

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

Percepção de um Sistema Opto-Mecânico para Tocha de Soldagem Linear

Matheus Frantz de Faria

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr

Rio Grande, 2018

Dados de catalogação na fonte:
Bibliotecário José Paulo dos Santos – CRB 10/2344
Biblioteca Central – FURG

F224p Frantz de Faria, Matheus

Percepção de um Sistema Opto-Mecânico para Tocha de Soldagem Linear / Matheus Frantz de Faria. – Rio Grande, 2018. – 85 f: gráf. – Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande. Centro de Ciências Computacionais. Rio Grande, 2018. – Orientador Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.

1. Soldagem automatizada. 2. Estimção de Distância. 3. Visão Computacional. I. Drews-Jr, Paulo Lilles Jorge. II. Título.

CDU: 004:621.791

Banca examinadora:

Prof. Dr. Armando Alves Neto DELT-UFMG

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior C3-FURG

Prof. Dr. Ricardo Nagel Rodrigues C3-FURG

Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada C3-FURG

Dedico este trabalho a todos que consideram a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico cruciais para o desenvolvimento social da humanidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio e pelos incentivos, desde minha infância, sempre instigando a minha curiosidade sobre o mundo.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e sempre pude contar com a ajuda deles.

Aos professores que passaram seus ensinamentos com dedicação e boa vontade.

À minha companheira Giovana pelo apoio e estímulo ao estudo e busca por conhecimento.

E ao Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Jr. pelo suporte, orientação e auxílio no desenvolvimento e execução deste projeto.

RESUMO

FRANTZ DE FARIA, Matheus. **Percepção de um Sistema Opto-Mecânico para Tocha de Soldagem Linear**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

O processo de soldagem gera uma grande exposição do soldador a materiais nocivos a saúde, como fumo, faíscas, radiação e altas temperaturas geradas pela fusão no poço de solda. Ao automatizar esse processo, a figura do soldador, que manuseia ativamente a tocha de soldagem e manualmente posiciona e realiza a trajetória da soldagem, acaba sendo substituída pelo operador de soldagem. O operador de soldagem apenas informa à plataforma de soldagem os parâmetros necessários para execução do processo, ficando livre da exposição de materiais tóxicos e da atuação direta no sistema.

Neste trabalho, o problema a ser tratado é como manter a distância da tocha em relação ao chanfro de soldagem de modo a obter um comprimento de arco de soldagem mais uniforme possível em uma situação de soldagem multi-passe. Essa distância pode variar devido à solda depositada em um passe anterior de solda, deformidades nas chapas de soldagem que possam acontecer, tanto no manuseio, como por dilatação ou um posicionamento não paralelo do sistema ao chanfro de soldagem feito pelo operador de solda. Ao corrigir essas variações, é esperada uma melhor qualidade de solda, com menor porosidade possível, além de evitar formação de trincas.

Visto que um sistema de detecção de distância por visão computacional para a aplicação de interesse exige robustez, os resultados obtidos utilizando um sistema de câmera monocular e um ponto laser obtiveram resultados satisfatórios para facilitar a conversão das primitivas do domínio da imagem em *pixels* para domínio real em escala métrica.

Palavras-chave: Soldagem automatizada, Estimção de Distância, Visão Computacional.

ABSTRACT

FRANTZ DE FARIA, Matheus. **Perception of an Opto-Mechanical Linear Welding Torch Control System**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

The welding process expose the welder to harmful material such as smoke, sparks, radiation and high temperatures generated by the welding pool. By automating the welding process, the welder in the process is changed by the welding operator. The welding operator does not operate the torch manually to make a correctly trajectory like the welder, but welding operator just adjusts the welding parameters to execute the process, without exposure of toxic materials.

In this work, the problem to be addressed is how to maintain the distance of the torch from the welding bevel to obtain a weld arc length more uniform possible in a multipass welding situation. This distance may vary due to the solder deposited in a previous soldering pass, deformities in the welding plates that may occur, both in handling, as well as by expansion or a non-parallel system's positioning to the welding bevel made by the welding operator. Correcting these variations, a better weld quality is expected, with lower possible porosity and avoid cracking.

Once distance detection system by a computer vision for the application of interest requires robustness, the results obtained using a monocular camera system and a laser dot have obtained satisfactory results to facilitate the conversion of the image domain primitives to *pixels* for real domain in metric scale.

Keywords: Automated Welding, Distance Estimation, Computer Vision.

LISTA DE FIGURAS

1	Estrutura da um robô de soldagem linear com sistema proposto no presente trabalho: visão lateral (à direita) e frontal (à esquerda). . . .	3
2	O sensoriamento será abordado neste trabalho. Os detalhes do sistema serão apresentados a seguir.	4
3	Tipos de chanfros: V (a), X (b), K (c), meio V (d), I (d), J (e), U (f) e U (g).	5
4	Geometria do chanfro vazio com as coordenadas em pixels da abertura superior (A1 e A4), abertura inferior (A2 e A3)	6
5	Geometria do chanfro sendo preenchido com valores atualizados da abertura inferior ($L2'$) e altura restante do chanfro vazio (E1 e E2). . .	7
6	Geometria do chanfro sendo preenchido com estimacão da área de chanfro vazio (verde e azul) através da atualizacão do valor da abertura inferior ($L2'$).	7
7	Estrutura da plataforma Bug-O MDS 1005 e seus respectivos módulos (visão lateral à esquerda e frontal à direita). A seta em azul indica a(s) direccão(ões) de movimento do <i>tractor</i> e <i>weaver</i>	12
8	Geometria do chanfro estimada pelo algoritmo detector de linhas. Baseado na informacão da altura H entre o superfície do chanfro e a câmara, além da detecccão das coordenadas A1, A2, A3 e A4, é possível calcular os valores de $L1/2$ e $L2/2$	12
9	Vista frontal da estrutura do sistema de movimentacão do eixo Z. A tocha, em laranja, a câmara, em cinza, e o ponto laser, em verde, são acoplados rigidamente no sistema de movimentacão.	14
10	Fluxograma das etapas de atuacão dos sistemas de calibracão e mediçãõ. 16	
11	Geometria do Sistema Opto-Mecânico para Tocha de Soldagem. Disposicão da câmara, do emissor do laser e parâmetros a serem estimados.	17
12	Exemplos de imagens capturadas do padrão de calibracão utilizado com quadrados de $5mm$ em cada lado usado para calibrar a câmara e obter os parâmetros intrínsecos da câmara.	20
13	Disposicão da câmara e ponto laser assumindo distâncias $D1$ e $D2$ com ângulo α_1 e α_2 diferentes.	21
14	A distância D e ângulo α devem ser os mesmos para distâncias do primeiro posicionamento da câmara na altura $H1$ e o segundo posicionamento da câmara na altura $H2$	24

15	Método de detecção do ponto laser usando saturação da imagem. Na parte superior está a imagem capturada de uma chapa metálica, bem como três iterações do algoritmo para encontrar o ponto laser.	26
16	Detecção do centroide do ponto laser utilizando o método proposto por Wu e Yu [37].	27
17	Imagem do padrão de calibração utilizado durante a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera para determinar a distância inicial, posteriormente reduzindo a espessura da chapa da superfície plana no qual está preso o padrão.	30
18	Aparato experimental utilizado para coleta dos dados.	31
19	Imagem da chapa metálica com superfície fosca utilizado durante a avaliação experimental.	31
20	Distâncias obtidas por cada método de detecção de pontos de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando dados do relógio comparador durante a calibração.	32
21	Imagem da chapa metálica de superfície reflexiva.	34
22	Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva utilizando método de calibração baseada no relógio comparador.	35
23	Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera.	38
24	Distâncias obtidas em uma superfície metálica com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.	40
25	Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento.	42
26	Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com Filtro de Kalman.	44
27	Imagem da chapa metálica de superfície Reflexiva utilizada durante os experimentos.	46
28	Estimativas médias de distância obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando relógio comparador.	47
29	Distâncias obtidas usando cada um dos métodos de calibração baseado em relógio comparador em teste de repetibilidade variando 10mm entre imagens.	49
30	Distâncias estimadas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando a estimativa de distância.	51
31	Distâncias obtidas com base na calibração usando a estimativa de distâncias com uso de filtro de Kalman.	53

32	Distâncias estimadas utilizando os diversos métodos de detecção do ponto laser calibrados usando a estimativa de distância da câmera em teste de repetibilidade.	55
33	Distâncias estimadas utilizando os diversos métodos de detecção do ponto laser calibrados usando a estimativa de distância da câmera em teste de repetibilidade com filtragem de Kalman.	57
34	A distância D e ângulo α devem ser os mesmos para distâncias $H1$ e $H2$	62
35	Quanto menor o ângulo α maior a variação do centroide do ponto laser na imagem.	66
36	Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo Aberto para Teste 01 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração. . .	67
37	Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo fechado para Teste 01 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração. . .	68
38	Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo aberto para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração. . .	69
39	Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo médio para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração. . .	70
40	Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo fechado para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração. . .	71
41	Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 01 para ângulo α aberto.	73
42	Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 01 para ângulo α fechado.	75
43	Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α aberto.	77
44	Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α médio.	79
45	Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α fechado.	81

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros estimados D e α obtidos com cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando relógio comparador em uma superfície fosca.	32
2	Medições obtidas com parâmetros D e α para cada método de detecção do ponto laser na superfície fosca em centímetros (cm).	33
3	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão na superfície fosca.	33
4	Tempo médio de execução para cada método de detecção na superfície fosca.	33
5	Parâmetros estimados D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser em superfície reflexiva com base no método de calibração usando relógio comparador.	35
6	Medições obtidas através dos parâmetros D e α encontrados por cada método de detecção do ponto laser na superfície reflexiva.	36
7	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão na superfície reflexiva.	36
8	Tempo médio para execução de cada método de detecção em superfície reflexiva.	36
9	Parâmetros estimados D e α usando cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera em superfície reflexiva.	37
10	Estimativas de distância em centímetros (cm) obtidas usando o modelo com parâmetros D e α estimados com método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera.	39
11	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva usando a estimativa de deslocamento da câmera.	39
12	Parâmetros estimados D e α obtidos para cada método com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.	40
13	Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros D e α determinados usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.	41
14	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva usando Filtro de Kalman.	41
15	Parâmetros estimados D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera em uma superfície fosca.	42

16	Estimativa de distâncias em centímetros (cm) obtidas com parâmetros D e α estimados em imagens uma superfície fosca.	43
17	Erro médio de distância e seu respectivo desvio padrão em superfície fosca.	43
18	Parâmetros estimados D e α obtidos usando cada método de detecção com filtro de Kalman calibrados usando a estimativa de deslocamento da câmera em superfície fosca.	43
19	Estimação de distância em centímetros (cm) obtidas usando parâmetros D e α obtidos por cada método de detecção do ponto laser em superfície fosca com filtro de Kalman.	45
20	Erro médio de distância e seu respectivo desvio padrão em superfície fosca com filtro de Kalman.	45
21	Parâmetros estimados D e α com base no método de calibração usando relógio comparador em superfície reflexiva.	46
22	Estimativas de distância em centímetros (cm) obtidas com parâmetros D e α calibrados com relógio comparador em superfície reflexiva. . .	48
23	Erro médio de distância e desvio padrão baseado na calibração por relógio comparador em superfície reflexiva.	48
24	Tempo médio para execução de cada método de detecção em superfície reflexiva.	48
25	Estimativas de distância em centímetros (cm) baseadas nos parâmetros D e α para o teste de repetibilidade variando $10mm$ entre imagens. . .	50
26	Erro médio e desvio padrão da estimativa de distâncias no teste de repetibilidade com calibração usando relógio comparador.	50
27	Parâmetros estimados D e α obtidos por cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de distância da câmera em superfície reflexiva.	51
28	Medições obtidas através de D e α encontrados em cada método de detecção do ponto laser no Teste Geral Chapa Reflexiva.	52
29	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva.	52
30	Parâmetros estimados para D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de distância com filtro de Kalman.	53
31	Estimativa de distâncias em centímetros (cm) obtida por cada método de detecção do ponto laser no com filtro de Kalman em superfície reflexiva.	54
32	Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão com filtro de Kalman durante calibração usando estimativa de distâncias.	54
33	Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros de D e α estimados usando calibração por estimativa de distância em teste de repetibilidade.	56
34	Erro médio e desvio padrão do erro estimados usando calibração baseada em estimativa de distância da câmera no teste de repetibilidade.	56
35	Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros de D e α estimados usando calibração por estimativa de distância e filtro de Kalman em teste de repetibilidade	58

36	Erro médio e desvio padrão do erro estimados usando calibração baseada em estimativa de distância da câmera e filtro de Kalman no teste de repetibilidade.	58
37	Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 01 com ângulo aberto	68
38	Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 01 com ângulo fechado	68
39	Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo aberto	70
40	Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo médio	70
41	Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo fechado	71
42	Medições de distância no teste 01 com ângulo aberto utilizando D e α de cada método de calibração	72
43	Medições de distância no teste 01 com ângulo fechado utilizando D e α de cada método de calibração	74
44	Medições de distância no teste 02 com ângulo aberto utilizando D e α de cada método de calibração	76
45	Medições de distância no teste 02 com ângulo médio utilizando D e α de cada método de calibração	78
46	Medições de distância no teste 02 com ângulo fechado utilizando D e α de cada método de calibração	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	Coordenada da imagem no eixo x da primeira linha detectada do chanfro de soldagem
A2	Coordenada da imagem no eixo x da segunda linha detectada do chanfro de soldagem
A3	Coordenada da imagem no eixo x da terceira linha detectada do chanfro de soldagem
A4	Coordenada da imagem no eixo x da quarta linha detectada do chanfro de soldagem
A2'	Nova coordenada da imagem no eixo x da segunda linha detectada do chanfro de soldagem
A3'	Nova coordenada da imagem no eixo x da terceira linha detectada do chanfro de soldagem
CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
D	Distância entre emissor laser e a câmera
E	Espessura da chapa de soldagem
H	Distância ou altura entre a câmera e a chapa de soldagem
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>)
f_c	Distância focal
u	Coordenada da imagem no eixo x de detecção do ponto laser
v	Coordenada da imagem no eixo y de detecção do ponto laser
u_0	Coordenada da imagem no eixo x do centro óptico do sensor
v_0	Coordenada da imagem no eixo y do centro óptico do sensor
α	Ângulo do emissor do ponto laser em relação à câmera
β	Ângulo formado pelo ponto laser em relação ao sensor da câmera
θ	Ângulo interno do triângulo formado pelo ponto laser referente ao valor de β
γ	Ângulo interno do triângulo formado pelo ponto laser referente ao valor de α e θ

ϕ_1

Ângulo de bisel formado do lado direito do chanfro

ϕ_2

Ângulo de bisel formado do lado esquerdo do chanfro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Definição do problema	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Motivação	4
1.3.1	Chanfro de soldagem	5
1.4	Trabalhos relacionados	8
1.5	Organização do Trabalho	10
2	SISTEMA DE SOLDAGEM	11
2.1	Soldagem com Arames Tubulares	11
2.2	Plataforma Bug-O	11
2.3	Algoritmo Detector de Linhas do Chanfro	12
2.4	Escolha e Posicionamento da Câmera	13
2.4.1	Ponto laser	13
2.5	Sistema Embarcado	14
2.6	Sistema de Movimentação do Eixo Z	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Calibração dos Parâmetros Intrínsecos da Câmera	20
3.2	Estimação dos Parâmetros D e α	21
3.3	Filtro de Kalman	21
3.4	Estimação das distâncias entre cada posição do sistema com imagens	23
3.5	Métodos de calibração D e α	23
3.6	Método dos Mínimos Quadrados	25
3.6.1	Método de Calibração por Otimização Não-Linear	25
3.7	Detecção do Ponto Laser	26
3.7.1	Método por Saturação da imagem	26
3.7.2	Detecção por Regressão com Precisão de Subpixel	26
3.7.3	Detecção utilizando Método Misto	28
4	RESULTADOS	29
4.1	Avaliação da Calibração com Relógio Comparador	30
4.1.1	Superfície Fosca	31
4.1.2	Superfície Reflexiva	34
4.2	Avaliação da Calibração Baseada em Estimativa de Deslocamento da Câmera	37
4.2.1	Superfície Reflexiva	37

4.2.2	Superfície Fosca	41
4.3	Avaliação da Repetibilidade	45
4.3.1	Calibração do Sistema usando Relógio Comparador	46
4.3.2	Repetibilidade com Calibração Baseada em Relógio Comparador	49
4.3.3	Calibração do Sistema usando Estimativa de Distâncias	50
4.3.4	Repetibilidade com Calibração Baseada em Estimativa de Distâncias	54
4.3.5	Repetibilidade com Calibração Baseada em Estimativa de Distâncias e Filtro de Kalman	56
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	APÊNDICE APPENDICES	60
	APÊNDICE APÊNDICEAMÉTODO DE CALIBRAÇÃO TESTADOS PRELIMINARMENTE	62
A.1	Métodos de calibração	63
A.1.1	Método de calibração por diferenciação com tolerância ao ΔH (M1)	63
A.1.2	Método de calibração por diferenciação de distâncias iterativo (M2)	64
A.1.3	Método de calibração iterativo com distâncias absolutas (M3)	65
APÊNDICE	APÊNDICEBRESULTADOS PRELIMINARES DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÕES	66
B.1	Teste 01	67
B.1.1	Ângulo Aberto	67
B.1.2	Ângulo fechado	68
B.2	Teste 02	69
B.2.1	Ângulo Aberto	69
B.2.2	Ângulo Médio	70
B.2.3	Ângulo fechado	71
B.3	Teste 01 ângulo aberto	72
B.4	Teste 01 ângulo fechado	73
B.5	teste 02 ângulo aberto	75
B.6	Teste 02 ângulo médio	77
B.7	Teste 02 ângulo fechado	79
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem implica em uma grande exposição a materiais tóxicos, faíscas, radiação e a altas temperaturas ao soldador [1]. Automatizar o processo de soldagem acarreta naturalmente na substituição do soldador por um operador de solda, que controla e define parâmetros para que o robô de soldagem realize a operação.

O uso de câmeras como sensor de aquisição de dados cresce cada vez mais, seja pelo aparecimento de novos métodos de detecção de informações visuais [33], bem como novas tecnologias com maiores capacidades de processamento e armazenamento. Além disso, a miniaturização dos sistemas de computação também é um fenômeno relevante, como por exemplo os *single-board computers* - *SBCs* - *Odroid* e *Raspberry Pi* [30]. Por consequência, a visão computacional tem sido cada vez mais utilizada, por aumentar a flexibilidade dos sistemas robóticos e automatizados para diversos fins, como controle de veículos, tanto aéreos, como terrestres e até mesmo sistemas submarinos [23].

Considerando a robotização da soldagem, o dimensionamento da geometria do chanfro de soldagem para o posicionamento da tocha de soldagem deve possuir uma boa precisão, incluindo um ajuste fino na altura da tocha [27]. Com isso, é proposto o uso de um sistema de percepção baseado em um ponto laser para realizar a estimação da distância entre a tocha de soldagem e o chanfro de soldagem, utilizando visão computacional, e a partir desta informação, realizar o dimensionamento do chanfro de soldagem.

A manutenção do comprimento do arco em uma faixa de atuação apropriada é importante para obtenção de uma solda aceitável e uniforme. Arcos de soldagem muito curtos tendem a produzir um reforço excessivo no chanfro de soldagem. Já comprimentos de arcos muito longos causam mais respingos e uma penetração menor, que favorece a formação de porosidade na solda. Instabilidades no arco de soldagem podem formar uma solda aparentemente disforme, até mesmo iniciar a formação trincas na solda depositada dependendo do tipo de aço que se está sendo realizada a soldagem [24].

Especificamente no que diz respeito a soldagem robotizada, os robôs de soldagem linear apresentam desafios específicos. Tais robôs são o foco do presente trabalho. Como mostrado na Figura 1, a plataforma de soldagem é composta por um *tractor* que realiza o deslocamento no eixo x em cima de um trilho. Deslocando juntamente com o *tractor*,

o módulo *weaver* desloca a tocha perpendicularmente em relação ao *tractor*, fazendo movimento de costura ao longo do chanfro de soldagem. Ao final, o eixo z é responsável por atuar no deslocamento e correção da altura da tocha de soldagem. Todos os eixos da plataforma podem se movimentar independentemente um do outro.

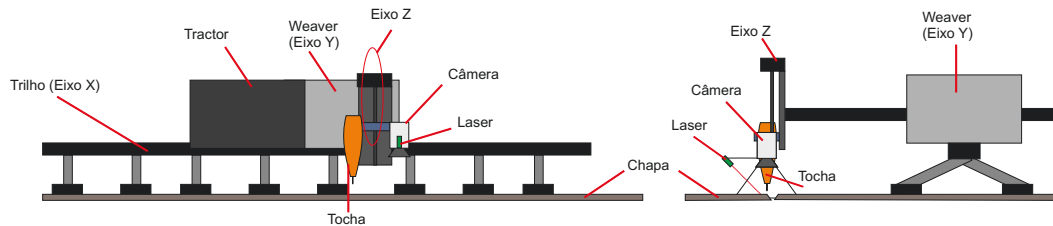


Figura 1: Estrutura de um robô de soldagem linear com sistema proposto no presente trabalho: visão lateral (à direita) e frontal (à esquerda).

