na tabela 4.1, é representado as últimas dez coordenadas esperadas e as respectivas previsões.

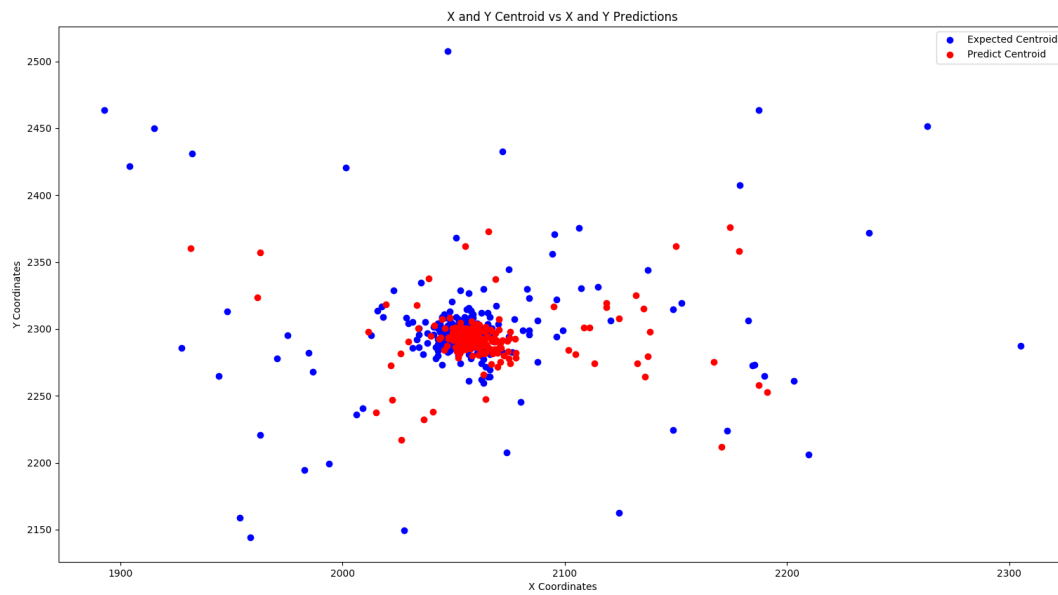


Figura 4.14: Coordenadas dos Centros esperados vs os Previstos.

X Esperado	Y Esperado	X Previsto	Y Previsto
2055.9375	2292.1875	2055.77673641442	2296.412711545896
2044.6875	2298.75	2056.1500578700184	2297.34105464462
2053.125	2301.5625	2055.503658183137	2297.4532080145777
2055.0	2298.75	2055.387956987221	2297.0405799813902
2052.1875	2303.4375	2055.229951076988	2296.7650817683107
2047.5	2302.5	2054.6585840059224	2296.706999068909
2051.25	2299.6875	2054.9402302593912	2296.722128050528
2052.1875	2297.8125	2054.8503408279144	2296.7430665891998
2054.0625	2297.8125	2054.4877494317443	2296.7503302512337
2055.9375	2298.75	2054.4794676119554	2296.7575264767215

Tabela 4.1: Coordenadas Esperadas e Previstas segundo o Modelo de Previsão ARIMA.

4.3.2 K-nearest Neighbors Algorithm (KNN)

O modelo de Previsão detalhado nesta fase baseia-se em fazer a suas precisões através da relação das coordenadas consecutivas, ou como o nome indica correlacionando os vizinhos. Assim sendo, para relacionar os vizinhos foi calculado a distância entre pontos através de uma expressão que deriva do famoso Teorema de Pitágoras, a distância Euclidiana:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^i (q_i - p_i)^2}$$

Com esta expressão é calculada a distância coordenada a coordenada, tanto em X como em Y, o que permite entender a evolução de ambas as coordenadas ao longo do número de vizinhos existentes. Para proceder à utilização do KNN para prever as coordenadas, recorreu-se à biblioteca scikit-learn.

Tal como no modelo anterior, os únicos dados utilizados para fazer a previsão foram as coordenadas em X e Y dos centros das elipses, de maneira a possuírmos uma base de comparação entre modelos, foi utilizado para treinar o modulo apenas 66% do volume total. Posto isto, através da biblioteca sklearn.neighbors foi importado o KNeighborsRegressor onde permite definir o parâmetro k que varia consoante a eficiência que cada valor origina ao modelo. Foram desenvolvidos inúmeros testes, e o valor com melhores resultados foi o k=2.