1.1 Definição do problema

O problema tratado no presente trabalho é a estimação da distância da tocha em relação ao chanfro de soldagem em um sistema multi-passe de soldagem utilizando um sistema de visão monocular e um ponto laser. O trabalho visa manter constante a distância entre o eletrodo de solda e o chanfro, uma vez que essa distância pode variar devido à solda depositada no passe anterior, deformidades nas chapas de soldagem por dilatação ou mau posicionamento do sistema de soldagem em relação ao chanfro. O sistema de percepção é composto por uma câmera monocular e um emissor de ponto laser para auxiliar a estimar a distância entre a câmera e as chapas de soldagem. A câmera monocular também é utilizada para outras atividades do robô como para identificação de trajetórias e identificação de falhas. O sistema também possui um módulo de deslocamento axial que será controlado para corrigir as variações de distância entre o eletrodo e o chanfro de soldagem.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma abordagem de percepção da tocha de soldagem capaz de estimar a distância entre a tocha e o chanfro de soldagem por meio de um método trigonométrico utilizando uma câmera monocular e um ponto laser comum, com a finalidade de determinar o posicionamento da tocha de soldagem em um robô prismático para manter o comprimento do arco de soldagem constante e uniforme. Para atingir esse resultado, alguns passos devem ser realizados:

- Propor um método de detecção do ponto laser;

- Determinar o modelo do sistema opto-mecânico;
- Obter e avaliar um método para calibrar parâmetros - ângulo e distância do emissor do ponto laser;
- Implementar um sistema embarcado para o sensoriamento de distância;

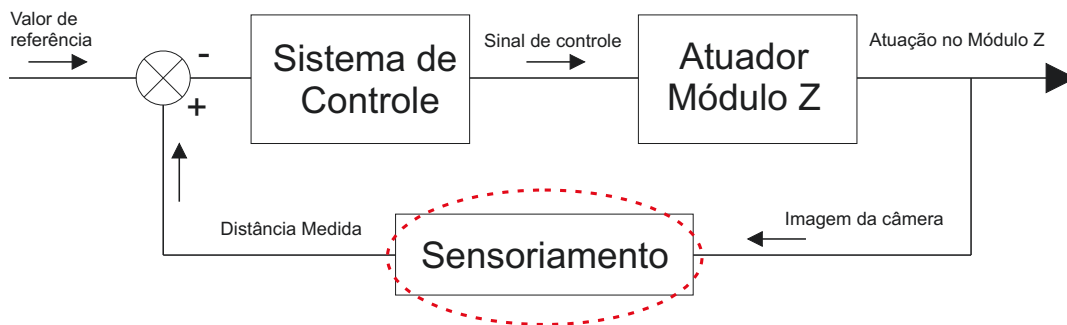


Figura 2: O sensoriamento será abordado neste trabalho. Os detalhes do sistema serão apresentados a seguir.

Dado que um sistema de apenas um grau de liberdade para controle da altura da tocha de soldagem em relação ao chanfro, o maior desafio é o sistema de percepção. Logo, o presente trabalho vai tratar com o sensoriamento dessa distância entre a câmera acoplada a tocha de soldagem e o chanfro (Figura 2, em vermelho).

1.3 Motivação

Para que um sistema automatizado de soldagem seja assim denominado, é extremamente importante realizar a movimentação ao longo do chanfro e executar a costura durante a soldagem. É necessário também manter a altura da tocha no chanfro de soldagem, e assim criar a trajetória da solda a ser feita. Para atuar no controle do eixo z do sistema, é preciso estimar a distância entre as chapas de soldagem e a câmera do sistema, bem como possibilitar uma estimativa da geometria do chanfro de soldagem para determinar a quantidade de arame de solda a ser depositada. É esperado manter constante a distância entre a tocha de soldagem e o chanfro, com objetivo de obter menor porosidade possível, evitar formação de trincas e posteriormente determinar a eficiência de deposição da solda.

Realizar uma soldagem de boa qualidade é uma tarefa complexa, que se realizada de forma manual acaba dependendo muito da habilidade e experiência do soldador atuando no processo. O arco elétrico de soldagem não pode ser nem muito longo nem muito curto. O arco deve ter em média um comprimento entre 0,5 a 1,1 vezes o diâmetro do eletrodo [24, p. 198].

1.3.1 Chanfro de soldagem

Existem diversos tipos de formas do chanfro de soldagem, como por exemplo chanfros em V, X, K, meio V, I, J, U [24, p. 31]. As formas são detalhadas na Figura 3. O tipo de chanfro de soldagem em que o sistema atuará é em forma de V (Figura 3-(a)).

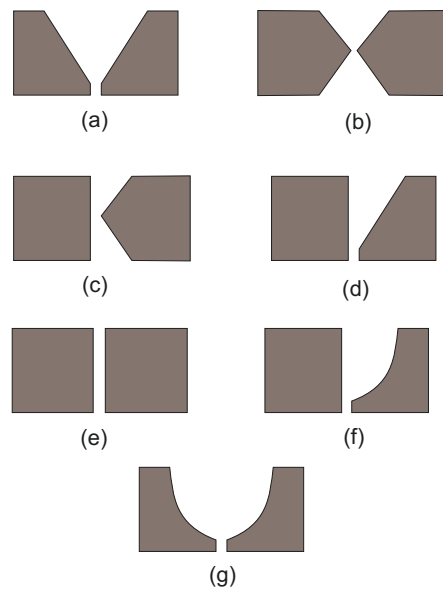


Figura 3: Tipos de chanfros: V (a), X (b), K (c), meio V (d), I (d), J (e), U (f) e U (g).

Obter o dimensionamento do chanfro e determinar a área de deposição da solda é de extrema importância para obtenção da eficiência de deposição da solda. Uma vez adquiridos esses valores, é possível determinar com maior precisão parâmetros como a velocidade de soldagem, tensão de arco e/ou corrente de soldagem para obtenção de uma solda com maior qualidade e até mesmo determinar a qualidade da solda realizada [11].

Para entender melhor o problema, é preciso analisar a geometria do chanfro de soldagem. Como é possível observar na Figura 4, para obter a área do chanfro sabendo sua espessura, é estimado a área total se for obtido os valores de $L1$ e $L2$. Porém, assumindo uma câmera monocular, esses valores são medidos apenas em pixels baseado em suas coordenadas na imagem. Essas coordenadas $A1$, $A2$, $A3$ e $A4$ podem ser estimadas por um algoritmo detector de linhas verticais, por exemplo [20]. Logo, pode-se definir $L1$ e $L2$ como:

$$L1 = |A4 - A1|, \quad (1)$$

$$L2 = |A3 - A2|. \quad (2)$$

Para a conversão das unidades de $L1$ e $L2$ para sistema métrico, é necessário o conhe-

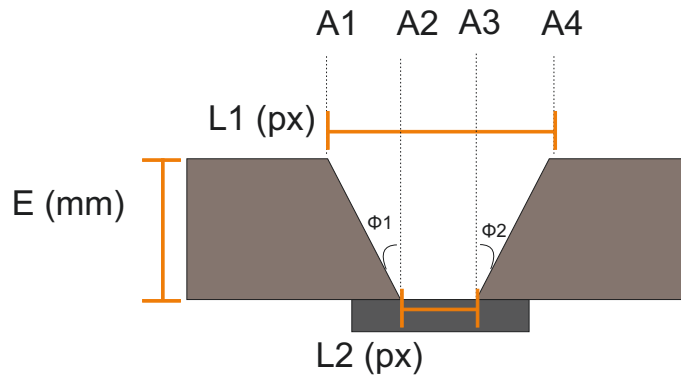


Figura 4: Geometria do chanfro vazio com as coordenadas em pixels da abertura superior (A1 e A4), abertura inferior (A2 e A3) .

cimento a qual distância aquela imagem foi adquirida pela câmera. Com a estimação da distância H , é possível obter uma relação de semelhanças de triângulo entre a distância H e a distância focal da câmera fc . Logo, a relação entre pixels (px) e milímetros (mm) e obter os valores de $L1$ e $L2$ em unidade métrica. Considerando a espessura da chapa E conhecida *a priori* é possível estimar o volume total do chanfro e a cada passe, estimar a quantidade de solda a ser depositada.

Baseado nas informações então obtidas sobre o chanfro e a distância medida entre a câmera e o corpo de prova, poderá então ser calculada a relação pixel para escala métrica da câmera.

$$c = \frac{H}{fc}. \quad (3)$$

Assim, pode-se definir c como a constante de conversão de pixels para mm. Como a altura H da câmera em relação ao chanfro é muito maior que a espessura da chapa E , pode-se assumir como $c \approx cte$ para as diferentes espessuras da solda multi-passe. Conhecendo esse valor, é então possível calcular a área transversal do chanfro vazio, calcular os valores de $L1$ e $L2$ em escala métrica e obter os ângulos de bisel ϕ_1 e ϕ_2 .

A área transversal do chanfro vazio é dado por:

$$AreaVazio = E \cdot c \cdot \left(L2 + \frac{|A1 - A2|}{2} + \frac{|A3 - A4|}{2} \right). \quad (4)$$

A equação do ângulo de bisel ϕ_1 é descrita como:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{|A1 - A2| \cdot c}{E} \right). \quad (5)$$

E o ângulo de bisel ϕ_2 pode ser descrito como:

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{|A3 - A4| \cdot c}{E}\right). \quad (6)$$

O processo de deposição de solda multi-passe consiste em realizar os passes de soldagem um de cada vez, onde a solda é depositada ao longo do chanfro. Inicialmente, o chanfro de encontra vazio como mostrado na Figura 4.

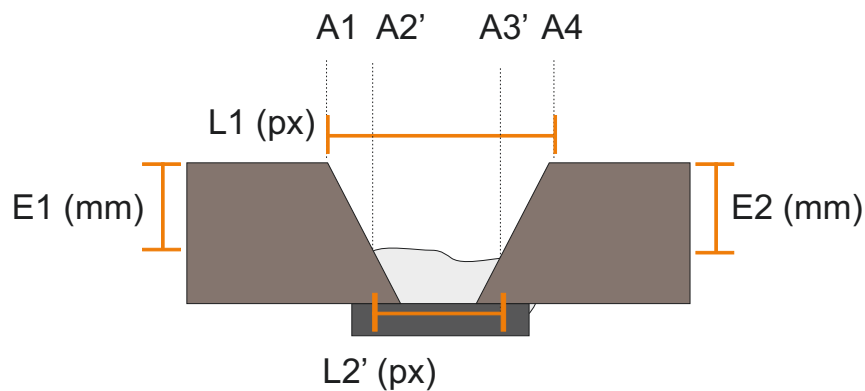


Figura 5: Geometria do chanfro sendo preenchido com valores atualizados da abertura inferior ($L2'$) e altura restante do chanfro vazio ($E1$ e $E2$).

Após o primeira passe de soldagem, parte da área vazia do chanfro diminui. Porém, esse preenchimento não é uniforme ou perfeitamente retilíneo, tendo variações na superfície como ilustra a Figura 5.

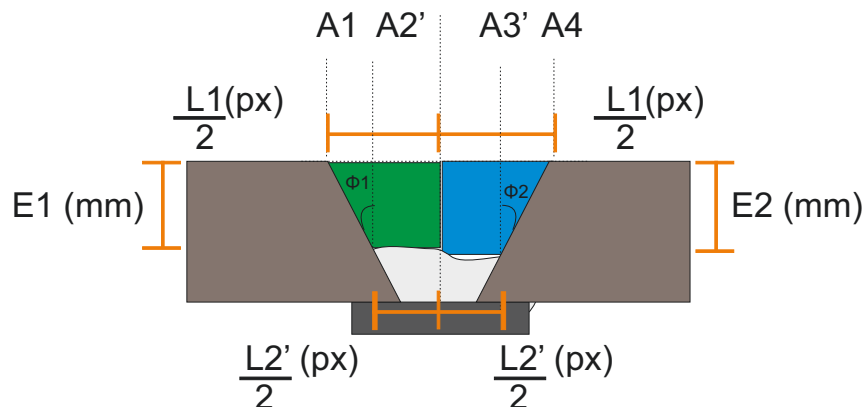


Figura 6: Geometria do chanfro sendo preenchido com estimativa da área de chanfro vazio (verde e azul) através da atualização do valor da abertura inferior ($L2'$).

As coordenadas das novas linhas internas do chanfro de soldagem ($A2'$ e $A3'$) no domínio da imagem são obtidas através do algoritmo detector de linhas [20]. Após, é

calculado a área que ainda falta ser preenchida pela solda, o novo comprimento da abertura inferior ($L2'$) e, conseqüentemente, as novas alturas do chanfro vazio ($E1$ e $E2$) tendo como referência os pontos $A2'$ e $A3'$, assumindo que os ângulos de bisel não se alteram. A Figura 6 ilustra a geometria.

$$E_1 = \frac{|A1 - A2'| \cdot c}{\cos(\phi_1)}, \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{|A3' - A4| \cdot c}{\cos(\phi_2)}, \quad (8)$$

$$L2' = |A2' - A3'|. \quad (9)$$

Ao obter esses dados, é possível determinar o quanto do chanfro ainda falta a ser preenchido. A Equação 10 apresenta a aproximação da nova área a ser preenchida.

$$AreaVazio' = \frac{(L1 + L2') \cdot c}{4} \cdot (E_1 + E_2) \quad (10)$$

Com esses parâmetros obtidos, é viável calcular o quanto a altura da tocha de soldagem deve ser alterada para manter constante a distância da tocha de soldagem e o chanfro de soldagem. Baseado nisso, obter também os valores de quantidade de arame a ser depositada e estimar sua eficiência de deposição.

1.4 Trabalhos relacionados

A maior parte da robotização da soldagem é empregada por robôs industriais, geralmente com seis graus de liberdade. Eles executam tarefas previamente programadas, executando sempre os mesmos passos de soldagem sem nenhuma percepção do ambiente a sua volta para correções de trajetória [29].

O uso de laser em conjunto com câmeras em ambientes de soldagem é amplamente empregado para correções de trajetórias e dimensionamento do chanfro de soldagem como Drews *et al.* [9] e Kawahara [17]. Kim *et al.* [18] faz uso de um sistema de laser estruturado para iluminar o chanfro, uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*) para realizar imageamento, além de filtros ópticos sendo testado em processos de solda. Eles dividem o processo de identificação do chanfro em basicamente duas etapas: na primeira etapa realiza a identificação geométrica do chanfro antes da soldagem e, depois, durante a soldagem são levantadas as características do chanfro de soldagem.

O trabalho de Kim *et al.* [19] detalha uma abordagem de soldagem orbital utilizando laser em linha e um sensor visual para captar a linha laser projetada juntamente com uma câmera CCD para imagear o chanfro de soldagem e detectar o centro do chanfro de soldagem nas imagens. Também utiliza algoritmos de rastreamento e estimação para traçar a

trajetória da soldagem.

Huang *et al.* [13] apresentam um método experimental de soldagem à laser, introduzindo um sistema de sensoriamento chamado HUST-SM para soldagem em superfícies curvadas. Este sistema utiliza uma câmera e quatro lasers estruturados em linha, sendo dois laser em linha na faixa do vermelho e dois laser em linha verde. O sistema combina um imageamento em três dimensões utilizando uma abordagem em duas dimensões, ou seja, apenas uma câmera. Ao identificar as linhas estruturadas na imagem, utiliza métodos de triangulação para obter os parâmetros em três dimensões.

Chen *et al.* [4] tratam o problema de dimensionamento e posição do chanfro de soldagem utilizando um par de câmeras estéreo, ou seja duas câmeras. Essa forma de imageamento binocular é utilizada para adquirir informações de chanfros curvos e assim determinar a trajetória da tocha de soldagem ao longo do chanfro. O método utiliza técnicas de detecção de bordas por subpixel [10]. A tocha de soldagem e a câmera são fixados no efetuador da plataforma de soldagem.

Já em Xu *et al.* [39] é apresentado uma abordagem de controle servovisual híbrido também utilizando uma linha laser estruturada para reconhecimento do chanfro de soldagem e posicionamento da tocha de soldagem.

O trabalho de Xie *et al.* [38] também apresenta a abordagem de controle servovisual para posicionamento do efetuador no espaço cartesiano $3D$. Esta abordagem utiliza princípio semelhante a este trabalho no qual é utilizado um ponto laser para detectar visualmente a distância entre a câmera e o alvo por método trigonométrico. Entretanto, a aproximação feita para obtenção da distância não obteve resultados satisfatórios ao ser implementada. Além disso, o trabalho não especifica de que forma eram medidos os valores de distância entre o emissor laser e a câmera, bem como a medição do ângulo do laser em relação a câmera.

Em Wei *et al.* [36] e Liu *et al.* [21] são apresentados sistemas onde são empregadas câmeras para visualizar as características do chanfro e do conjunto de solda simultaneamente. Diferentemente, no presente trabalho a poça de fusão não é uma região de interesse. Assim, o interesse maior está no dimensionamento do chanfro. Em Chen *et al.* [3] é apresentado um sistema para planejamento de trajetória de um manipulador de 6 graus de liberdade utilizando feixe laser em linha. Recentemente, Jing *et al.* [15] utilizou sistema de visão RGB-D baseado no sensor Kinect para gerar trajetórias de soldagem. Entretanto, esse tipo de sensor apresenta diversas limitações pelas características das chapas metálicas a serem imageadas, apresentando limitada capacidade de estimação de distância nesse contexto. Além disso, utilizam programação *off-line* da trajetória ou um modelo CAD.

O presente trabalho visa empregar um sistema monocular com um emissor de ponto laser para obtenção da distância de modo a permitir o ajuste da tocha de soldagem com relação ao chanfro de soldagem.

1.5 Organização do Trabalho

Neste capítulo é feita a introdução ao assunto e foi apresentado as motivações, definição do problema e objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 será apresentado o sistema de soldagem e definição de cada parte que compõe a plataforma.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada por este trabalho, bem como a derivação do método de calibração do sistema para obtenção da distância entre a câmera e o emissor do ponto laser, além da orientação do mesmo em relação a câmera.

No Capítulo 4 são mostrados os experimentos realizados para validar o sistema de percepção proposto.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos resultados, considerações finais e trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE SOLDAGEM

Para um melhor entendimento do problema abordado nessa dissertação é necessário detalhar as limitações que o sistema de soldagem impõe, uma vez que o objetivo do trabalho é de viabilizar uma plataforma de soldagem com capacidade de percepção entre a tocha de soldagem e o chanfro de soldagem.

O sistema de percepção e soldagem é formado pela plataforma mecanizada Bug-O MDS 1005, por uma câmera monocular Pylon Basler ac1300 30 μ c de 1280 \times 720 pixels, um ponto laser de potência inferior a 5mW (Classe 3R [14]), sistema embarcado Arduino Due para comunicação e controle e a plataforma Odroid XU4 para processamento das imagens.

2.1 Soldagem com Arames Tubulares

A soldagem por arco elétrico com arames tubulares (FCAW - *Flux-Cored Arc Welding*) é um processo de soldagem de peças metálicas por arco elétrico utilizando arame tubular com um fluxo fusível (agente químico utilizado na metalurgia). O arame tubular, alimentado por uma bobina, ao ser fundido na poça de fusão juntamente com fluxo fusível cria a proteção da poça de fusão criando escória em volta da poça de fusão [7]. Há também a opção de trabalhar com gás de proteção contra a ação de gases atmosféricos no processo de soldagem FCAW.

O uso da soldagem FCAW é uma alternativa de alta produtividade e qualidade de soldagem. Assim, atualmente, o uso da soldagem FCAW é amplamente empregado em soldagem robotizada, como por exemplo na indústria naval [22].

2.2 Plataforma Bug-O

A plataforma utilizada no trabalho é fabricada pela Bug-O Systems, modelo MDS 1005 [2]. Esse robô de soldagem linear é muito utilizado em estaleiros, indústrias e linhas de montagem. Apresenta apenas dois graus de liberdade, permitindo movimento ao longo do chanfro de soldagem (Eixo X) e tecimento da solda, oscilando perpendicularmente ao chanfro de soldagem (Eixo Y). Não possuindo o atuador no Eixo Z, cabendo ao operador

de solda realizar manualmente o posicionamento da tocha na altura desejada. A Figura 7 mostra uma ilustração da plataforma.

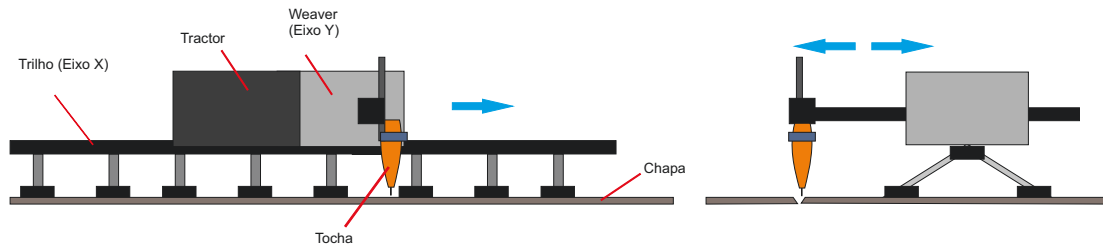


Figura 7: Estrutura da plataforma Bug-O MDS 1005 e seus respectivos módulos (visão lateral à esquerda e frontal à direita). A seta em azul indica a(s) direção(ões) de movimento do *tractor* e *weaver*

Esta plataforma não possui nenhuma sistema de realimentação ou controle ativo da trajetória, uma vez que erroneamente posicionado pelo operador, a plataforma irá soldar fora da área do chanfro. A cada passo de soldagem, o operador do robô deve ajustar a altura da tocha manualmente, além das velocidades de costura e do carro (*Tractor*).

2.3 Algoritmo Detector de Linhas do Chanfro

O Algoritmo Detector de Linhas do Chanfro atua na etapa de conversão das primitivas do chanfro de soldagem para domínio da imagem (em pixels). Nessa etapa, o sistema, através da imagem adquirida, reconhece as linhas do chanfro de soldagem estimando as coordenadas em pixels na imagem. Diversos algoritmos podem ser utilizados para fazer essa estimativa como mostra Leonardo *et al.* [20], no qual métodos de detecção de retas no domínio da imagem são utilizados. Tal método é conhecido na literatura e está fora do escopo do presente trabalho.

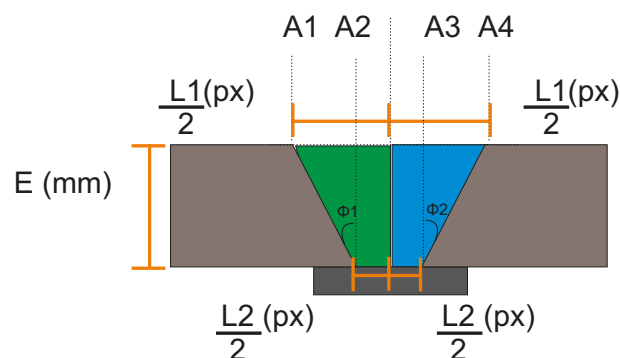


Figura 8: Geometria do chanfro estimada pelo algoritmo detector de linhas. Baseado na informação da altura H entre o superfície do chanfro e a câmera, além da detecção das coordenadas $A1$, $A2$, $A3$ e $A4$, é possível calcular os valores de $L1/2$ e $L2/2$.

Com a estimação da altura H é possível realizar o cálculo das características do chanfro de soldagem como abertura superior (L1), abertura inferior (L2) e ângulo de bisel ($\phi_1 \phi_2$). A Figura 8 ilustra essa estimação.

2.4 Escolha e Posicionamento da Câmera

Pelas características do sistema foi escolhido o uso de apenas uma câmera, ou seja, um sistema monocular. Existem duas formas de posicionamento da câmera: embarcada *eye-in-hand* ou fixa *eye-to-hand* [25, p. 28]. No posicionamento *eye-in-hand*, a câmera é posicionada na parte de atuação do sistema [6, p. 28], como por exemplo, no efetuador de um manipulador robótico. Com essa abordagem, consegue-se uma boa visualização das características visuais, porém pode perder de vista certas características por conta do movimento da câmera [28, p. 40]. Já na *eye-to-hand*, a câmera é fixa, posicionada em direção ao ambiente que o sistema vai trabalhar, extraindo características do ambiente, obtendo uma visão mais ampla, porém com menor detalhamento do ambiente [28, p. 40].

O posicionamento escolhido foi na forma embarcada (*eye-in-hand*), pois a câmera se movimenta de acordo com o movimento da tocha de soldagem. Contudo, a câmera estará afastada alguns centímetros da tocha.

2.4.1 Ponto laser

Devido ao uso de uma sistema monocular e a limitações da plataforma de processamento, é necessário uma técnica simples e robusta de detecção da distância entre a câmera e a chapa a ser soldada. Técnicas utilizando estereoscopia para obter a distância entre a chapa e a câmera exigiriam elevado poder computacional [31] e, também, o imageamento das chapas metálicas dificulta a identificação de características relevantes de modo a realizar a correspondência estéreo [12] (*stereo matching*).

Sensores externos de medição por serem muito custosos como por exemplo sensores optoeletrônicos industriais. Além disso, sensores indutivos possuem uma faixa de atuação muito limitada, logo não seriam adequados. Assim, eles foram descartados por trazerem maior complexidade estrutural e pela necessidade de sincronização entre a imagem captada pela câmera e o dado enviado pelo sensor. Contudo, técnicas utilizando emissores de ponto ou linhas laser são amplamente utilizadas conjuntamente com técnicas de visão computacional, por exemplo Xie *et al.* [38] utiliza ponto laser para determinar o posicionamento do efetuador de um manipulador.

A utilização do ponto laser simplifica a detecção da distância entre a tocha e a câmera, uma vez que é possível uma construção de modo que variações da posição do centroide do ponto laser ocorrem apenas ao longo do Eixo X das imagens capturadas pela câmera. Logo, restringindo a busca do ponto laser uma área específica da imagem, sendo, portanto, eficientemente obtida.

2.5 Sistema Embarcado

Uma das limitações é o uso de um *hardware* embarcado que deve possuir dimensões físicas reduzidas e custo reduzido. Como consequência, essas características limitam o poder computacional do sistema. Entretanto, atualmente existem alternativas no mercado como a plataforma Odroid XU4 [26]. Ela possui poder computacional adequado para executar algoritmos de visão computacional simples e barramento USB 3.0 e *Ethernet Gigabit* para comunicação com a câmera.

2.6 Sistema de Movimentação do Eixo Z

O atuador que permite variar a altura da tocha de soldagem é um sistema de deslocamento axial possuindo um motor de passo para realização do torque no eixo axial. A câmera e a tocha de soldagem ficam acopladas no sistema que atua alterando a altura da tocha de soldagem em relação às chapas metálicas a serem trabalhadas. Figura 9 ilustra o sistema.

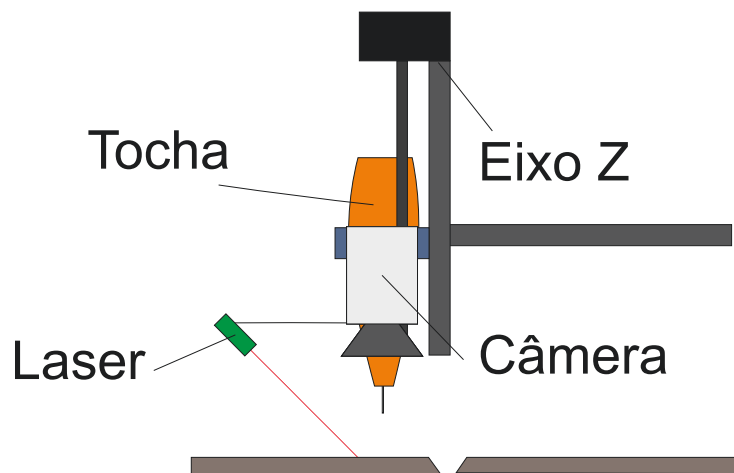


Figura 9: Vista frontal da estrutura do sistema de movimentação do eixo Z. A tocha, em laranja, a câmera, em cinza, e o ponto laser, em verde, são acoplados rigidamente no sistema de movimentação.

O Sistema de movimentação do eixo Z deve ser acoplado ao *weaver* da plataforma de soldagem. Basicamente, a altura da tocha de soldagem é alterada por um motor de passo que realiza a movimentação. Ao adquirir a imagem do chanfro com o ponto laser na

imagem, o sistema estima a distância que a câmera se encontra do chanfro de soldagem e realiza a correção da distância, se necessário.

3 METODOLOGIA

O sistema de percepção proposto no presente trabalho é baseado em uma referência inicial para estimação da distância para calibração do sistema, a partir da posição do ponto laser capturada pela câmera é feita a estimativa da altura. As etapas de atuação dos sistemas de calibração e medição são descritas no fluxograma da Figura 10.

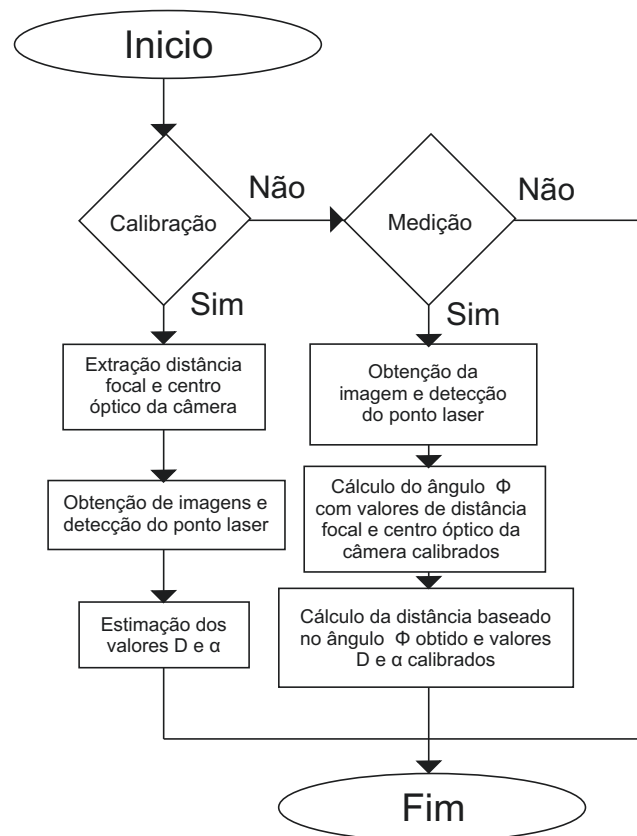


Figura 10: Fluxograma das etapas de atuação dos sistemas de calibração e medição.

Tal informação auxilia no mapeamento do chanfro de soldagem, realizando a estimação da distância entre a câmera e o corpo de prova sem utilizar recursos como sensores externos.

O sistema utiliza apenas um ponto laser.

O método para estimar a distância da câmera ao corpo de prova consiste em posicionar rigidamente um ponto laser a uma distância D da câmera, com uma inclinação α em relação a câmera. Ao projetar o laser no corpo de prova, o laser é detectado pela câmera.

Como o ponto laser possui alta intensidade luminosa, cria-se uma área de saturação na imagem. Essa área é segmentada e o centroide obtido, sendo suficiente para estimar a altura com o sistema calibrado.

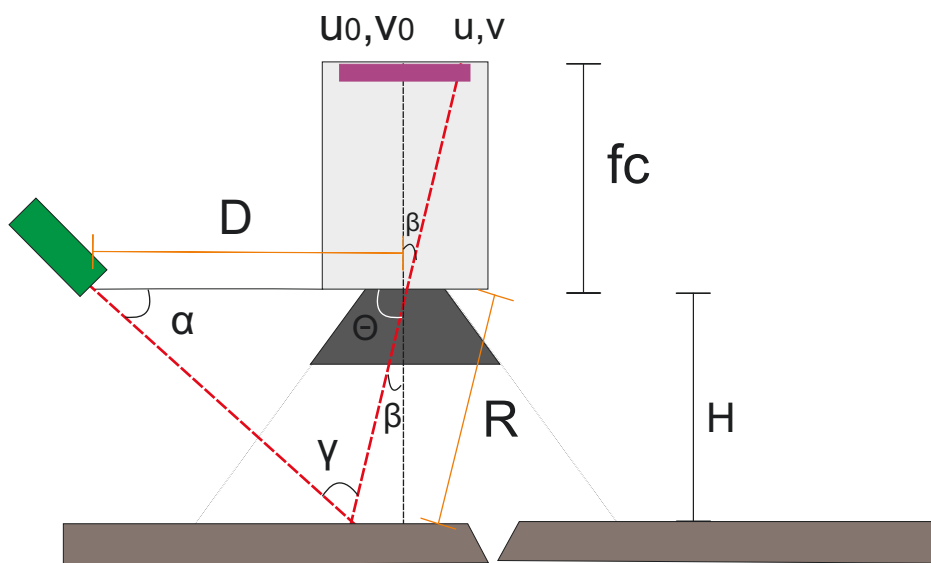


Figura 11: Geometria do Sistema Opto-Mecânico para Tocha de Soldagem. Disposição da câmera, do emissor do laser e parâmetros a serem estimados.

Na Figura 11 é ilustrado o sistema opto-mecânico proposto neste trabalho, bem como os parâmetros a serem estimados:

- u_0, v_0 : centro óptico do sensor da câmera;
- u, v : coordenadas de detecção do laser no sensor da câmera;
- D : Distância entre emissor laser e a câmera;
- R : Comprimento de um dos lados do triângulo formado;
- H : Distância entre câmera e o alvo;
- fc : Distância focal da câmera;

- α : Ângulo do emissor laser em relação à câmera;
- β : Ângulo do ponto laser detectado no sensor da câmera;
- θ : Ângulo formado internamente no triângulo escaleno formado na Figura 11, deduzido diretamente de β ;
- γ : Ângulo formado internamente no triângulo escaleno formado na Figura 11;

Os parâmetros da câmera como a distância focal (fc) e o centro ótico no sensor da câmera (u_0, v_0) são parâmetros construtivos da câmera obtidos por meio de calibração dos parâmetros intrínsecos [33]. Logo, após essa calibração, esses parâmetros são assumidos constantes durante o uso da câmera assumindo que o sistema ótico não é alterado e a câmera terá esses parâmetros fixados. Tal premissa é geralmente assumida em sistemas de visão. Com isso, pode-se calcular a distância euclidiana ($dE(u, u_0)$) do eixo central do sensor no eixo x (u_0) e o centroide do ponto laser é detectado (u). É importante destacar que por restrição mecânica do sistema, o movimento da câmera altera a posição do ponto laser apenas no eixo x . Assim, o ângulo β é calculado através da equação:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{dE(u, u_0)}{fc} \right) \quad (11)$$

Os parâmetros D e α são constantes devido ao posicionamento rígido entre câmera e ponto laser. Logo, com o ângulo β calculado, é possível obter o valor de R por lei dos senos:

$$\begin{aligned} \frac{R}{\text{sen}(\alpha)} &= \frac{D}{\text{sen}(\gamma)}, \\ R &= \frac{D \cdot \text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\gamma)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Com valor de β calculado, pode-se então obter o valor dos ângulos internos do triângulo formado. Primeiramente, é necessário saber se o ângulo θ é maior ou menor que noventa graus. Para isso, é preciso verificar a coordenada de detecção do ponto laser em relação ao centro ótico do sensor da câmera. Basicamente, se o valor de u for menor que u_0 , então:

$$\theta = \frac{\Pi}{2} - \beta. \quad (13)$$

Senão:

$$\theta = \frac{\Pi}{2} + \beta. \quad (14)$$

Logo:

$$\begin{aligned}\alpha + \theta + \gamma &= \Pi, \\ \gamma &= \Pi - \alpha - \theta.\end{aligned}\tag{15}$$

A distância H é basicamente o cateto adjacente em relação ao ângulo β e R a hipotenusa de um triângulo retângulo. Assim, assumindo R descrito pela Eq. 12 e sendo $\text{sen}(\gamma) = \text{sen}(\Pi - \alpha - \theta)$. Logo:

$$\text{sen}(\Pi - \alpha - \theta) = \text{sen}(\Pi - (\alpha + \theta)).\tag{16}$$

Como a função seno é ímpar, ou seja $\text{sen}(\Pi - x) = \text{sen}(x)$:

$$\text{sen}(\Pi - (\alpha + \theta)) = \text{sen}(\alpha + \theta).\tag{17}$$

Assim, $\text{sen}(\gamma)$ pode ser descrito como:

$$\text{sen}(\gamma) = \text{sen}(\alpha + \theta).\tag{18}$$

Finalmente, baseado na Eq. 12, tem-se:

$$R = \frac{D \cdot \text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\alpha + \theta)}.\tag{19}$$

Como R está relacionado com H e θ :

$$R = \frac{H}{\text{sen}(\theta)}.\tag{20}$$

Relacionado com a Eq. 19:

$$\begin{aligned}\frac{H}{\text{sen}(\theta)} &= \frac{D \cdot \text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\alpha + \theta)}, \\ H &= \frac{D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\alpha + \theta)}.\end{aligned}\tag{21}$$

Para reduzir a complexidade dos cálculos, inverte-se as equações:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{H} &= \frac{\text{sen}(\alpha + \theta)}{D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\theta)}, \\
\frac{1}{H} &= \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\theta) + \text{sen}(\theta) \cdot \cos(\alpha)}{D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\theta)}, \\
\frac{1}{H} &= \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\theta)}{D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\theta)} + \frac{\text{sen}(\theta) \cdot \cos(\alpha)}{D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\theta)}, \\
\frac{1}{H} &= \frac{\cos(\theta)}{D \cdot \text{sen}(\theta)} + \frac{\cos(\alpha)}{D \cdot \text{sen}(\alpha)}, \\
\frac{1}{H} &= \frac{\cot(\theta)}{D} + \frac{\cot(\alpha)}{D}, \\
\frac{1}{H} &= \frac{\cot(\theta) + \cot(\alpha)}{D}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Com isso, é deduzido que H é uma função de θ , que pode ser detectado em cada imagem baseado no ponto laser, com D e α constantes:

$$H = \frac{D}{\cot(\theta) + \cot(\alpha)}. \tag{23}$$

3.1 Calibração dos Parâmetros Intrínsecos da Câmera

Os parâmetros intrínsecos da câmera são obtidos utilizando diversas imagens de um padrão planar com formato similar ao de um tabuleiro de xadrez. O padrão de calibração utilizado possui quadrados de $5mm$ em cada lado. Tal dimensão reduzida se deve as distâncias entre a câmera e o chanfro serem reduzidas. Como o tabuleiro precisa ser completamente visualizado nas imagens, logo tal dimensão se mostrou adequada. Com essas imagens, que devem possuir distâncias e angulações diferentes, é realizada a calibração da câmera utilizando o método descrito em Zhang [40] para obtenção dos parâmetros intrínsecos da câmera como distância focal (f_c), centro ótico (u_0, v_0) e coeficientes de distorção radial da lente (k_1 e k_2) [33].

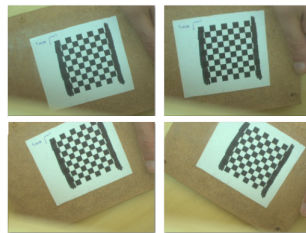


Figura 12: Exemplos de imagens capturadas do padrão de calibração utilizado com quadrados de $5mm$ em cada lado usado para calibrar a câmera e obter os parâmetros intrínsecos da câmera.

3.2 Estimação dos Parâmetros D e α

Um dos principais problemas encontrados para a estimação de distância por trigonometria é determinar com boa acurácia a distância D e o ângulo α no sistema. A Figura 13 mostra dois cenários possíveis.

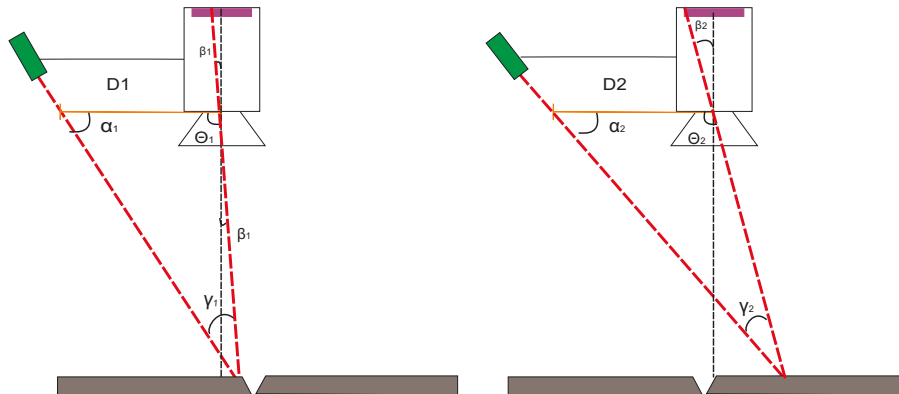


Figura 13: Disposição da câmera e ponto laser assumindo distâncias $D1$ e $D2$ com ângulo α_1 e α_2 diferentes.

A dificuldade na estimação é dada por conta da forma como a câmera e o emissor do ponto laser são acoplados paralelamente no sistema.

Para estimação desses parâmetros dois métodos de calibração são propostos e apresentados na seções a seguir. Eles são executados em um momento anterior a utilização do sistema, e são assumidos constantes devido ao acoplamento rígido.

3.3 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman [16] é um estimador de estado ótimo para sistemas lineares sujeitos a ruídos Gaussianos. Ele estima o melhor valor de um estado do sistema sendo obtido através de uma estimativa, que tipicamente considera o ruído na medição dos valores do sistema dado por:

$$Q = \Delta X^2 \cdot \sigma. \quad (24)$$

Os parâmetros do filtro são:

- A: modelo de transição dos estados;
- B: o modelo das entradas de controle, aplicado no vetor de entradas de controle u ;
- Q: Covariância do ruído do processo;
- H_s : Modelo dos sensores;

- R_s : Matriz chave para a realização de fusão de sensores;
- z : Valor medido pelo sensor;
- I : Matriz identidade;
- ΔX : deslocamento do estado X;
- σ : variância do estado X;

O parâmetro de predição para próximo estado X é dado por:

$$X = A \cdot x[i - 1] + B \cdot u[i - 1]. \quad (25)$$

A predição da covariância pode ser estimada por:

$$p = A * P * A' + Q. \quad (26)$$

A matriz de ganhos de Kalman, K , é definida como:

$$K = p \cdot H_s^T \cdot (H \cdot p \cdot H_s^T + R_s)^{-1}. \quad (27)$$

Atualização do próximo estado é dada por:

$$x[i] = X + K \cdot (z - H \cdot X). \quad (28)$$

Além disso, a covariância estimada é definida como:

$$P = (I - K \cdot H_s) \cdot p. \quad (29)$$

A matriz de ganho K é derivada da matriz de covariância de erro, ou seja, o ganho é alto se o ruído de medição for baixo e vice-versa. Os valores de deslocamento do estado X ΔX e variância do estado X σ foram obtidos empiricamente após resultados de medição de deslocamento durante testes com eixo Z.

Em outras palavras, o filtro Kalman prevê o novo estado do sistema, compara a predição com o valor medido e, assim, determina uma nova estimativa considerando a diferença entre a previsão e o valor medido. Os valores medidos que não se ajustam ao comportamento do sistema obtêm um peso menor no cálculo do ganho.

Resumindo, o sistema analisa a imagem e detecta o centroide do ponto laser, após esta etapa, o filtro de Kalman atua na estimação do centroide do ponto laser, resultando em um novo valor.

Como o presente trabalho atua exclusivamente no eixo x da imagem para detectar o centroide do ponto laser, as matrizes do filtro de Kalman possuem dimensão um (unidimensional), possuindo comportamento de filtro gaussiano.

Métodos para aferir os valores dos estados A , B , H_s , R_s não retornaram valores coesos com a proposta. Entretanto, ao setar valores unitários para esses estados (A , B , H_s , R_s iguais a 1) e z é o resultado da coordenada u do centroide atual detectada do ponto laser $\Delta X = 1.4284$ pixel e $\sigma = 0.1778$ pixel e $Q = \sigma \cdot \Delta X^2$ (aferidos empiricamente em testes com resultados das medições com relógio comparador B).

Com os valores dos estados definidos, é possível realizar a predição do deslocamento do ponto laser na imagem para determinar o valor da distância H mais próximo possível do real.

3.4 Estimação das distâncias entre cada posição do sistema com imagens

Além de obter as alturas entre cada posição da câmera utilizando um relógio comparador como instrumento de medição, é proposto um método capaz de aproximar essas medidas utilizando apenas as diferenças de ângulo θ estimado em cada imagem. Para tal é estimado a variação da altura H como uma função dos ângulos. Tal medida se vale do conhecimento prévio dos passos dados para movimentação do motor entre cada altura e a relação aproximada entre os passos e variação de altura.

$$\Delta H = \Delta \tilde{H} \cdot \frac{\theta_{i+1} - \theta_1}{\bar{\theta}}. \quad (30)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=2}^N (\theta_i - \theta_{i-1})}{N}, \quad (31)$$

onde N é o número de imagens coletadas e $\theta_i - \theta_{i-1}$ a variação dos ângulos entre pares de imagens, assumidas como constantes durante o processo de calibração. Essas medidas são importantes para compensar imperfeições no sistema de rosca sem fim utilizado para transferir o movimento do motor de passo para a câmera.

3.5 Métodos de calibração D e α

Ao definir o método trigonométrico utilizando uma única câmera para detectar o ponto laser na imagem, não há necessidade de definir valores ideais para D e α . Logo, é preciso um método para estimar esses parâmetros.

Alguns métodos foram propostos anteriormente para calibração dos parâmetros D e α no apêndice A. Estes métodos foram de extrema valia para chegar ao método de calibração proposto.

Como não é possível definir com precisão o centro ótico do sensor da câmera e, também, não ter como aferir o ângulo α de forma eficaz com um goniômetro, é proposto utilizar o próprio ponto laser e a câmera para calibrar esses parâmetro.

Para obter os parâmetros de D e α , é proposto um método que avalia as alturas obtidas (H_1 e H_2) e estima D e α , baseado em uma leitura dos valores de variação entre as imagens (ΔH) e nos ângulos θ calculados a partir do método de detecção do ponto laser.