Assim sendo, as imagem 4.15 mostram os resultados da previsão fase aos esperados. A imagem 4.15 (a), descreve a evolução prevista das coordenadas em X em relação ao esperado, a laranja e azul, respectivamente. É possível verificar pela análise dos gráficos presentes as imagens 4.15, que as previsões de X e Y são ligeiramente menos suscetíveis a grandes variações. Ao analisarmos os gráficos verificamos que para oscilações repentinas a previsão responde bastante bem mas é nessas transições mais agressivas onde o gap existente entre valores esperados e previstos é maior. Por outro lado, a partir do meio dos gráficos para a frente verifica-se que as oscilações não são tão bruscas e dessa forma os valores previstos são praticamente iguais aos esperados.

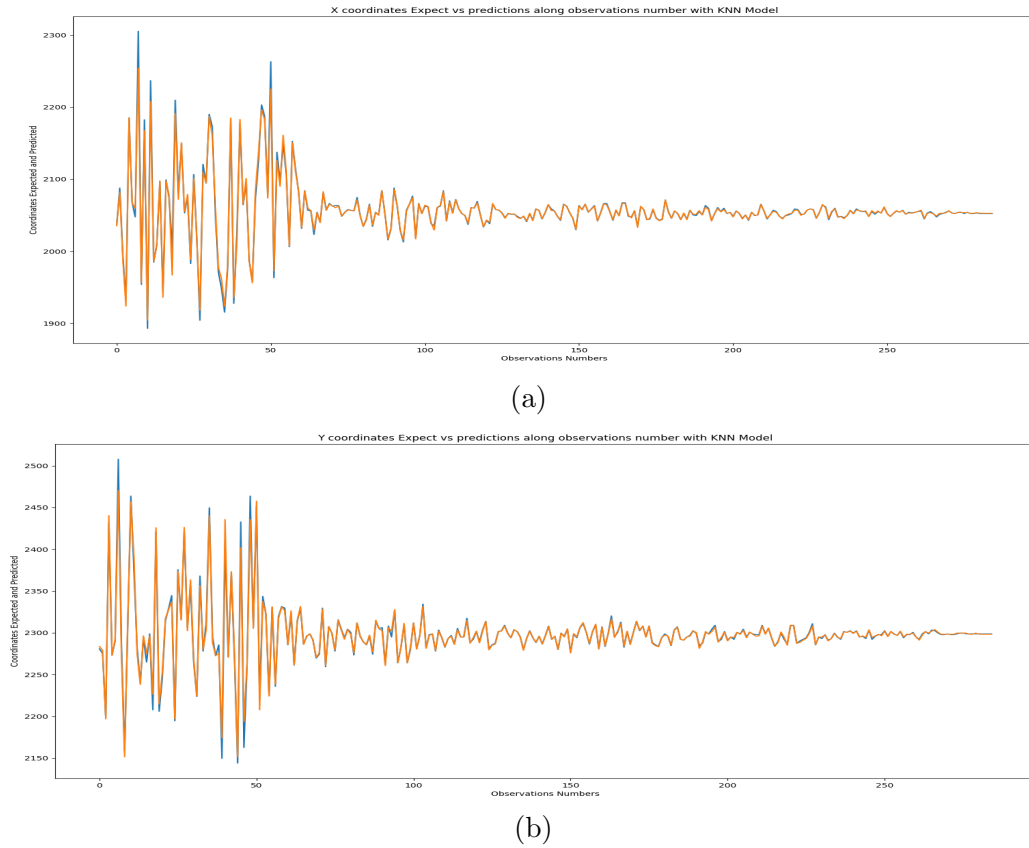


Figura 4.15: Relação das coordenadas Esperadas (cor azul) com as Previstas (cor laranja) ao longo do número de observações. a) Relação entre coordenadas em X esperadas e previstas. b) Relação entre coordenadas em Y esperadas e previstas.

A taxa de erro verificada com o KNN é de $0.68 \mu m$, entre as coordenadas previstas e esperadas. Traduzindo-se numa precisão de 94.5%. Para além disso, outro fato bastante relevante é o tempo de previsão que ronda os 0.0078 s. A figura 4.16, opõe às coordenadas esperadas as previstas, azul e vermelho respectivamente. Verificando-se uma tendência de concentração dos números previstos para a região de maior equilíbrio. O que permite confiar na previsão levada a cabo, justificada também com a relação entre os dez últimos valores esperados e previstos, presentes na tabela 4.2.