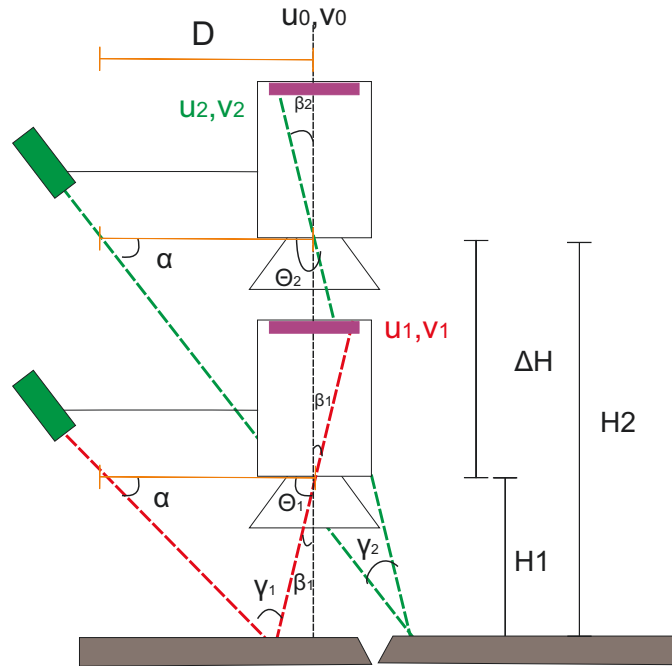


Figura 14: A distância D e ângulo α devem ser os mesmos para distâncias do primeiro posicionamento da câmera na altura H_1 e o segundo posicionamento da câmera na altura H_2 .

Como mostra a Figura 14, ao alterar a altura, os valores de D e α devem permanecer os mesmos, mudando apenas os ângulos de θ_1 para θ_2 , γ_1 para γ_2 e β_1 para β_2 . Para realizar a calibração, é medido uma série de variações de altura ΔH e é também é feita a medição da altura inicial H_1 .

Para obter os parâmetros de calibração de D e α , é necessário medir o ângulo θ de cada imagem. Permitindo, assim, estimar os valores D e α que satisfaçam a condição:

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_1)} = H_1, \quad (32)$$

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_2)} = H_2 = H_1 + \Delta H. \quad (33)$$

É possível estimar os valores de θ de N imagens, sendo necessário satisfazer $N - 1$ condições:

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_i)} = H_i, \quad (34)$$

onde $0 < i < N$.

3.6 Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados visa estimar os parâmetros por regressão, de modo que a soma do quadrado dos erros seja a menor possível. O erro é obtido pela diferença entre o valor observado e o valor estimado.

Pode-se dizer que, para determinar o erro da função, é necessário possuir o valor observado V e o valor estimado por uma função \widehat{V} .

$$e = V - \widehat{V} \quad (35)$$

Seja a função $\widehat{V} = x_0 + c \cdot x_1$ e sabendo os valores de V e c , é possível calcular a soma dos erros para cada valor de V e c e assim determinar os valores dos parâmetros x_0 e x_1 .

$$\sum_{i=1}^n e^2 = \sum_{i=1}^n (V - \widehat{V})^2 \quad (36)$$

3.6.1 Método de Calibração por Otimização Não-Linear

O presente trabalho busca modelar o problema usando a Eq. 34, logo resolvendo o sistema de equações gerado como um problema de mínimos quadrados (Sec. 3.6). Entretanto, devido à natureza da equação ser não-linear é necessário um método próprio. O problema pode ser modelado usando uma $f(X)$ como:

$$f(X) = H_i - \frac{x_0}{\cot(x_1) + \cot(\theta_i)}, \quad (37)$$

assumindo X como o par (x_0, x_1) que representa a distância D e o ângulo α , respectivamente. Esses são os parâmetros a serem estimados durante o processo de calibração. A altura H_i e o ângulo θ_i são previamente estimados para cada imagem i . Logo, pode-se minimizar a função de mínimos quadrados não-linear:

$$\min_X \|f(X)\|_2^2 = \min_X (f(X_1)^2 + f(X_2)^2 + \dots + f(X_n)^2). \quad (38)$$

A solução para este problema é baseada no uso de otimização não-linear por região de confiança (*trust region*) [5]. O algoritmo apresenta uma boa convergência em sistemas sobre-determinados, como é o caso. Além disso, o método pode lidar com valores limites que podem ser facilmente pré-definidos baseados em restrições físicas do sistema.

3.7 Detecção do Ponto Laser

Três métodos para estimar o ponto laser em uma imagem são propostos e detalhados nas próximas seções. Destaca-se a dificuldade de obter a localização do ponto laser devido a característica reflexiva do metal iluminado pelo pela luz laser. O primeiro método é baseado em uma limiarização adaptativa da imagem usando saturação, neste trabalho chamado de método de **Saturação**. O segundo método é baseado na regressão de um círculo para estimar a correta posição do ponto laser usando um limiar fixo, chamado de método de **Subpixel**. Finalmente, o terceiro método proposto entre a estimativa do limiar mas também utilizando uma regressão baseado no modelo para encontrar o centroide com uma precisão de subpixel, chamado aqui de método **Misto**.

3.7.1 Método por Saturação da imagem

A detecção do ponto laser por saturação na imagem é o método mais simples adotado aqui. O método é inicializado com um valor de limiarização pré-determinado, sendo este ajustado até que o método retorne uma imagem binarizada com menos de 10% de pixels brancos. A utilização do valor máximo de 10% de pixels brancos na imagem foi determinado empiricamente atrás de testes realizados na bancada onde esse valor foi suficiente para configurar a detecção do ponto laser.

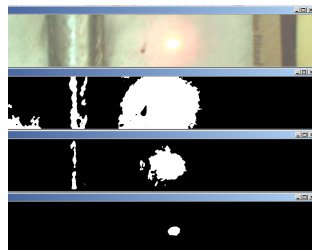


Figura 15: Método de detecção do ponto laser usando saturação da imagem. Na parte superior está a imagem capturada de uma chapa metálica, bem como três iterações do algoritmo para encontrar o ponto laser.

Com a informação da imagem binarizada, foi utilizado o algoritmo de Suzuki et al. [32] para encontrar os contornos dos pontos brancos na imagem e e o centroide.

3.7.2 Detecção por Regressão com Precisão de Subpixel

Na tentativa de melhorar os resultados de detecção do ponto laser e garantir que o objeto detectado é o ponto laser, foi necessário a utilização de um método para detecção com precisão de subpixel. Logo, o método foi baseado no algoritmo de detecção de círculo proposto por Wu e Yu [37].

O método consiste em detectar quatro pontos na imagem limiarizada, chamados de pontos $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4$ e y_4 na Figura 16a. Os ângulos superior Ω_1 e inferior Ω_2 são então formados pelos i -pontos $X_i = [x_i, y_i]$, como mostrados na Figura. 16a.

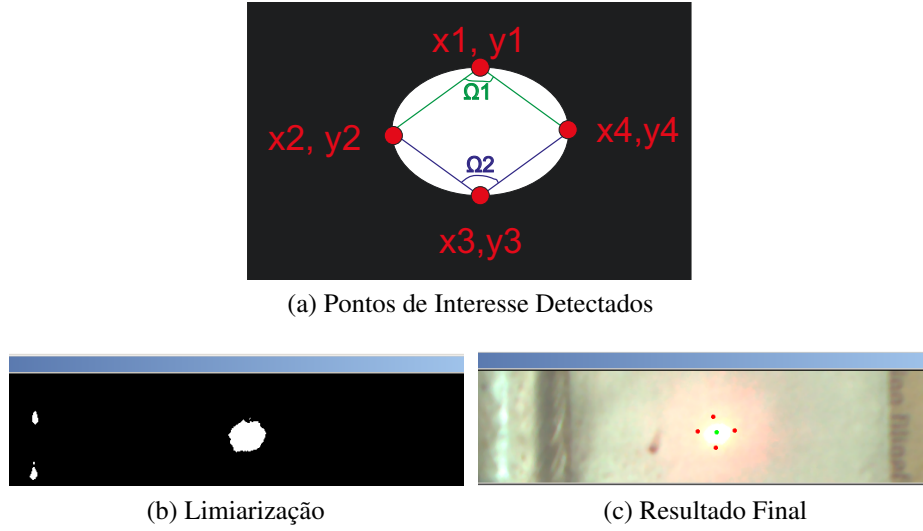


Figura 16: Detecção do centroide do ponto laser utilizando o método proposto por Wu e Yu [37].

Assumindo que $p_1 = x_2 - x_1$, $p_2 = y_2 - y_1$, $q_1 = x_3 - x_1$, $q_2 = y_3 - y_1$, $u_1 = x_2 - x_4$, $u_2 = y_2 - y_4$, $v_1 = x_3 - x_4$ e $v_2 = y_3 - y_4$, os ângulos Ω_1 e Ω_2 podem ser estimados como:

$$\Omega_1 = \cos^{-1} \frac{p_1 \cdot q_1 + p_2 \cdot q_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2} \cdot \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}, \quad (39)$$

$$\Omega_2 = \cos^{-1} \frac{u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}. \quad (40)$$

Se esse ângulo se encontra dentro de uma faixa esperada de valores, significa que é o ponto laser na imagem.

Embora a ideia tenha sido muito eficiente para detectar o ponto laser, a estimação do raio e do centroide propostas por Wu e Yu [37] apresentavam resultados limitados. Logo, os parâmetros de raio médio r e pontos x_c e y_c do formato elipsoide do ponto laser foram estimados como:

$$r = \sqrt{\frac{(x_3 - x_2)^2}{4} + \frac{(y_4 - y_1)^2}{4}}, \quad (41)$$

$$x_c = r \cdot \cos(\tan^{-1}(\frac{y_4 - y_1}{x_3 - x_2})) + x_2 + \frac{(p_1)}{(p_1 - v_1)}, \quad (42)$$

$$y_c = r \cdot \sin(\tan^{-1}(\frac{y_4 - y_1}{x_3 - x_2})) + y_1 + \frac{(p_2)}{(p_2 - v_2)}. \quad (43)$$

As Equações 41,42 e 43 foram importantes para obtenção dos resultados de calibração

dos parâmetros D e α do sistema.

3.7.3 Detecção utilizando Método Misto

Ao avaliar os métodos de detecção do ponto laser por saturação da imagem e com precisão de subpixel, viu-se a possibilidade de implementar um método que abrangeria ambos os métodos descritos. O algoritmo basicamente adota o método de saturação para inicializar um limiar pré-determinado, sendo este ajustado até que o método obtenha uma imagem binarizada possuindo cerca de 10% ou menos de pixels brancos.

Além disso, a regressão do círculo para determinar a localização com precisão de subpixel também é adotada. Facilitando a determinação se o objeto detectado é o ponto laser e seu respectivo centroide. Este método apresenta potencial de maximizar as qualidades de ambos métodos previamente apresentados. Entretanto apresenta um tempo de processamento maior que os outros métodos, como será observado na etapa de avaliação experimental dos resultados.

4 RESULTADOS

Resultados experimentais foram obtidos utilizando uma câmera Basler Ace ac1300 $30\mu\text{c}$, com sensor *CMOS* (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de 1.2 megapixels de resolução, ou seja, 1280×720 pixels. Em cada experimento, foi conduzida a obtenção de 5 imagens em diferentes distâncias aproximadamente equidistantes com 200 passos de motor no eixo rotacional e um deslocamento de aproximadamente 20 mm ao longo do Eixo Z. Os tempos foram obtidos com o sistema rodando em um computador de placa única Odroid-XU4 rodando GNU Linux com processadores Samsung Exynos5422 CortexTM-A15 2Ghz e CortexTM-A7 Octa core. Além disso, tem 2Gbyte LPDDR3 RAM e conexões USB 3.0 e Ethernet gigabit.

Os resultados das calibrações dos valores de D e α foram obtidos de forma que o ângulo α se encontre aproximadamente a 90 graus em relação ao emissor do ponto laser e a distância D a aproximadamente 3.5 cm do centroide do sensor da câmera. Valores de referência obtidos a partir de uma definição inicial do problema.

As tabelas de medições apresentam os dados reais de distância e os resultados das medições baseados nos valores de D e α encontrados para cada método de calibração (Saturação, Subpixel e Misto).

Para realização da calibração de D e α , foram obtidas as medidas dos passos entre as imagens utilizando um relógio comparador *Digimess* com faixa de atuação de 25 mm e resolução de 0,01 mm [8]. A potência do emissor do ponto laser utilizado nos testes é inferior a 5 mW [35]. A distância inicial entre a lente da câmera e o corpo de prova foi medida através de imagem onde foi adicionado um padrão de calibração. Logo, durante processo de calibração descrito na Seção 3.1. A imagem apresentada na Figura 17 é inserida junto às outras imagens capturadas do padrão de calibração. Assim, durante a otimização do processo de calibração nos quais os parâmetros intrínsecos são obtidos, também tem-se interesse no parâmetro extrínseco dessa imagem.

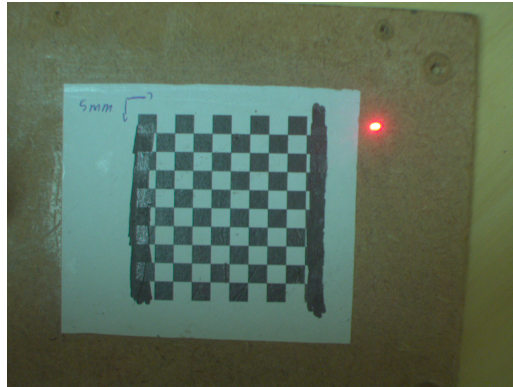


Figura 17: Imagem do padrão de calibração utilizado durante a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera para determinar a distância inicial, posteriormente reduzindo a espessura da chapa da superfície plana no qual está preso o padrão.

Três tipos de experimentos foram realizados. Os dois primeiros tem como foco a estimação dos parâmetros D e α , ou seja, avaliar a capacidade do método de calibração de estimar corretamente os parâmetros. Sendo, o primeiro utilizando um relógio comparador de alta precisão e o segundo, a estimativa do deslocamento da câmera usando o sistema. Por fim, testes para avaliar a capacidade de medição do sistema também foram realizados.

Resultados obtidos anteriormente podem ser visualizados no Apêndice B. Os valores apresentados são muito próximos dos obtidos atualmente neste trabalho, mostrando a potencialidade inicial de medição de distâncias.

4.1 Avaliação da Calibração com Relógio Comparador

Os experimentos mostrados a seguir foram realizados utilizando dois tipos de superfícies de chapas metálicas: fosca e reflexiva. Não foram realizadas medições sobre algum tipo de quantificação do brilho das chapas, apenas a aferição empírica que uma chapa se encontra com a superfície fosca (textura escura, contendo ferrugem, por exemplo) e reflexiva (chapa polida). As medições das distâncias entre cada posição da câmera utilizando relógio comparador fizeram parte da calibração dos parâmetros D e α .

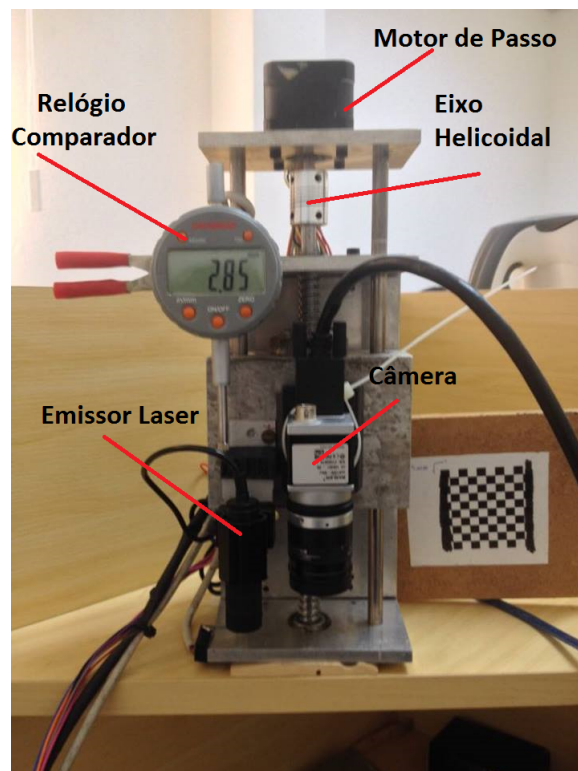


Figura 18: Aparato experimental utilizado para coleta dos dados.

A Figura 18 apresenta a disposição da câmera, no emissor do ponto laser, do motor e do relógio comparador utilizados na estrutura que compõe o aparato experimental utilizado para coleta dos dados, denominado Eixo Z.

4.1.1 Superfície Fosca

Foi utilizada uma chapa metálica de superfície fosca (pouco reflexiva) como mostrado na Figura 19 para realização desse teste. Trata-se de uma chapa de aço naval oxidada com a presença de ferrugem.



Figura 19: Imagem da chapa metálica com superfície fosca utilizado durante a avaliação experimental.

O experimento foi realizado com ângulo α do emissor laser a cerca de 90 graus e uma

distância aproximada D de 3,5 cm do centro ótico do sensor da câmera e posicionado a uma altura inicial H de 26,75 cm.

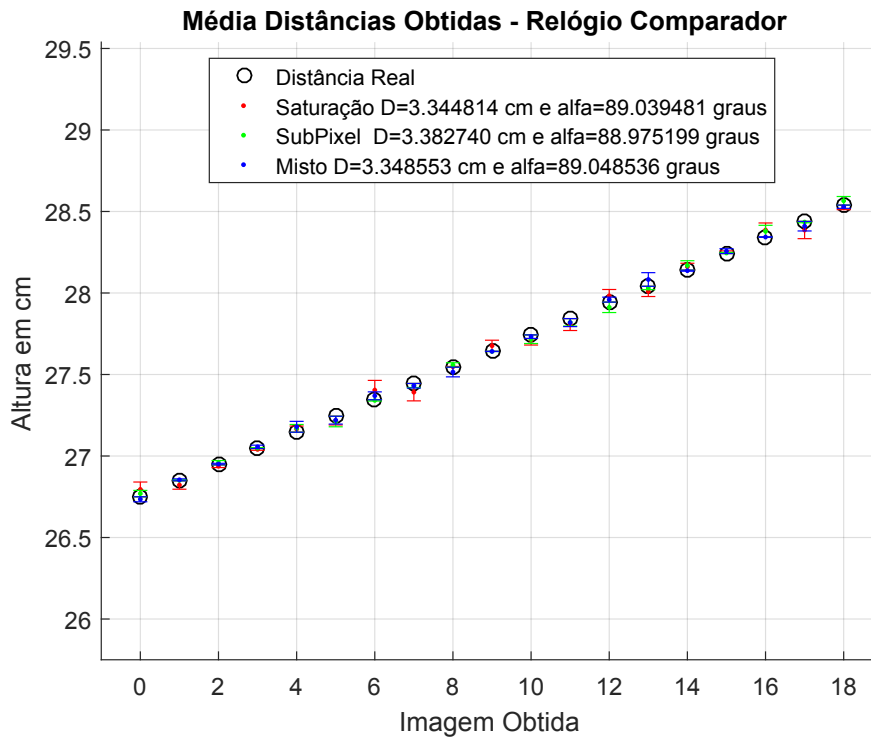


Figura 20: Distâncias obtidas por cada método de detecção de pontos de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando dados do relógio comparador durante a calibração.

A Figura 20 mostra as distâncias obtidas no ensaio na superfície fosca com respectivos D e α obtidos em cada método de detecção do centroide do ponto laser na imagem. Pode-se notar que todos os métodos obtiveram resultados semelhantes.

Tabela 1: Parâmetros estimados D e α obtidos com cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando relógio comparador em uma superfície fosca.

Método	D (cm)	$\hat{\alpha}$ (radianos)
Saturação	3,344814	1,553244
Subpixel	3,382740	1,552123
Misto	3,348553	1,553402

Os resultados obtidos da calibração de D e α podem ser analisados na Tabela 1. Utilizando esses resultados, foi então gerado os resultados das medições das distâncias referente a cada método de detecção do ponto laser.

Tabela 2: Medições obtidas com parâmetros D e α para cada método de detecção do ponto laser na superfície fosca em centímetros (cm).

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,750	26,795	26,769	26,734
26,848	26,822	26,851	26,853
26,946	26,937	26,959	26,950
27,046	27,040	27,048	27,056
27,146	27,164	27,169	27,179
27,244	27,217	27,211	27,219
27,345	27,404	27,341	27,369
27,445	27,391	27,432	27,430
27,545	27,547	27,558	27,515
27,642	27,676	27,641	27,641
27,743	27,711	27,716	27,732
27,843	27,806	27,820	27,818
27,944	27,982	27,912	27,959
28,041	28,009	28,030	28,082
28,140	28,161	28,168	28,136
28,242	28,250	28,245	28,256
28,342	28,385	28,378	28,343
28,439	28,386	28,434	28,409
28,539	28,525	28,565	28,529

A Tabela 2 apresenta o resultados detalhados das medições realizadas referentes a cada um dos métodos de detecção do ponto laser.

Tabela 3: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão na superfície fosca.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,029	0,009
Subpixel	0,016	0,004
Misto	0,016	0,006

Com os resultados das medições, é então observado o erro médio e o desvio padrão do erro de distâncias para cada um dos métodos de detecção analisados na Tabela 3.

Tabela 4: Tempo médio de execução para cada método de detecção na superfície fosca.

Método	Tempo médio (ms)
Saturação	53,24
Subpixel	85,09
Misto	103,33

Como é possível analisar, o método misto de detecção obteve a maior precisão na

detecção, enquanto o método de detecção com precisão de subpixel possui o menor desvio padrão com erros médios muito similares. Mesmo o método de saturação tem um erro médio de $0,2mm$ com desvio padrão muito reduzido. Além disso, a pior medição com o pior método tem erro menor que $0,6mm$.

Na Tabela 4 é apresentado os resultados do tempo de execução de cada método de detecção do ponto laser. A tabela demonstra que o método de detecção por saturação obteve o menor tempo de processamento, sendo o método com precisão de subpixel o segundo menor tempo. O método misto, apesar de ser aparentemente mais preciso, é mais lento para executar. Entretanto, mesmo o método mais lento seria possível obter uma amostragem de $\approx 10Hz$.

4.1.2 Superfície Reflexiva

Foi utilizada uma chapa metálica de superfície reflexiva como mostrado na Figura 21 para realização desse teste. Trata-se de uma superfície polida, em estado similar a encontrada durante uma atividade de soldagem.

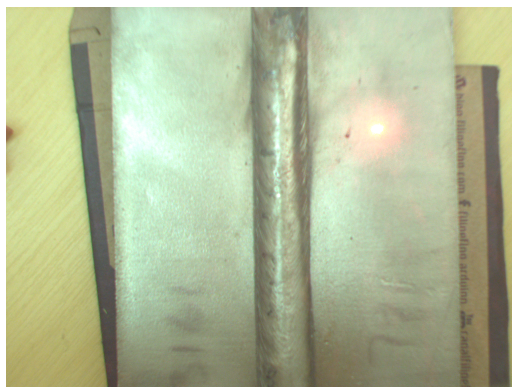


Figura 21: Imagem da chapa metálica de superfície reflexiva.

O experimento também foi realizado com ângulo α do emissor laser a aproximadamente 90 graus e uma distância aproximada D de $3,5cm$ do centro ótico do sensor da câmera e posicionado a uma altura inicial H de $26,72cm$.

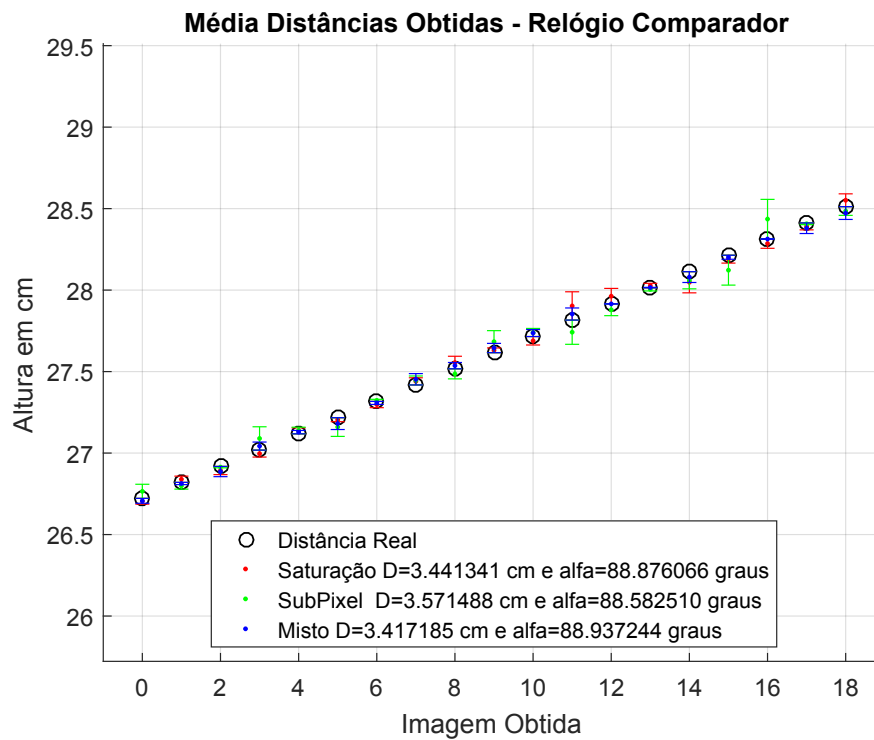


Figura 22: Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva utilizando método de calibração baseada no relógio comparador.

Ao observar as medições realizadas na Figura 22, os resultados obtidos em cada método foram similares novamente. Embora, com o desvio padrão um pouco maior. Porém, nunca superando meio centímetro.

O resultado da calibração dos parâmetros D e α são observados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros estimados D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser em superfície reflexiva com base no método de calibração usando relógio comparador.

Método	D (cm)	$\hat{\alpha}$ (radianos)
Saturação	3,441341	1,550394
Subpixel	3,571488	1,545273
Misto	3,417185	1,551461

Tabela 6: Medições obtidas através dos parâmetros D e α encontrados por cada método de detecção do ponto laser na superfície reflexiva.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,722	26,704	26,765	26,707
26,820	26,839	26,799	26,813
26,918	26,892	26,913	26,886
27,018	26,996	27,089	27,042
27,118	27,136	27,138	27,128
27,217	27,204	27,159	27,180
27,317	27,297	27,323	27,307
27,418	27,439	27,445	27,452
27,517	27,555	27,486	27,536
27,616	27,630	27,683	27,644
27,715	27,689	27,739	27,736
27,816	27,902	27,741	27,853
27,915	27,962	27,879	27,915
28,014	28,027	28,004	28,015
28,113	28,048	28,060	28,079
28,214	28,189	28,122	28,201
28,315	28,285	28,435	28,313
28,412	28,390	28,406	28,379
28,512	28,551	28,485	28,472

Com os resultados das medições da Tabela 6, é então observado o erro médio e o desvio padrão do erro em distância encontrados para cada um dos métodos de detecção analisados na Tabela 7.

Tabela 7: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão na superfície reflexiva.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,029	0,017
Subpixel	0,041	0,039
Misto	0,020	0,014

Tabela 8: Tempo médio para execução de cada método de detecção em superfície reflexiva.

Método	Tempo médio (<i>ms</i>)
Saturação	110,38
Subpixel	138,96
Misto	206,06

Novamente, o método misto de detecção obteve a maior precisão na detecção, enquanto o método de detecção com precisão de subpixel possui o menor desvio padrão. De qualquer

modo, os erros médios foram inferiores a $0,5mm$ para todos os métodos

A Tabela 8 mostra os resultados em termos de tempo de execução de cada método de detecção do ponto laser. Observa-se que o método de detecção por saturação obteve o menor tempo de processamento novamente, sendo o método com precisão de subpixel o segundo menor tempo. O método misto, como esperado, tem um tempo maior mas com uma melhor estimativa.

4.2 Avaliação da Calibração Baseada em Estimativa de Deslocamento da Câmera

Os experimentos mostrados a seguir foram realizados com a mesma metodologia descrita anteriormente, ou seja, dois tipos de superfícies metálicas e os três métodos de detecção do ponto laser. Medições quantitativas do brilho da chapa não foram realizadas. Entretanto, na calibração dos parâmetros D e α não foram utilizadas as medições das distâncias entre cada posição da câmera obtidas com relógio comparador. Esse foi utilizado apenas para obter os valores de referência para a comparação. Por outro lado, foi utilizado o método descrito na Seção 3.4, que utiliza o número de passos do motor e a correção da estimativa pelo sistema de visão. Para o filtro de Kalman, foi utilizada a abordagem clássica, com as matrizes A, B, R e H sendo matrizes identidade e os parâmetros de deslocamento do estado ΔX como $1,4284$ pixel e variância σ de $0,1768$ pixel.

4.2.1 Superfície Reflexiva

O experimento foi realizado com os mesmos ângulos de α do emissor laser de 90 graus e uma distância aproximada D de $3,5cm$ do centro ótico do sensor da câmera e posicionado a uma altura inicial H de $26,72cm$.

Tabela 9: Parâmetros estimados D e α usando cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera em superfície reflexiva.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,574930	1,545557
Subpixel	3,850652	1,534690
Misto	3,401242	1,552196

Os resultados obtidos da calibração de D e α podem ser analisados na Tabela 9. Utilizando esses resultados, são feitas as medições das distâncias referente a cada método de detecção do ponto laser.

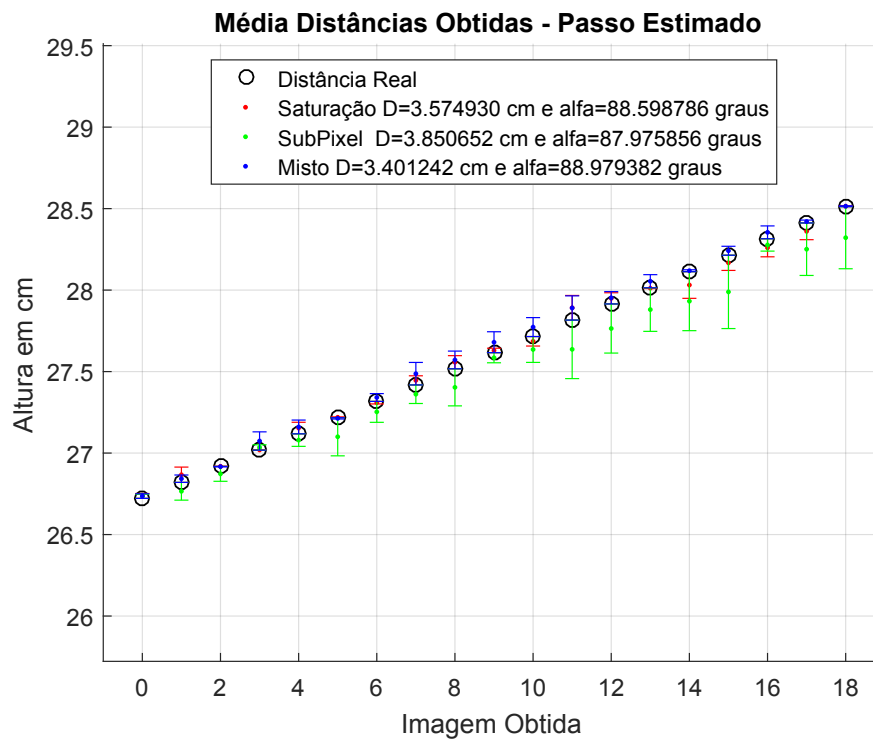


Figura 23: Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera.

A Figura 23 mostra as distâncias obtidas no ensaio em superfície reflexiva com os respectivos D e α obtidos em cada método de detecção do centroide do ponto laser na imagem utilizando o método alternativo de estimação das distâncias entre as imagens. Pode-se notar que os desvios padrões foram maiores, principalmente para o método **subpixel** que teve dificuldade na estimativa correta do parâmetro D .

Tabela 10: Estimativas de distância em centímetros (cm) obtidas usando o modelo com parâmetros D e α estimados com método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,722	26,736	26,734	26,736
26,820	26,866	26,765	26,842
26,918	26,918	26,872	26,916
27,018	27,018	27,034	27,074
27,118	27,153	27,079	27,160
27,217	27,219	27,100	27,213
27,317	27,309	27,252	27,340
27,418	27,446	27,361	27,487
27,517	27,557	27,403	27,571
27,616	27,629	27,585	27,680
27,715	27,685	27,635	27,773
27,816	27,891	27,636	27,890
27,915	27,949	27,764	27,952
28,014	28,011	27,880	28,054
28,113	28,031	27,932	28,118
28,214	28,167	27,988	28,241
28,315	28,259	28,277	28,354
28,412	28,360	28,250	28,420
28,512	28,514	28,321	28,514

A Tabela 10 apresenta o resultado das medições realizadas referentes a cada um dos métodos de detecção do ponto laser. Pode-se notar que os erros são ligeiramente maiores, principalmente para o método **subpixel**. O erro médio e o desvio padrão do erro de distância são mostrados na Tabela 11. Os erros, como esperados, são maiores que anteriormente para o método de subpixel, enquanto para os outros métodos tem-se erros médios menores que $0,35mm$.

Tabela 11: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva usando a estimativa de deslocamento da câmera.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,030	0,022
Subpixel	0,099	0,072
Misto	0,034	0,018

Após a análise dos resultados mostrados usando a calibração sem relógio comparador, pode-se compará-los com os resultados obtidos após a correção realizada por meio de filtragem com o Filtro de Kalman [16]. Os resultados do método de calibração encontrados para D e α são mostrados na Tabela 12. Pode-se observar que os parâmetros são menores do que os obtidos na Tabela 9. O método **misto** obteve valores semelhantes. A Figura 24

mostra as distâncias obtidas, no qual é possível ver que os desvios padrões foram reduzidos todos métodos obtendo boas estimativas médias.

Tabela 12: Parâmetros estimados D e α obtidos para cada método com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,460088	1,550707
Subpixel	3,626306	1,544136
Misto	3,408893	1,552640

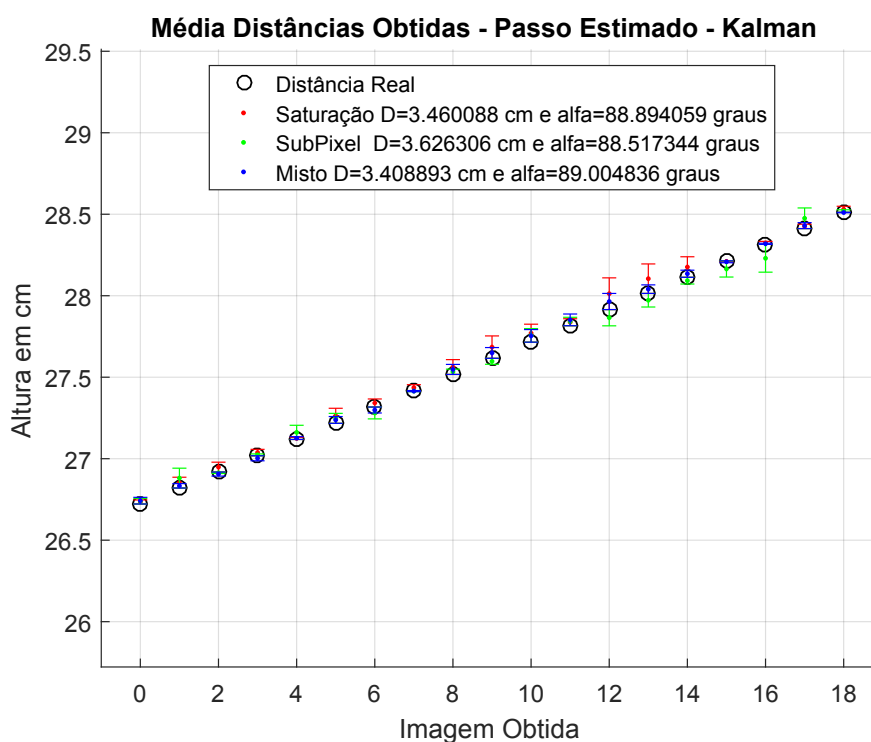


Figura 24: Distâncias obtidas em uma superfície metálica com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.

As estimativas de distâncias obtidas com base nos valores de D e α utilizando um filtro de Kalman são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros D e α determinados usando a estimativa de deslocamento da câmera com filtro de Kalman.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,722	26,734	26,739	26,742
26,820	26,853	26,880	26,833
26,918	26,948	26,913	26,905
27,018	27,037	27,023	27,002
27,118	27,124	27,161	27,126
27,217	27,263	27,247	27,237
27,317	27,341	27,280	27,298
27,418	27,436	27,414	27,414
27,517	27,562	27,533	27,547
27,616	27,684	27,597	27,648
27,715	27,770	27,756	27,753
27,816	27,837	27,841	27,851
27,915	28,012	27,865	27,964
28,014	28,104	27,972	28,040
28,113	28,176	28,092	28,134
28,214	28,210	28,164	28,208
28,315	28,324	28,229	28,318
28,412	28,425	28,475	28,430
28,512	28,530	28,519	28,510

O erro médio e o desvio padrão médio encontrado para os resultados das medições resultantes calibração dos parâmetros D e α utilizando filtro de Kalman para ajuste do centroide do ponto laser detectado são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva usando Filtro de Kalman.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,035	0,018
Subpixel	0,032	0,029
Misto	0,019	0,018

Com base nos dados obtidos, a utilização do filtro de Kalman para realizar a calibração dos parâmetros D e α apresentou melhora significativa no método de subpixel e também misto, enquanto o método de saturação se comportou ligeiramente pior. Os desvios padrões do erro de distância também foram reduzidos.

4.2.2 Superfície Fosca

A avaliação em superfície fosca foi realizado com a mesma configuração teórica: ângulo α do emissor laser de 90 graus e uma distância aproximada D de 3,5 cm do centro

ótico do sensor da câmera. A câmera posicionada uma altura H de $26,75\text{cm}$ da chapa metálica.

Tabela 15: Parâmetros estimados D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera em uma superfície fosca.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,325137	1,553837
Subpixel	3,410317	1,551094
Misto	3,394803	1,551845

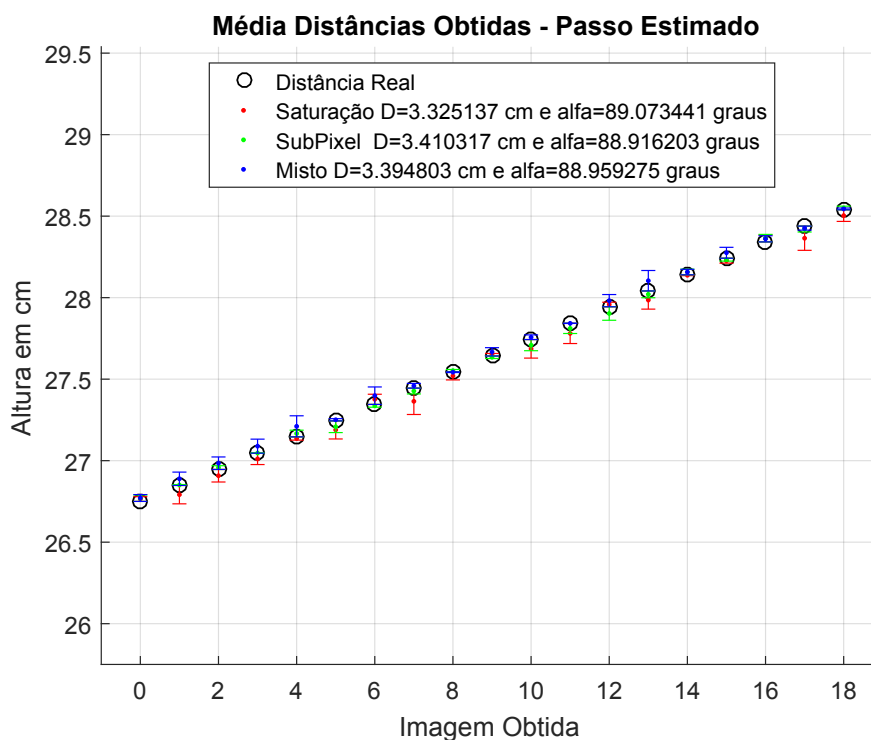


Figura 25: Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento.

As medições realizadas utilizando método baseado em estimativas de distância com filtro de Kalman são mostradas na Tabela 16. Com base nos valores de D e α obtidos da calibração correspondente a cada método de detecção do ponto laser na Tabela 15.

Tabela 16: Estimativa de distâncias em centímetros (cm) obtidas com parâmetros D e α estimados em imagens uma superfície fosca.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,750	26,764	26,769	26,770
26,848	26,791	26,850	26,888
26,946	26,907	26,957	26,984
27,046	27,011	27,046	27,089
27,146	27,136	27,166	27,210
27,244	27,188	27,208	27,250
27,345	27,376	27,336	27,398
27,445	27,364	27,427	27,459
27,545	27,520	27,552	27,542
27,642	27,649	27,634	27,667
27,743	27,686	27,708	27,757
27,843	27,780	27,811	27,842
27,944	27,957	27,902	27,981
28,041	27,985	28,020	28,103
28,140	28,137	28,157	28,156
28,242	28,226	28,233	28,275
28,342	28,363	28,364	28,360
28,439	28,364	28,420	28,426
28,539	28,503	28,550	28,544

Os resultados de distância utilizando o método de calibração são apresentados na Tabela 16. Os erros médios e desvio padrão médio também são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Erro médio de distância e seu respectivo desvio padrão em superfície fosca.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,036	0,035
Subpixel	0,017	0,007
Misto	0,026	0,008

O mesmo experimento foi realizado também com filtro de Kalman para melhorar a estimativa do ponto laser.

Tabela 18: Parâmetros estimados D e α obtidos usando cada método de detecção com filtro de Kalman calibrados usando a estimativa de deslocamento da câmera em superfície fosca.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,521325	1,548022
Subpixel	3,604068	1,545179
Misto	3,518061	1,548372

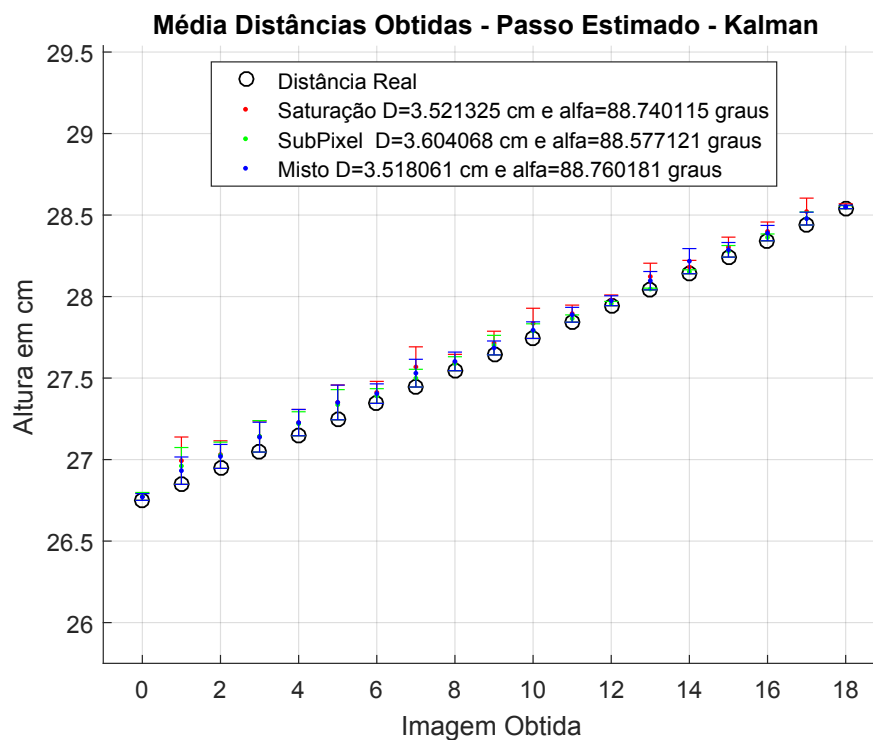


Figura 26: Distâncias obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica fosca com base no método de calibração usando a estimativa de deslocamento da câmera com Filtro de Kalman.

Baseado nos parâmetros D e α são obtidos os resultados de estimação de distância correspondentes à cada posição da câmera na Tabela 19. A Figura 26 mostra os valores médios piores que sem a filtragem. Além disso, os desvios padrões também aumentaram. A Tabela 20 corrobora com essa análise.