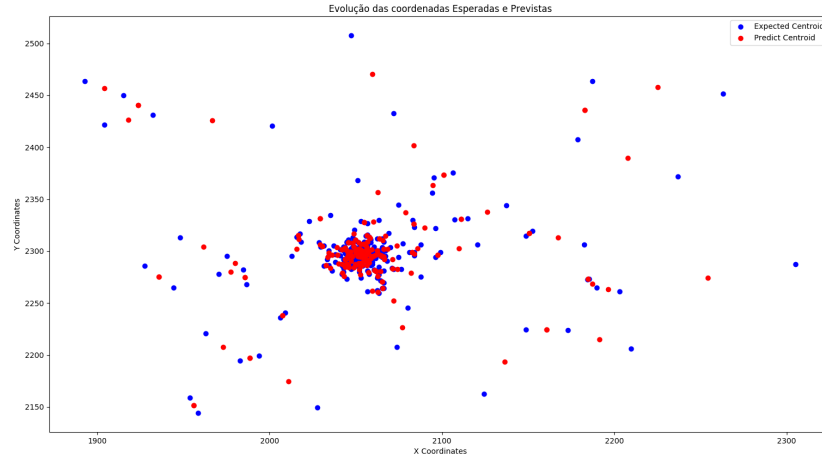


Figura 4.16: Coordenadas dos Centros Esperados e Previstos, com um erro máximo em X e Y de de $0.46875 \mu m$

X Esperado	Y Esperado	X Previsto	Y Previsto
2052.1875	2299.6875	2053.59375	2299.6875
2054.0625	2298.75	2053.59375	2299.6875
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2053.125	2298.75	2053.59375	2299.6875
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125
2052.1875	2298.75	2052.65625	2298.28125

Tabela 4.2: Coordenadas Esperadas e Previstas segundo o Modelo de Previsão KNN.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido implicou um esforço bastante grande em muitas vertentes. Inicialmente, a projecção de um protótipo de alinhamento com todas as especificações pretendidas para tornar a máquina autónoma. Bem como, todo o estudo e conhecimento necessário em termos de óptica e mecânica da lente, como do próprio processo de alinhamento, o que implicou atrasos. A construção do protótipo foi abandonado devido ao elevado preço de concretização. Sendo importante de salientar, que com esta dissertação foi projectado um protótipo de um mecanismo de alinhamento que poderá ser implementado no futuro.

O fato do trabalho aqui proposto ser para uma máquina presente numa linha de produção, condicionou bastante o trabalho, isto porque requeria articular com a pessoa responsável da máquina quais as alturas em que esta não estava a ser utilizada de forma a poder efectuar os inúmeros testes e adaptações realizadas. O que provocou atrasos, visto que uma linha de produção não podia ser interrompida pelos motivos anteriormente referidos.

O processamento de imagem numa área tão específica e de informação tantas vezes escassa e confusa tornou-se numa batalha bastante desafiante, uma vez que, implicou adaptações na actual máquina para colocar a câmara digital e dessa forma adquirir as imagens pretendidas, garantindo que não existia qualquer tipo de distorção provocada por estas alterações. Implicou também o estudo de todo o processo de alinhamento da lente, desde do percurso da luz através dos inúmeros mecanismos ópticos necessários para que a luz incida na lente e reflita, aos fenómenos ópticos inerentes a uma lente desalinhada. Perante todas essas necessidades de adquirir as imagens pretendidas, os resultados alcançados foram bastante promissores para futuras implementações num sistema automático de alinhamento de lentes, permitindo a partir dessas imagens elabo-

rar todo o processamento descrito no capítulo de implementação. Vindo-se a descobrir fenómenos desconhecidos para a empresa e permitindo uma melhor identificação de todo o processo de alinhamento. Ainda mais relevante foram os dados retirados por todo este processo. As coordenadas ao longo do tempo, a posição do alvo em termos angulares, a evolução de cada eixo da elipse formada, a excentricidade da elipse e a distância entre coordenadas. Informações que permitem entender a nível óptico e matemático todo o processo.

A última fase implementada nesta dissertação, visou o desenvolvimento de um sistema preditivo com base no modelo obtido. E assim conseguir a partir de um número reduzido de pontos prever a coordenada ou as coordenadas que garantam o alinhamento da lente. Como referido na capítulo da Implementação, foi utilizado dois modelos de previsão para esse efeito onde apresentamos os prós e contras de cada um deles. Desta forma, para interpretar os dados obtidos por cada um dos modelos é necessário ter em consideração alguns factores, tais como, a qualidade dos resultados obtidos, a velocidade de processamento e a adaptabilidade. Os dois modelos apresentam resultados bastante bons no que diz respeito à qualidade dos resultados obtidos, contudo, o modelo KNN apresenta valores bastante mais próximos dos esperados, cerca de 94,5% de precisão. Ao passo que o modelo de previsão ARIMA alcança apenas uma precisão de 88,7%. Já ao nível na velocidade de processamento de cada um dos modelos de previsão utilizados, o ARIMA demora 223.702766 segundos, cerca de 3.7 minutos a efectuar a previsão, ao invés, o KNN demora apenas 0.642045 segundos, aproximadamente 0.01 minutos. O último factor diferenciador é a adaptabilidade dos dados que cada modelo fornece, comparativamente, o modelo KNN apresenta uma menor quantidade de coordenadas o que se torna uma mais valia para efeitos futuros de utilização destes dados.