Tabela 19: Estimação de distância em centímetros (*cm*) obtidas usando parâmetros D e α obtidos por cada método de detecção do ponto laser em superfície fosca com filtro de Kalman.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
26,750	26,772	26,774	26,770
26,848	26,993	26,960	26,931
26,946	27,030	27,026	27,019
27,046	27,141	27,142	27,137
27,146	27,226	27,219	27,226
27,244	27,350	27,336	27,350
27,345	27,412	27,389	27,404
27,445	27,568	27,499	27,530
27,545	27,595	27,587	27,602
27,642	27,714	27,702	27,684
27,743	27,835	27,787	27,793
27,843	27,895	27,865	27,888
27,944	27,976	27,957	27,974
28,041	28,122	28,046	28,097
28,140	28,181	28,152	28,217
28,242	28,303	28,277	28,286
28,342	28,399	28,362	28,389
28,439	28,521	28,478	28,478
28,539	28,554	28,548	28,549

Tabela 20: Erro médio de distância e seu respectivo desvio padrão em superfície fosca com filtro de Kalman.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,071	0,018
Subpixel	0,046	0,005
Misto	0,058	0,008

4.3 Avaliação da Repetibilidade

Este experimento foi realizado com variações de posição no eixo Z , entre dois pontos de aproximadamente $10mm$ entre cada posição das imagens obtidas. Tal situação seria um caso extremo de uso do sistema de percepção baseado em laser e câmera.

Os valores de calibração D e α para essa avaliação foram refeitos novamente tanto usando relógio comparador quanto o método de estimativa de distâncias, devido à essa avaliação ter ocorrido em momento distinto. Assim, pequenas alterações ocorreram como movimento da câmera e do laser.

4.3.1 Calibração do Sistema usando Relógio Comparador

Foi feita a utilização de uma chapa metálica de superfície reflexiva como mostrado na Figura 27 para a avaliação do método. Tal chapa se justifica pois para aplicações práticas de soldagem, a superfície precisa está livre de impurezas o que torna ela altamente reflexiva.

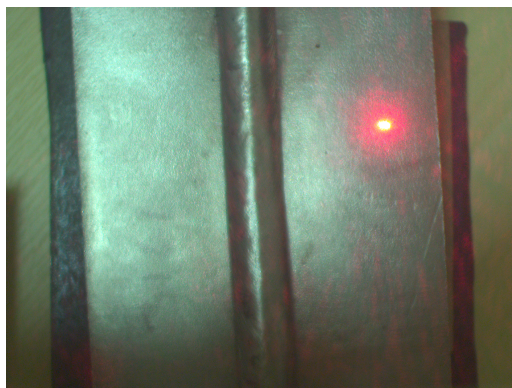


Figura 27: Imagem da chapa metálica de superfície Reflexiva utilizada durante os experimentos.

Os ângulo α de aproximadamente 90 graus e uma distância aproximada D de 3,5cm do centro ótico do sensor foram mantidos. A altura inicial foi estimada em H de 23,93cm da chapa metálica. Este teste é o ensaio realizado para determinar os valores de D e α para serem usados no teste de repetibilidade e confiança do método de calibração.

Tabela 21: Parâmetros estimados D e α com base no método de calibração usando relógio comparador em superfície reflexiva.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,224665	1,558683
Subpixel	3,234403	1,558353
Misto	3,264725	1,557204

Os resultados de estimativa de D e α são apresentados na Tabela 21. Baseados nesses parâmetros, as distâncias para cada medida são apresentadas na Tabela 22.

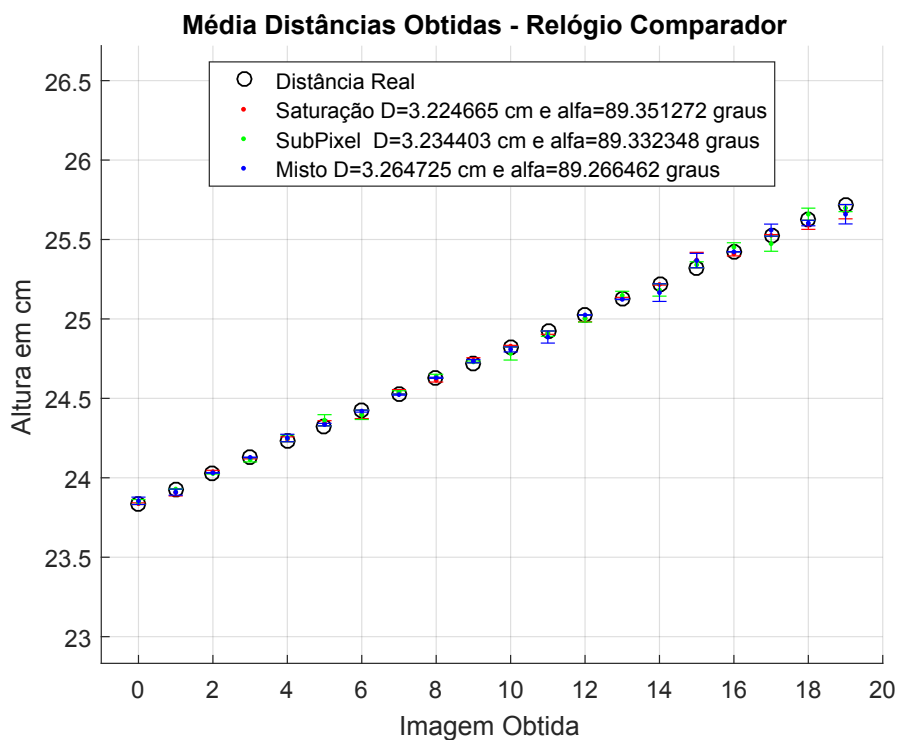


Figura 28: Estimativas médias de distância obtidas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando relógio comparador.

Os resultados das medições realizadas são apresentados na Figura 28. Pode-se observar o baixo desvio padrão e que todos os métodos estimam corretamente os parâmetros que permitem obter boas estimativas de distância.

Como os resultados possuem valores muito próximos visualmente, as medições foram descritas detalhadamente nas tabelas à seguir.

A Tabela 22 apresenta os valores de distância e os resultados das calibrações dos valores de D e α baseado nos resultados de detecção do centroide do ponto laser.

Tabela 22: Estimativas de distância em centímetros (cm) obtidas com parâmetros D e α calibrados com relógio comparador em superfície reflexiva.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,934	23,939	23,949	23,957
24,031	24,009	24,030	24,011
24,131	24,140	24,128	24,133
24,229	24,225	24,215	24,230
24,329	24,344	24,350	24,352
24,429	24,445	24,464	24,436
24,528	24,501	24,498	24,521
24,629	24,643	24,639	24,625
24,728	24,716	24,740	24,731
24,826	24,841	24,831	24,836
24,926	24,930	24,884	24,910
25,026	25,015	25,009	24,988
25,127	25,105	25,104	25,126
25,224	25,230	25,250	25,225
25,323	25,318	25,284	25,267
25,424	25,472	25,442	25,469
25,525	25,511	25,553	25,524
25,623	25,627	25,575	25,660
25,723	25,694	25,761	25,705
25,822	25,776	25,799	25,760

Baseado nos resultados da Tabela 22, pode-se determinar o erro médio de estimação de distância e o respectivo desvio padrão na Tabela 23.

Tabela 23: Erro médio de distância e desvio padrão baseado na calibração por relógio comparador em superfície reflexiva.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,016	0,009
Subpixel	0,022	0,016
Misto	0,018	0,013

Também foi realizada a medição do tempo de execução que cada algoritmo de detecção do ponto laser utilizou para realizar o processamento descrito na Tabela 24.

Tabela 24: Tempo médio para execução de cada método de detecção em superfície reflexiva.

Método	Tempo médio (ms)
Saturação	76,38
Subpixel	72,14
Misto	123,62

O Método de Saturação obteve a menor média do erro de distância bem como um menor desvio padrão. Porém o método misto e de subpixel obtiveram bons resultados com erros médios menores que $0.3mm$. A Tabela 24 mostra os resultados do tempo de execução de cada método de detecção do ponto laser. Observa-se que o método de detecção Subpixel obteve o menor tempo de processamento. O método misto, como esperado, obteve o maior tempo de execução.

4.3.2 Repetibilidade com Calibração Baseada em Relógio Comparador

Os parâmetros D e α descritos na Tabela 21 com calibração descrita na seção anterior. A Figura 29 mostra a estimativa de distâncias. Pode-se notar que mesmo em uma situação limite com a distância alterando $10mm$ entre imagens, o método proposto foi capaz de, com baixo desvio padrão, estimar os valores de distância. A Tabela 25 detalha as estimativas obtidas. Pode-se notar também os erros médios e os desvios na Tabela 26 são semelhantes com uma pequena vantagem para o método de saturação.

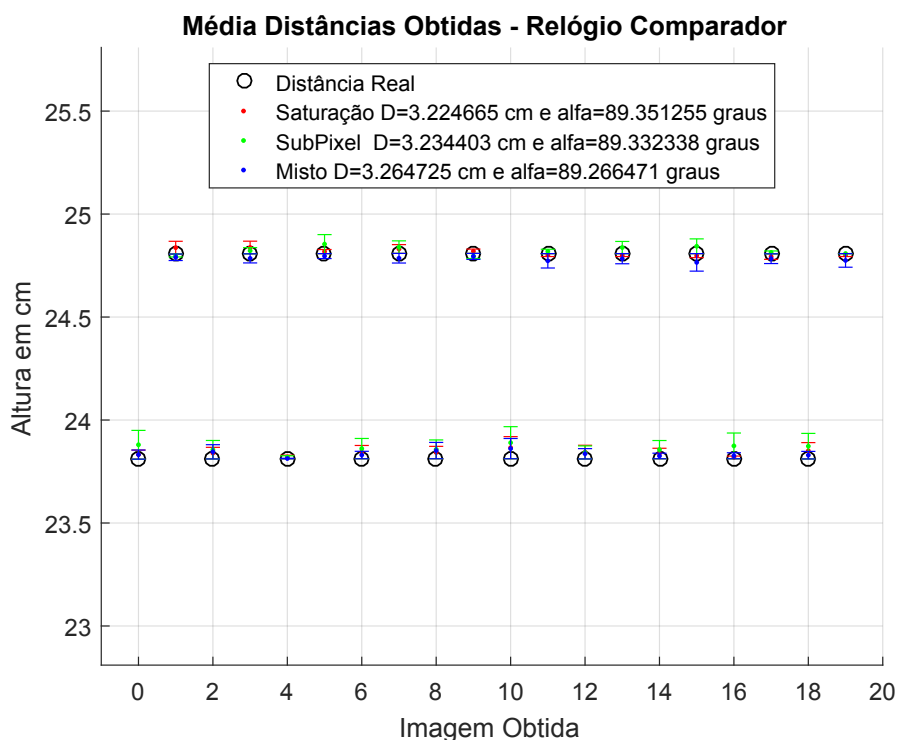


Figura 29: Distâncias obtidas usando cada um dos métodos de calibração baseado em relógio comparador em teste de repetibilidade variando $10mm$ entre imagens.

Tabela 25: Estimativas de distância em centímetros (cm) baseadas nos parâmetros D e α para o teste de repetibilidade variando $10mm$ entre imagens.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,810	23,832	23,879	23,832
24,806	24,836	24,798	24,790
23,811	23,839	23,855	23,845
24,807	24,837	24,822	24,784
23,812	23,820	23,819	23,813
24,808	24,817	24,854	24,795
23,812	23,844	23,861	23,830
24,809	24,830	24,839	24,785
23,812	23,842	23,857	23,851
24,809	24,819	24,796	24,794
23,812	23,865	23,889	23,861
24,808	24,800	24,818	24,773
23,811	23,844	23,842	23,836
24,808	24,800	24,837	24,783
23,812	23,837	23,856	23,825
24,808	24,798	24,843	24,765
23,812	23,818	23,874	23,826
24,807	24,793	24,813	24,783
23,811	23,850	23,873	23,829
24,808	24,800	24,808	24,774

Tabela 26: Erro médio e desvio padrão da estimativa de distâncias no teste de repetibilidade com calibração usando relógio comparador.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,021	0,011
Subpixel	0,034	0,017
Misto	0,024	0,012

4.3.3 Calibração do Sistema usando Estimativa de Distâncias

Os resultados de calibração para o teste de repetibilidade usando estimativa de distância, ao invés de relógio comparador para calibração, são também realizados em superfícies reflexivas. Similarmente ao caso anterior, o sistema foi colocado na mesma configuração.

A Tabela 27 apresenta os parâmetros D e α estimados. Pode-se notar que ocorre uma pequena variação em relação aos parâmetros estimados na Tabela 21, com relógio comparador.

Tabela 27: Parâmetros estimados D e α obtidos por cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de distância da câmera em superfície reflexiva.

Método	D (cm)	$\hat{\text{Ângulo}}$ (radianos)
Saturação	3,148765	1,561933
Subpixel	3,191199	1,560208
Misto	3,132936	1,562697

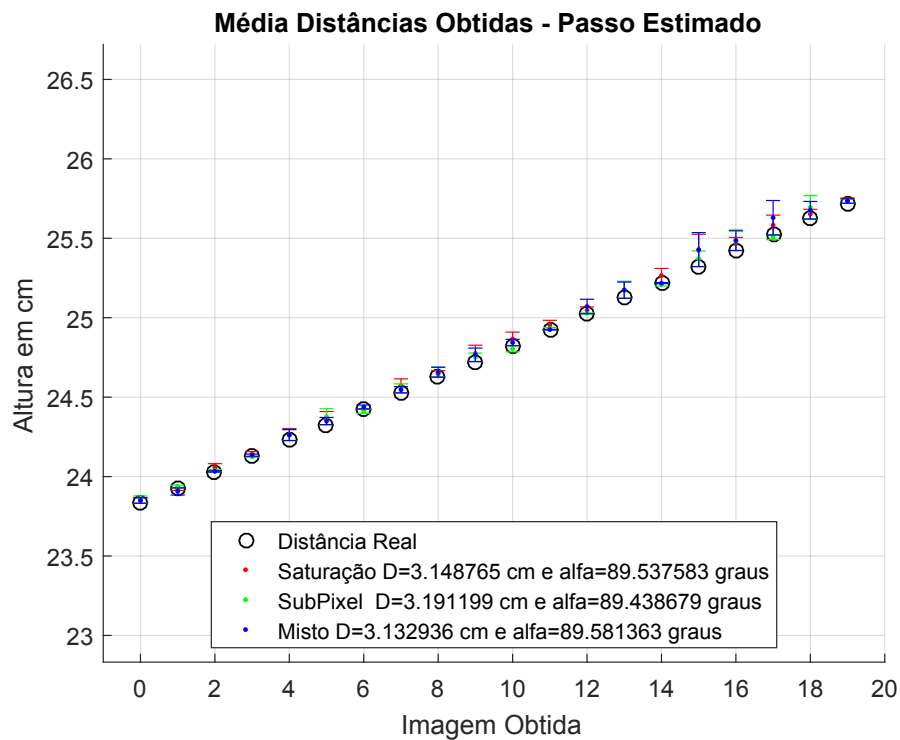


Figura 30: Distâncias estimadas por cada método de detecção de ponto de laser iluminando uma superfície metálica reflexiva com base no método de calibração usando a estimativa de distância.

Tabela 28: Medições obtidas através de D e α encontrados em cada método de detecção do ponto laser no Teste Geral Chapa Reflexiva.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,832	23,849	23,855	23,849
23,929	23,921	23,937	23,906
24,029	24,055	24,036	24,032
24,127	24,142	24,124	24,134
24,227	24,264	24,261	24,261
24,327	24,368	24,377	24,349
24,426	24,425	24,411	24,438
24,527	24,571	24,555	24,546
24,626	24,646	24,657	24,656
24,724	24,775	24,750	24,766
24,824	24,866	24,804	24,843
24,924	24,953	24,930	24,925
25,025	25,046	25,027	25,070
25,122	25,175	25,175	25,173
25,221	25,265	25,210	25,217
25,322	25,423	25,371	25,428
25,423	25,463	25,483	25,486
25,521	25,583	25,506	25,629
25,621	25,651	25,694	25,676
25,720	25,736	25,733	25,734

Tabela 29: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão em superfície reflexiva.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,035	0,012
Subpixel	0,026	0,025
Misto	0,034	0,016

Na Tabela 29 os erros médios são apresentados. Embora maiores que obtidos utilizando relógio comparador, eles ainda são limitados com erros médios de $\approx 0,35mm$. Método subpixel obteve valores menores que os outros métodos nesse caso.

Após a estimação com base no método de estimativa de deslocamento da câmera, foi realizado o teste utilizando também o filtro de Kalman. A Tabela 30 apresenta os parâmetros estimado, pode-se notar que os parâmetros D e α apresentaram valores maiores do que na Tabela 27, onde o filtro não foi utilizado.

A Figura 31 mostra que mesmo com essa diferença na estimação dos parâmetros, as distâncias médias estimadas ainda está dentro de uma faixa tolerável, com erros pequenos como podem ser vistos na Tabela 32 e detalhado na Tabela 31. Os resultados ficaram

similares, porém com erros médios ligeiramente maiores em relação a não utilização do filtro de Kalman.

Tabela 30: Parâmetros estimados para D e α obtidos de cada método de detecção de pontos de laser com base no método de calibração usando a estimativa de distância com filtro de Kalman.

Método	D (cm)	Ângulo (radianos)
Saturação	3,068955	1,565811
Subpixel	3,149619	1,562562
Misto	3,109727	1,564235

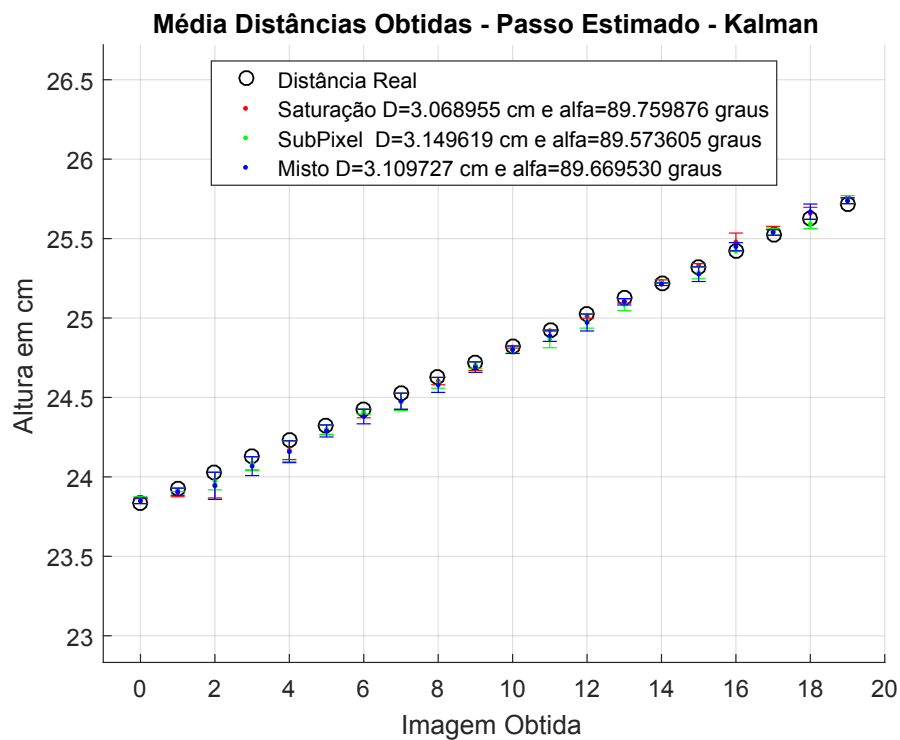


Figura 31: Distâncias obtidas com base na calibração usando a estimativa de distâncias com uso de filtro de Kalman.

Tabela 31: Estimativa de distâncias em centímetros (cm) obtida por cada método de detecção do ponto laser no com filtro de Kalman em superfície reflexiva.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,832	23,847	23,853	23,849
23,929	23,902	23,917	23,906
24,029	23,948	23,973	23,943
24,127	24,084	24,083	24,067
24,227	24,168	24,162	24,158
24,327	24,296	24,297	24,289
24,426	24,398	24,410	24,379
24,527	24,475	24,472	24,476
24,626	24,602	24,592	24,578
24,724	24,696	24,704	24,690
24,824	24,817	24,801	24,800
24,924	24,920	24,868	24,888
25,025	25,012	24,980	24,971
25,122	25,107	25,084	25,101
25,221	25,230	25,222	25,212
25,322	25,332	25,284	25,275
25,423	25,478	25,421	25,448
25,521	25,548	25,543	25,538
25,621	25,658	25,591	25,669
25,720	25,739	25,745	25,737

Tabela 32: Erro médio da estimativa da distância e seu respectivo desvio padrão com filtro de Kalman durante calibração usando estimativa de distâncias.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,029	0,018
Subpixel	0,031	0,024
Misto	0,038	0,018

4.3.4 Repetibilidade com Calibração Baseada em Estimativa de Distâncias

Os parâmetros D e α descritos na Tabela 27 com calibração descrita na seção anterior. A Figura 32 mostra a estimação de distâncias. Pode-se notar que mesmo em uma situação limite com a distância alterando $10mm$ entre imagens, o método proposto foi capaz de estimar os valores de distância embora com um desvio padrão maior que com a calibração com relógio comparador, como esperado. A Tabela 33 detalha as estimativas obtidas. Pode-se notar também os erros médios e os desvios na Tabela 26 são também maiores, porém com o método misto conseguindo um erro médio de $0,15mm$ com baixo desvio padrão. Entretanto, os outros métodos obtiveram valores em torno de $0.045mm$.

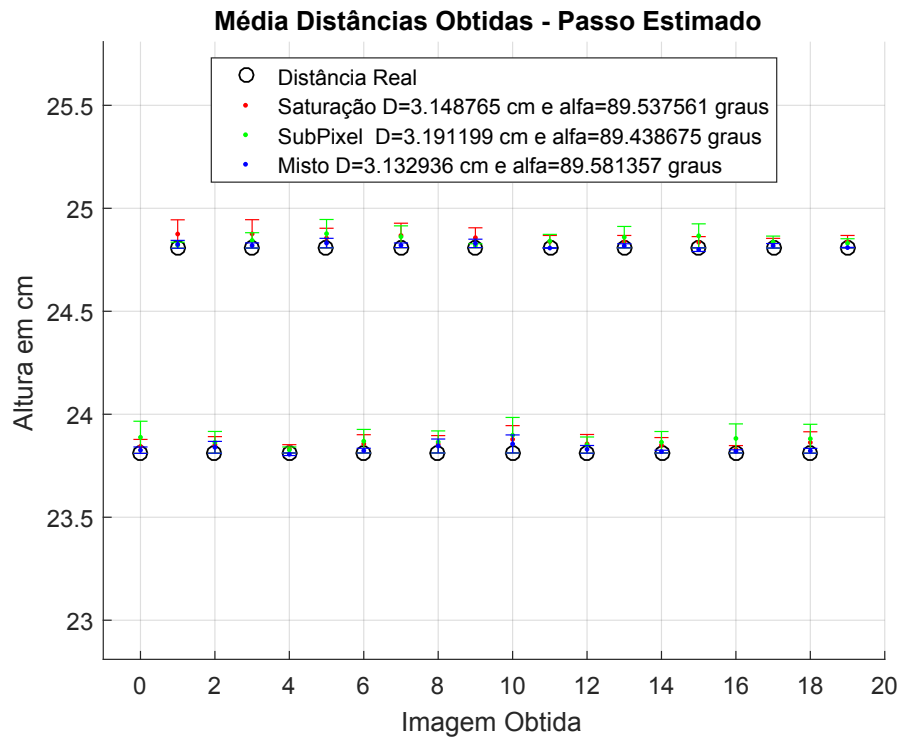


Figura 32: Distâncias estimadas utilizando os diversos métodos de detecção do ponto laser calibrados usando a estimativa de distância da câmera em teste de repetibilidade.

Tabela 33: Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros de D e α estimados usando calibração por estimativa de distância em teste de repetibilidade.

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,810	23,843	23,888	23,825
24,806	24,875	24,820	24,825
23,811	23,851	23,863	23,839
24,807	24,875	24,844	24,819
23,812	23,832	23,826	23,805
24,808	24,855	24,876	24,831
23,812	23,856	23,869	23,823
24,809	24,868	24,861	24,820
23,812	23,854	23,865	23,845
24,809	24,857	24,818	24,829
23,812	23,878	23,898	23,855
24,808	24,838	24,840	24,807
23,811	23,856	23,850	23,829
24,808	24,838	24,859	24,817
23,812	23,849	23,864	23,818
24,808	24,835	24,866	24,799
23,812	23,829	23,882	23,819
24,807	24,830	24,836	24,817
23,811	23,862	23,881	23,822
24,808	24,838	24,830	24,809

Tabela 34: Erro médio e desvio padrão do erro estimados usando calibração baseada em estimativa de distância da câmera no teste de repetibilidade.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,041	0,011
Subpixel	0,047	0,018
Misto	0,015	0,012

4.3.5 Repetibilidade com Calibração Baseada em Estimativa de Distâncias e Filtro de Kalman

Essa seção apresenta resultados obtidos de maneira similar a seção anterior porém utilizando além da estimativa de distância também o filtro de Kalman. Os parâmetros D e α descritos na Tabela 30 com calibração descrita na seção anterior. A Figura 33 mostra a estimação de distâncias. Pode-se notar nenhum dos métodos propostos obteve bons resultados, tendo uma perda significativa de desempenho. A Tabela 35 detalha as estimativas obtidas. Pode-se notar que os erros médios na Tabela 36 são maiores que $1.2mm$ sendo, portanto, maiores que obtidos anteriormente. Devido ao deslocamento repentino realizado nesse teste, o filtro teve uma função de suavizar a variação visto que o modelo utilizado prevê o ponto laser não iria desviar do valor anterior. Tal fato limita a

estimativa do centroide do ponto laser, prejudicando bastante a estimacão. Ainda assim, o melhor resultado foi apresentado pelo método misto.

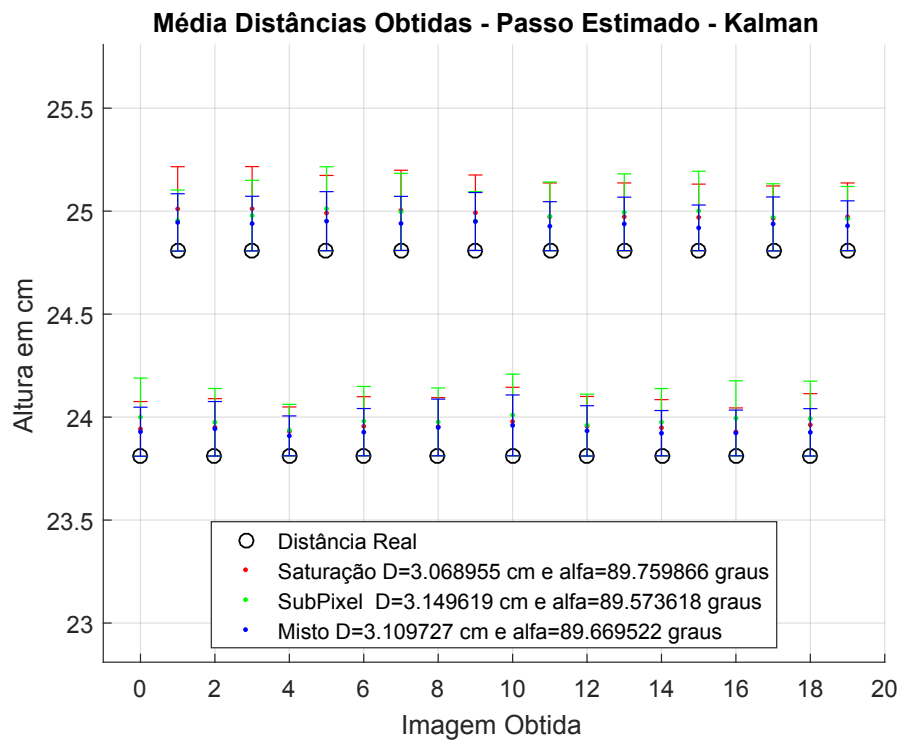


Figura 33: Distâncias estimadas utilizando os diversos métodos de deteco do ponto laser calibrados usando a estimativa de distância da câmera em teste de repetibilidade com filtragem de Kalman.

Tabela 35: Estimativas de distâncias obtidas com parâmetros de D e α estimados usando calibração por estimativa de distância e filtro de Kalman em teste de repetibilidade .

Real	Saturação	Subpixel	Misto
23,810	23,942	23,999	23,929
24,806	25,010	24,954	24,945
23,811	23,950	23,974	23,943
24,807	25,011	24,978	24,939
23,812	23,930	23,936	23,908
24,808	24,990	25,011	24,951
23,812	23,955	23,980	23,926
24,809	25,003	24,996	24,940
23,812	23,953	23,976	23,949
24,809	24,992	24,951	24,949
23,812	23,978	24,010	23,959
24,808	24,972	24,974	24,926
23,811	23,955	23,961	23,933
24,808	24,972	24,994	24,937
23,812	23,948	23,975	23,921
24,808	24,969	25,000	24,918
23,812	23,928	23,994	23,923
24,807	24,964	24,969	24,937
23,811	23,962	23,992	23,926
24,808	24,972	24,963	24,928

Tabela 36: Erro médio e desvio padrão do erro estimados usando calibração baseada em estimativa de distância da câmera e filtro de Kalman no teste de repetibilidade.

Método	Média Erro (cm)	Média Desvio Padrão (cm)
Saturação	0,158	0,012
Subpixel	0,170	0,018
Misto	0,125	0,013

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta um sistema de percepção para ajuste da altura da tocha de soldagem em relação as chapas metálicas a serem soldadas. Essa abordagem se mostra promissora para a robotização da soldagem, porém carecia de uma calibração eficiente dos valores D e α , que necessitou de novas metodologias para estimar esses parâmetros, visto que o sistema necessita da estimativa da distância absoluta entre a câmera e as chapas metálicas devido ao uso de apenas uma câmera.

O uso do relógio comparador se mostrou viável para a calibração, embora, o método de estimativa de distância proposto também obteve resultados satisfatórios. Foi apresentado um método para estimação dos parâmetros D e α associado com filtro de Kalman como método de previsão de posição do centroide para estimação da distância entre as posições das imagens obtidas. Tal filtro se mostrou pouco adequado para lidar com mudanças bruscas de altura, e não apresentou melhorias significativas.

Os resultados mostraram o potencial das estimativas de distância utilizando uma câmera monocular e um ponto laser para aferir essa distância, com erros médios menores que $0,5mm$ para a maioria dos métodos. Erros menores que $0,2mm$ também foram alcançados em algumas situações.

Entre os métodos de detecção do ponto laser o que apresentou o menor erro médio foi o método Misto de detecção. Contudo, o método por Saturação da imagem obteve o menor desvio padrão do erro médio e o método com precisão de Subpixel foi o que levou menos tempo por imagem para detectar o centroide do ponto laser.

Por fim, este trabalho mostrou a avaliação de diferentes métodos para realização da calibração dos parâmetros D e α e de detecção do ponto laser para conseguir determinar quais métodos serão implementados na plataforma de soldagem automatizada.

Trabalhos futuros serão na direção da integração do sistema no robô de soldagem linear Bug-O, bem como a avaliação de sistemas no controle em altura da tocha integrado ao sistema de soldagem horizontal, com a informação obtida pelo sistema de percepção proposto fornecendo as alturas a serem corrigidas.

O uso de outros tipos de luz laser, como luz colorida ou feixes em formato X e lineares também serão avaliados futuramente. A implementação mais eficiente dos algoritmos apre-

sentados aqui de modo a permitir uma maior taxa de atualização também será investigada.

Appendices

ApêndiceA MÉTODO DE CALIBRAÇÃO TESTADOS PRELIMINARMENTE

Para obter os valores de D e α , é proposto um método que avalia as alturas obtidas ($H1$ e $H2$) que valores de D e α , baseado em uma leitura dos valores de variação entre as imagens (ΔH) e nos ângulos θ calculados no método de detecção do ponto laser.

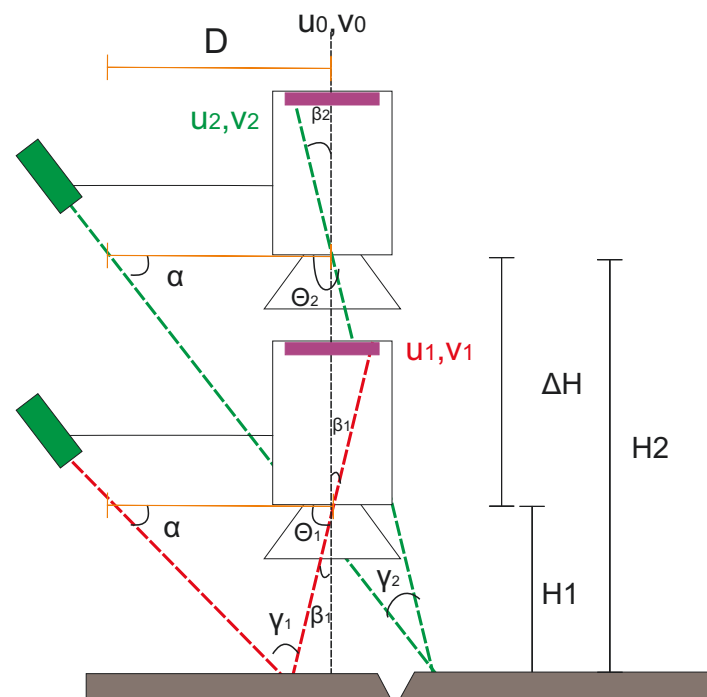


Figura 34: A distância D e ângulo α devem ser os mesmos para distâncias H_1 e H_2 .

Para conseguir calibrar os valores de D e α , foi necessário medir o ângulo θ de cada imagem, para assim poder estimar os valores D e α que satisfaçam a condição:

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_2)} - \frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_1)} = \Delta H \quad (44)$$

Como os ensaios foram feitos em uma bancada testes, a variação de altura da bancada não era uniforme em todos os passos (variando entre 0.8 mm até 1.9 mm), ΔH é um vetor de valores medidos através de um relógio comparador. Os métodos executam os valores de θ de N imagens, é necessário satisfazer N-1 condições:

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_{i+1})} - \frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_i)} = \Delta H_i \quad (45)$$

onde $0 < i < N$

A.1 Métodos de calibração

A.1.1 Método de calibração por diferenciação com tolerância ao ΔH (M1)

Este primeiro método de calibração de α e D é deduzido diretamente da Figura 34, onde é estimado uma faixa de possíveis valores para D, e para cada D, é estimado outra faixa de valores para α .

Basicamente o algoritmo compara uma faixa valores de D e α definidos em D_{min} até D_{max} e de α_{min} até α_{max} , verificando se satisfazem as condições possíveis:

$$\frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_{i+1})} - \frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_i)} = \Delta H_i + \text{tolerancia} \quad (46)$$

Algoritmo 1: PSEUDO CÓDIGO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO COM TOLERÂNCIA

Entrada: $Dmin, Dmax, \alpha min, \alpha max, tolerancia$
Saída: D, α

```

1 início
2   para  $D=Dmin$  até  $Dmax$  faça
3     para  $\alpha=\alpha min$  até  $\alpha max$  faça
4        $cont = 0$ 
5       para  $i=1$  até  $N-1$  faça
6         se  $\frac{D}{cot(\alpha)+cot(\theta_{i+1})} - \frac{D}{cot(\alpha)+cot(\theta_i)} = \Delta H_i + tolerancia$  então
7            $cont = cont + 1$ 
8         fim
9       fim
10      se  $cont == N - 1$  então
11        retorna  $D$ 
12        retorna  $\alpha$ 
13      fim
14    fim
15  fim
16 fim

```

Esse método apresenta limitações, como ter que informar a faixa de valores máximos e mínimos para D e α , além disso os valores de tolerância acabam mudando dependendo do ensaio. Contudo, esse método apresentou valores aproximados, por não muito satisfatórios para D e α , entretanto foi o ponto de partida para calibração desses parâmetros.

A.1.2 Método de calibração por diferenciação de distâncias iterativo (M2)

Como o primeiro método M1 não conseguia valores satisfatórios de D e α , foi então abordado um método de otimização não linear [34] para calcular os valores D e α . Basicamente é uma função que encontra a soma dos mínimos quadrados de uma função não-linear.

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x (f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_M(x)^2) \quad (47)$$

Esta função retorna um vetor de valores referentes aos valores aproximados das incógnitas da função (no caso, D e α) onde é inserida a função baixo:

$$\frac{D}{cot(\alpha) + cot(\theta_{i+1})} - \frac{D}{cot(\alpha) + cot(\theta_i)} - \Delta H_i = 0 \quad (48)$$

Para avaliar o método, cria-se os valores de entrada no vetor x que define $x_1=D$, $x_2=\alpha$, portanto $x=[x_1 \ x_2]$.

$$f(x) = \frac{x_1}{\cot(x_2) + \cot(\theta_{i+1})} - \frac{x_1}{\cot(x_2) + \cot(\theta_i)} - \Delta H_i \quad (49)$$

Ao executar a função dos mínimos quadrados com a equação descrita acima, que tipicamente possui duas incógnitas (D e α) apresentou resultados diferentes em relação ao método de calibração M1. Entretanto, dependendo do tipo de ensaio com ângulos α diferentes, apresentou resultados mais satisfatórios para ângulos α mais fechados.

A.1.3 Método de calibração iterativo com distâncias absolutas (M3)

Igualmente ao método descrito anteriormente, foi novamente utilizado o método de otimização não linear, porém modificando um pouco a equação a ser minimizada com valores absolutos dos valores de cada altura H (pois é feita a medição da distância inicial) ao invés de apenas as variações ΔH com uma variável K comum a todas as alturas obtidas:

$$H_i + K = \frac{D}{\cot(\alpha) + \cot(\theta_i)} \quad (50)$$

Para avaliar o método, a equação deve ficar com valores da entrada do vetor x , logo:

$$f(x) = H_i + x_3 - \frac{x_1}{\cot(x_2) + \cot(\theta_i)} \quad (51)$$

Apesar dessa equação apresentar uma incógnita K a mais na equação, esse método M3 foi o mais satisfatório para realizar a calibração de D e α .

ApêndiceB RESULTADOS PRELIMINARES DE CALIBRAÇÃO E MEDIÇÕES

Os resultados apresentados foram realizados com a premissa que, quanto menor o ângulo α , maior será a precisão de medição do método (Figura 35).

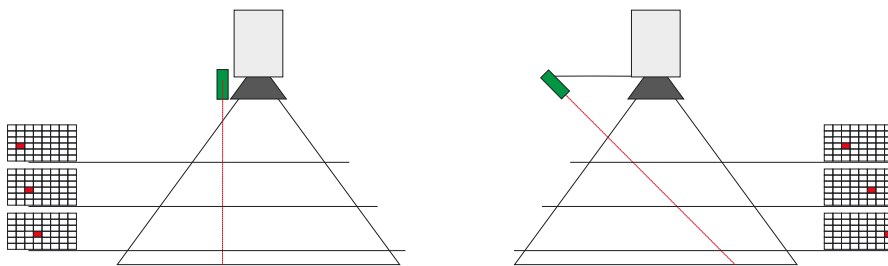


Figura 35: Quanto menor o ângulo α maior a variação do centroide do ponto laser na imagem.

Com isso puderam ser realizados os testes com diferentes ângulos α , o que implica em diferentes distâncias D entre emissor do ponto laser e a câmera, o que por consequência gera valores diferentes para o comprimento D em cada ensaio.

Foram realizados dois testes com dois ensaios no primeiro e três ensaios no segundo, com cada ensaio com ângulos α diferentes.

Para cada ensaio foi avaliado três métodos de calibração para D e α (citado na seção 3.2).

Para realização da calibração de D e α , foi realizado medidas dos passos entre as imagens utilizando um relógio comparador Digimess com faixa de atuação de 25 mm e resolução de 0,01 mm [8]. O emissor do ponto laser utilizado possui potência menor que 5 mW [35]. A distância entre a lente da câmera e o corpo de prova foi medida utilizando uma trena comum, para realização das calibrações. A câmera utilizada foi a Basler Ace,

modelo acA4600 - 10 μ c, com sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de 14 megapixels de resolução.

B.1 Teste 01

O primeiro teste de calibração e obtenção das distâncias entre a câmera e as chapas de soldagem foi realizado com dois ensaios com ângulos α e distâncias D diferentes.

B.1.1 Ângulo Aberto

O primeiro ensaio do Teste 01 foi realizado com ângulo do emissor laser cerca de 77 graus e uma distância D de 10 cm do centro ótico do *CMOS* e uma distância H de 20 cm.

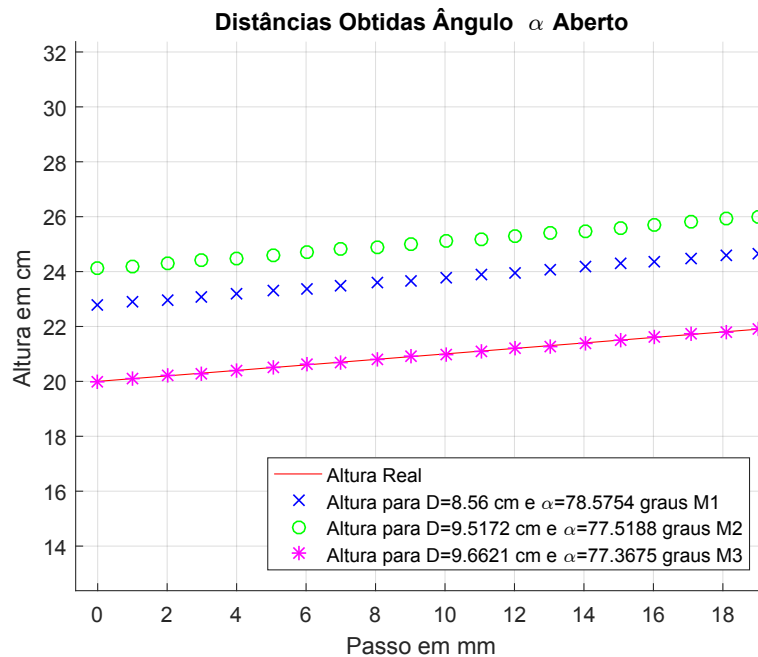


Figura 36: Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo Aberto para Teste 01 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração.

O gráfico da Figura 36 mostra a variação da medição das distâncias entre a câmera e o ponto laser que incide sobre o corpo de prova, demonstrando que todos os métodos de calibração foram relativamente eficientes em detectar a variação de distância entre as imagens obtidas, porém apenas o método M3 foi o mais preciso em detectar a distância real que a câmera se encontrava do corpo de prova.

Ao analisar os resultados na Tabela 37, percebe-se que o método de calibração M3 para D e α foi o mais eficiente por obter o menor erro *offset* de detecção de distância assim como apresentou o menor desvio padrão nos ensaios.

Tabela 37: Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 01 com ângulo aberto

-	M1	M2	M3
Erro Médio (mm)	27.8092	40.9578	0.0463
Desvio Padrão (mm)	0.0552	0.0535	0.0247

B.1.2 Ângulo fechado

O segundo ensaio do Teste 01 foi feito com ângulo do emissor do ponto laser a cerca de 70 graus e uma distância aproximada de D de 6 cm do centro ótico do *CMOS* e distância H de 20 cm.

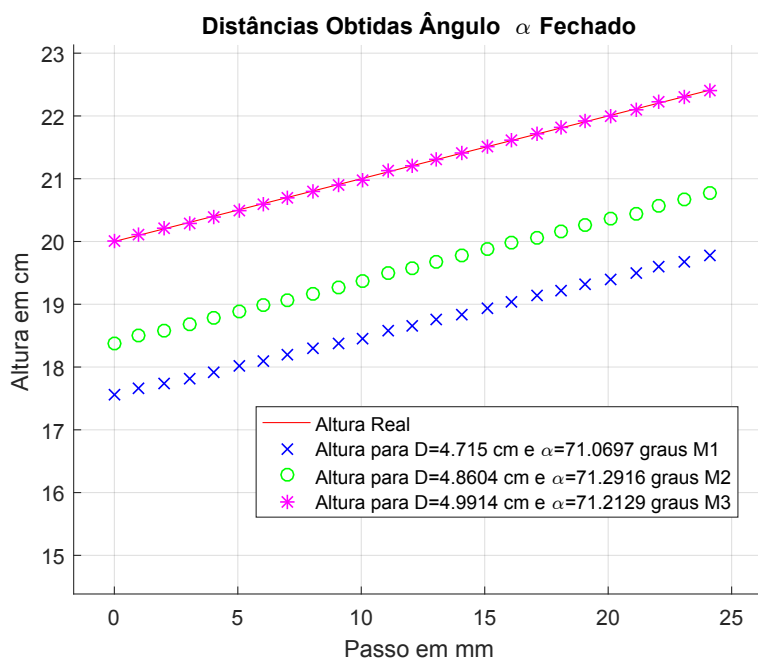


Figura 37: Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo fechado para Teste 01 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração.