Para finalizar, os resultados obtidos nesta dissertação permite inúmeros trabalhos futuros, desde logo na concretização do protótipo projectado ou melhoramentos da máquina existente com o objectivo de incluir as ferramentas aqui desenvolvidas. Adaptar os *scripts* desenvolvidos para o processo de produção em série. Equipar a máquina com um retículo de referência para que seja possível ter uma referência física na comparação com os dados adquiridos, isto para que se consiga conhecer o ângulo de *tilt* ou o *shift* da lente. Utilizar os dados do modelo de previsão para servir de *input* a motores, como o objectivo de colocar a lente na posição adequada ao sua alinhamento.

Bibliografia

- [1] Trioptics. ATS 100 & 200.
- [2] Guru99 2020. Supervised vs Unsupervised Learning: Key Differences.
- [3] Dr. Michael J. Garbade. Understanding K-means Clustering in Machine Learning, 2018.
- [4] Paul R Yoder. Chapter 37: Mounting Optical Components. In *Opto-Mechanical Systems Design*. 1992.
- [5] Paul R Yoder and Frédéric Lamontagne. Optical mounts: Lenses, windows, small mirrors, and prisms. In *Handbook of Optomechanical Engineering, Second Edition*. 2017.
- [6] Osvaldo Pessoa Jr. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física* *vista Brasileira de Ensino de Física*, 1997.
- [7] Danial Malacara. *Optical Shop Testing: Third Edition*. 2006.
- [8] Michael Bass, Eric W. Van Stryland, David R Williams, and William L. Wolfe. Handbook Of Optics, Volume III -, 1995.
- [9] Ville Heikkinen, Ville Byman, Ilkka Palosuo, Björn Hemming, and Antti Lassila. Interferometric 2D small angle generator for autocollimator calibration. *Metrologia*, 2017.
- [10] MÖLLER-WEDEL OPTICAL. Examples for Applicationsof collimators, telescopes, visual and electronicautocollimators.
- [11] Trioptics. Highly Efficient Assembly of Lenses with OptiCentric and OptiCentric and Cementing, 2013.

- [12] Ching-Yuan Chang, Chien-Ching Ma, Kuo-Cheng Huang, and Shih-Feng Tseng. Rapid inspection method for measuring interior tilt and decenter in singlet lens. *Applied Optics*, 2013.
- [13] Edmund. How Aberrations Affect Machine Vision Lenses.
- [14] Statistical Analysis System (SAS). Machine Learning, 2019.
- [15] Yale University. Linear Regression, 1998.
- [16] Tony Yiu. Understanding Random Forest - Towards Data Science, 2019.
- [17] P´adraig Cunningham and Sarah Jane Delany. K -Nearest Neighbour Classifiers. *Multiple Classifier Systems*, 2007.
- [18] Onel Harrison. Machine Learning Basics with the K-Nearest Neighbors Algorithm, 2018.
- [19] Neelam Tyagi. Introduction to Time Series Analysis: Time-Series Forecasting Machine learning Methods & Models, 2020.
- [20] Sima Siami-Namini, Neda Tavakoli, and Akbar Siami Namin. A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series. In *Proceedings - 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2018*, 2019.
- [21] Selva Prabhakaran. Vector Autoregression (VAR) – Comprehensive Guide with Examples in Python, 2019.
- [22] J. Heinisch, E. Dumitrescu, and S. Krey. Novel technique for measurement of centration errors of complex completely mounted multi-element objective lenses. In *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VII*, 2006.
- [23] Jason Lane. A practical tutorial for generating ISO 10110 drawings. *Advanced Optical Technologies*, 2012.
- [24] Ke Li, Cuifang Kuang, and Xu Liu. Small angular displacement measurement based on an autocollimator and a common-path compensation principle. *Review of Scientific Instruments*, 2013.
- [25] L. I. Goldfisher. Comment on “Theoretical Interpretation of Moiré Patterns”. *Journal of the Optical Society of America*, 2008.

- [26] Psang Dain Lin and Chuang Yu Tsai. Skew ray tracing and sensitivity analysis of ellipsoidal optical boundary surfaces. *Applied Mathematical Modelling*, 2008.