Tabela 38: Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 01 com ângulo fechado

-	M1	M2	M3
Erro Médio (mm)	25.4314	16.3242	0.0591
Desvio Padrão (mm)	0.5673	0.1301	0.0497

Os resultados mostrados na Figura 37 e na Tabela 38 apresentam novamente uma grande variação de detecção de distância entre os métodos de calibração para D e α . Novamente o método M3 foi o que mais se aproximou das medidas reais. O método M1 apresentou uma variação do erro médio mais significativo que o método M2, porém o

método M2 apresentou um desvio padrão bem mais significativo que o desvio padrão do erro do método M3.

B.2 Teste 02

O segundo teste de calibração e medição das distâncias entre a câmera e as chapas de soldagem foi realizado em três ensaios com ângulos α e distâncias D diferentes (ângulos aberto, médio e fechado). Para execução da calibração de D e α , foram medidos os passos entre as imagens utilizando um relógio comparador e também foi medida a distância H de 21.7 cm entre a lente da câmera e o corpo de prova para realização das calibrações.

B.2.1 Ângulo Aberto

O primeiro ensaio do Teste 02 foi realizado com ângulo do emissor laser cerca de 80 graus e uma distância aproximada D de 10 cm do centro óptico do sensor da câmera e uma distância H de 21.7 cm.

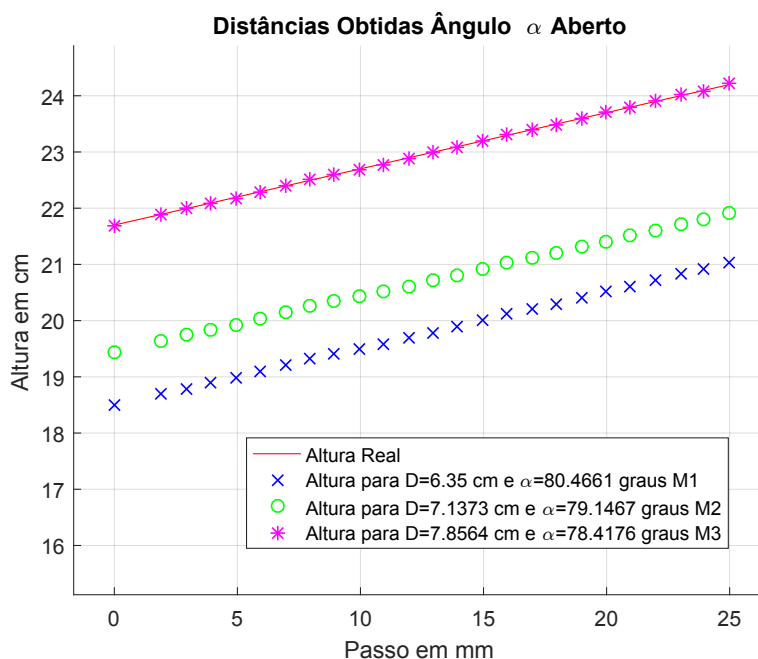


Figura 38: Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo aberto para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração.

Os resultados obtidos na Figura 38 mostram novamente uma diferença significativa na medição da distância entre os métodos de calibração para D e α . O método M3 foi o que novamente mais se aproximou das medidas reais.

O método M1 apresentou um erro médio maior que o método M2. Além disso, o método M2 apresentou um desvio padrão maior desvio padrão do erro do método M3 e do método M1, como mostrado na Tabela 39.

Tabela 39: Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo aberto

-	M1	M2	M3
Erro Médio (mm)	31.8880	22.7184	0.0765
Desvio Padrão (mm)	0.1077	0.1736	0.0481

B.2.2 Ângulo Médio

O segundo ensaio do Teste 02 foi realizado com ângulo aproximado de 70 graus do emissor do ponto laser e uma distância aproximada D de 7 cm do centro ótico do sensor e uma distância inicial H de 21.701 cm.

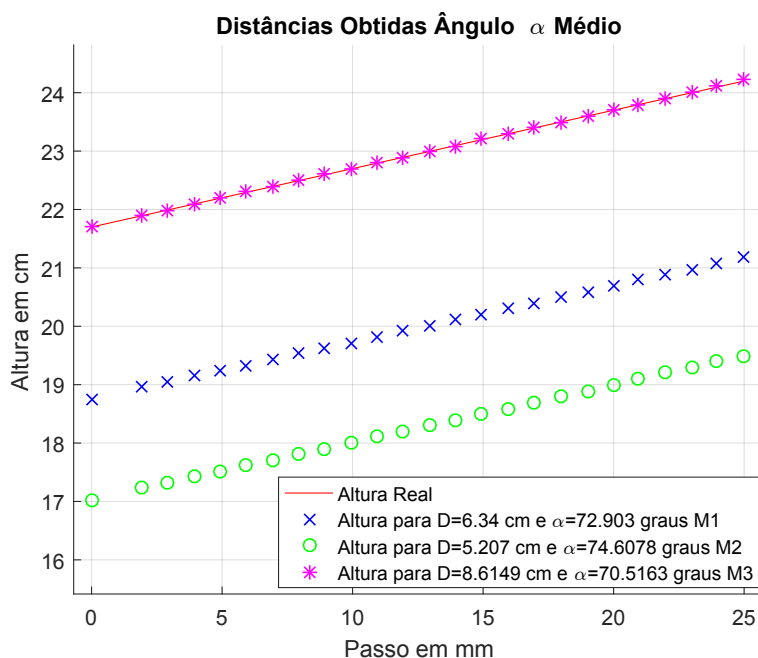


Figura 39: Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo médio para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração.

O gráfico mostrado na Figura 39 mostra as distâncias obtidas entre a câmera e o corpo de prova;

Tabela 40: Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo médio

-	M1	M2	M3
Erro Médio (mm)	29.8066	46.8915	0.0561
Desvio Padrão (mm)	0.2668	0.1537	0.0449

A Tabela 40 mostra que método de calibração M1 obteve um erro médio inferior ao método de calibração. Contudo o método de calibração M2 demonstra um desvio padrão

do erro menor que M1. Já o método M3 apresenta o menor erro médio como também o menor desvio padrão do erro, sendo este um método de calibração mais confiável.

B.2.3 Ângulo fechado

O terceiro ensaio do Teste 02 foi realizado com ângulo α do emissor laser a cerca de 60 graus e uma distância aproximada D de 6 cm do centro ótico do sensor da câmera e posicionado a uma altura H de 21.701 cm.

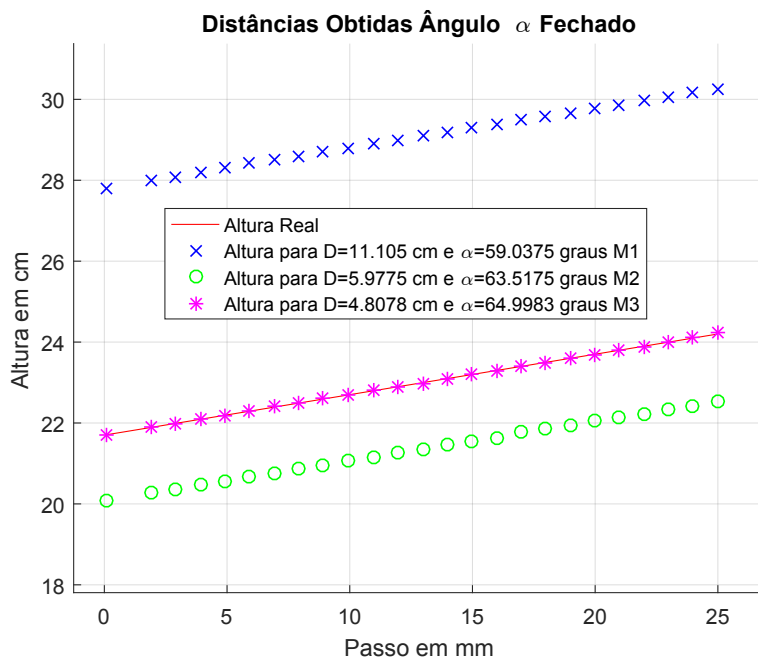


Figura 40: Distâncias obtidas no ensaio com laser em ângulo fechado para Teste 02 com respectivos D e α obtidos em cada método de calibração.

Para este ensaio mostrado na Figura 40, a precisão do método de calibração M1 diminuiu bastante e apresenta a maior variação do erro no gráfico.

Tabela 41: Erro médio e desvio padrão para cada método de calibração no teste 02 com ângulo fechado

-	M1	M2	M3
Erro Médio (mm)	60.9388	16.3978	0.0637
Desvio Padrão (mm)	0.1957	0.1797	0.0517

O método de calibração M2 melhorou os valores obtidos em relação ao ensaio anterior, porém houve um aumento do desvio padrão do erro. Já o método de calibração M3 foi o que obteve os melhores resultados novamente (Tabela 41), obtendo uma diferença muito pequena entre as distâncias medidas para seu D e α calibrados e a distância real.

Com esses ensaios apresentados, é concluído que o método de calibração M3 para D e α foi o mais eficaz tanto na questão do erro de *offset* de detecção de distância, como

apresenta o menor desvio padrão desse erro, sendo este o método testado mais confiável.

B.3 Teste 01 ângulo aberto

Tabela 42: Medições de distância no teste 01 com ângulo aberto utilizando D e α de cada método de calibração

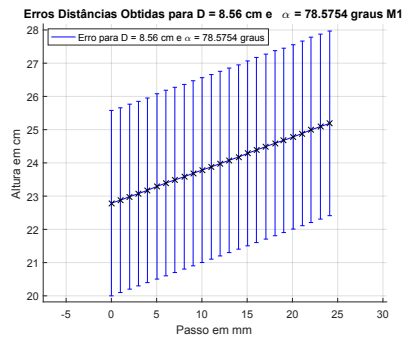
Real	M1	M2	M3
20	22.789	24.1009	20.0042
20.099	22.8782	24.1906	20.094
20.202	22.9844	24.2974	20.201
20.299	23.0751	24.3886	20.2922
20.398	23.1749	24.4888	20.3925
20.504	23.2924	24.6068	20.5106
20.602	23.3941	24.7088	20.6127
20.701	23.488	24.8031	20.707
20.805	23.5828	24.898	20.8021
20.903	23.687	25.0025	20.9066
21.002	23.7833	25.099	21.0032
21.104	23.8804	25.1963	21.1005
21.201	23.9784	25.2943	21.1986
21.301	24.0771	25.3931	21.2974
21.405	24.1767	25.4927	21.397
21.505	24.2862	25.6022	21.5066
21.602	24.3875	25.7034	21.6078
21.707	24.4896	25.8055	21.7099
21.808	24.5926	25.9083	21.8127
21.904	24.6775	25.9931	21.8975
22.009	24.7821	26.0974	22.0018
22.11	24.8876	26.2026	22.107
22.205	24.994	26.3086	22.213
22.309	25.0915	26.4058	22.3101
22.412	25.1897	26.5036	22.408

A Tabela 42 mostra os valores calculados pelo método trigonométrico utilizando os valores de D e α obtidos em cada método de calibração M1, M2 e M3 no Teste 01 com ângulo aberto.

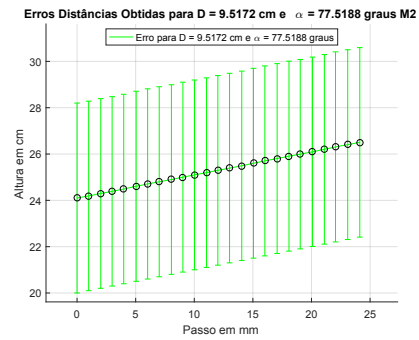
Os resultados apresentados no ensaio para ângulo α de 78.57 graus mostram um erro médio de 2.78 cm e desvio padrão de 0.0552 mm para método de calibração M1.

O erro para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 77.51 graus apresentam um erro médio de 4.09 cm e desvio padrão de 0.0535 mm executando o método de calibração M2.

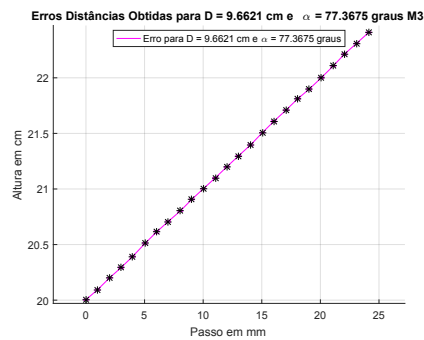
Os valores obtidos no ensaio para ângulo α de 77.36 graus apresentam um erro médio de 0.463 cm e desvio padrão de 0.0247 mm utilizando o método de calibração M3.



(a) Erro de medição ao avaliar método M1



(b) Erro de medição ao avaliar método M2



(c) Erro de medição ao avaliar método M3

Figura 41: Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 01 para ângulo α aberto.

B.4 Teste 01 ângulo fechado

A Tabela 43 mostra os valores calculados pelo método trigonométrico utilizando os valores de D e α obtidos de cada método de calibração M1, M2 e M3 no Teste 01 para ângulo fechado.

Tabela 43: Medições de distância no teste 01 com ângulo fechado utilizando D e α de cada método de calibração

Real	M1	M2	M3
20	17.5469	18.3836	19.9986
20.099	17.6518	18.4953	20.112
20.204	17.7402	18.5894	20.2076
20.302	17.8205	18.675	20.2944
20.401	17.9197	18.7806	20.4016
20.506	18.0107	18.8777	20.5002
20.604	18.1028	18.9758	20.5997
20.703	18.1957	19.0749	20.7003
20.807	18.2897	19.175	20.8019
20.905	18.3846	19.2763	20.9046
21.005	18.4612	19.358	20.9875
21.108	18.5871	19.4923	21.1238
21.205	18.6655	19.5759	21.2086
21.304	18.7643	19.6814	21.3156
21.408	18.8442	19.7666	21.402
21.508	18.9449	19.8742	21.5111
21.606	19.0365	19.972	21.6103
21.709	19.129	20.0708	21.7105
21.81	19.2225	20.1705	21.8117
21.907	19.3168	20.2713	21.9138
22.011	19.4014	20.3617	22.0055
22.113	19.4868	20.4529	22.098
22.207	19.5945	20.5681	22.2148
22.311	19.6816	20.6612	22.3092
22.415	19.7805	20.7669	22.4163

O erro mostrado na Figura 42a para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 78.57 graus apresentam um erro médio de 2.54 cm e desvio padrão de 0.5673 mm executando o método de calibração M1.

A Figura 42b apresenta erro médio de 1.63 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 77.51 graus e desvio padrão de 0.1301 mm executando o método de calibração M2.

Já na Figura 42c é mostrado um erro médio de 0.5901 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 77.36 graus apresentando um desvio padrão de 0.0497 mm aplicando o método de calibração M3.

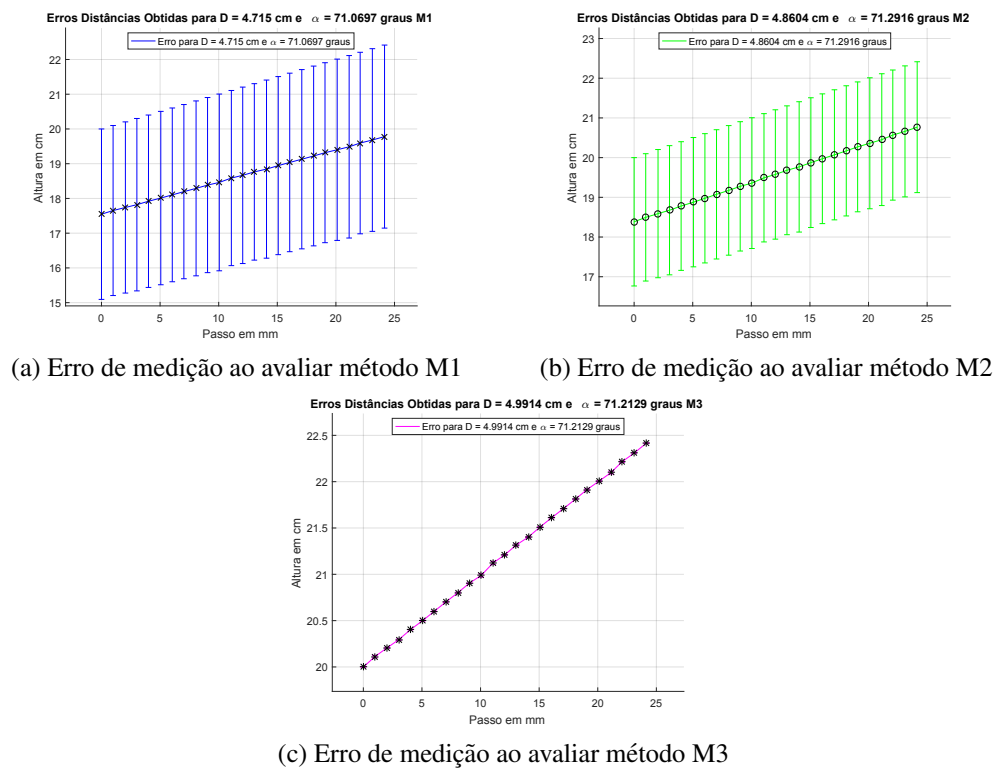


Figura 42: Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 01 para ângulo α fechado.

B.5 teste 02 ângulo aberto

A tabela 44 apresenta os valores calculados pelo método trigonométrico utilizando os valores de D e α de cada método de calibração M1, M2 e M3 no Teste 02 com ângulo aberto.

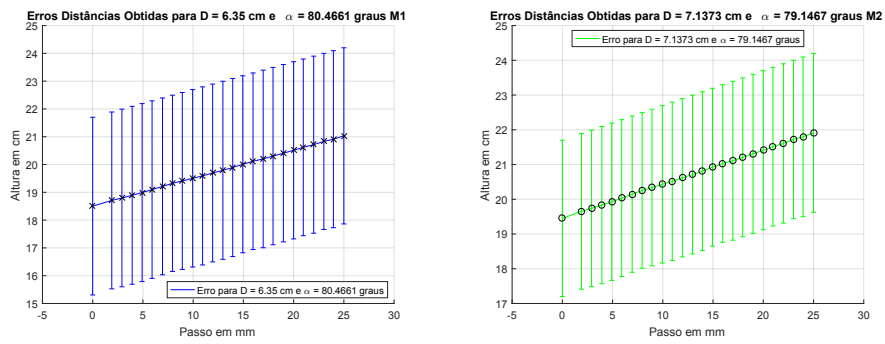
Tabela 44: Medições de distância no teste 02 com ângulo aberto utilizando D e α de cada método de calibração

Real	M1	M2	M3
21.7	18.5034	19.45	21.6936
21.89	18.7078	19.6508	21.8994
21.991	18.7957	19.737	21.9878
22.093	18.8925	19.8319	22.085
22.192	18.9902	19.9278	22.1831
22.291	19.0973	20.0326	22.2905
22.395	19.214	20.1468	22.4073
22.494	19.3236	20.254	22.5169
22.592	19.4088	20.3372	22.602
22.695	19.5034	20.4296	22.6964
22.794	19.5901	20.5143	22.7829
22.894	19.6953	20.6168	22.8877
22.996	19.7927	20.7117	22.9846
23.094	19.891	20.8075	23.0824
23.194	20.0086	20.9219	23.1991
23.296	20.1183	21.0286	23.3079
23.397	20.2013	21.1093	23.3902
23.495	20.3038	21.2088	23.4916
23.598	20.4073	21.3093	23.594
23.7	20.5119	21.4107	23.6973
23.796	20.6176	21.5131	23.8015
23.9	20.7146	21.607	23.8971
24.001	20.8322	21.7208	24.0129
24.096	20.9113	21.7973	24.0907
24.2	21.0312	21.9132	24.2085

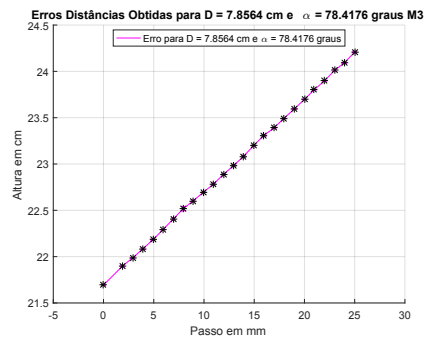
Como mostrado na Figura 43a o erro médio para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 71.06 graus é de 3.18 cm e possui desvio padrão de 0.1077 mm executando o método de calibração M1.

Já Figura 43b apresenta erro médio de 2.27 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 71.29 graus e desvio padrão de 0.1736 mm executando o método de calibração M2.

Os resultados mostrados na Figura 43c apresenta um erro médio de 0.765 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 71.21 graus apresentando um desvio padrão de 0.0481 mm aplicando o método de calibração M3.



(a) Erro de medição ao avaliar método M1 (b) Erro de medição ao avaliar método M2



(c) Erro de medição ao avaliar método M3

Figura 43: Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α aberto.

B.6 Teste 02 ângulo médio

A Tabela 45 mostra os valores calculados pelo método trigonométrico utilizando os valores de D e α de cada método de calibração M1, M2 e M3 no Teste 02 com ângulo médio.

Tabela 45: Medições de distância no teste 02 com ângulo médio utilizando D e α de cada método de calibração

Real	M1	M2	M3
21.701	18.7567	17.0315	21.6862
21.89	18.9589	17.2347	21.8986
21.989	19.0493	17.3257	21.9934
22.093	19.1489	17.4261	22.0976
22.192	19.2411	17.5191	22.194
22.29	19.3341	17.6131	22.2913
22.395	19.4367	17.7168	22.3983
22.494	19.5317	17.8129	22.4972
22.592	19.6189	17.9013	22.5879
22.696	19.7157	17.9994	22.6885
22.794	19.8224	18.1078	22.7993
22.894	19.9121	18.199	22.8924
22.997	20.0118	18.3005	22.9956
23.095	20.1126	18.4031	23.0998
23.195	20.205	18.4974	23.1953
23.297	20.2983	18.5927	23.2915
23.397	20.3925	18.6889	23.3885
23.496	20.497	18.7959	23.4962
23.6	20.5931	18.8943	23.5949
23.7	20.69	18.9937	23.6944
23.796	20.8075	19.1143	23.8149
23.9	20.8965	19.2059	23.906
24.001	20.9763	19.2879	23.9876
24.096	21.087	19.402	24.1007
24.199	21.1784	19.4962	24.1939

A Figura 44a apresenta erro médio de 2.98 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 72.90 graus e desvio padrão de 0.2668 mm executando o método de calibração M1.

Os resultados mostrados na Figura 44b apresenta um erro médio de 4.68 cm para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 74.60 graus apresentando um desvio padrão de 0.1537 mm aplicando o método de calibração M2.

Como mostrado na Figura 44c o erro apresentado para as distâncias obtidas no ensaio para ângulo α de 70.51 graus apresentam um erro médio de 0.561 cm e desvio padrão de 0.0449 mm executando o método de calibração M3.

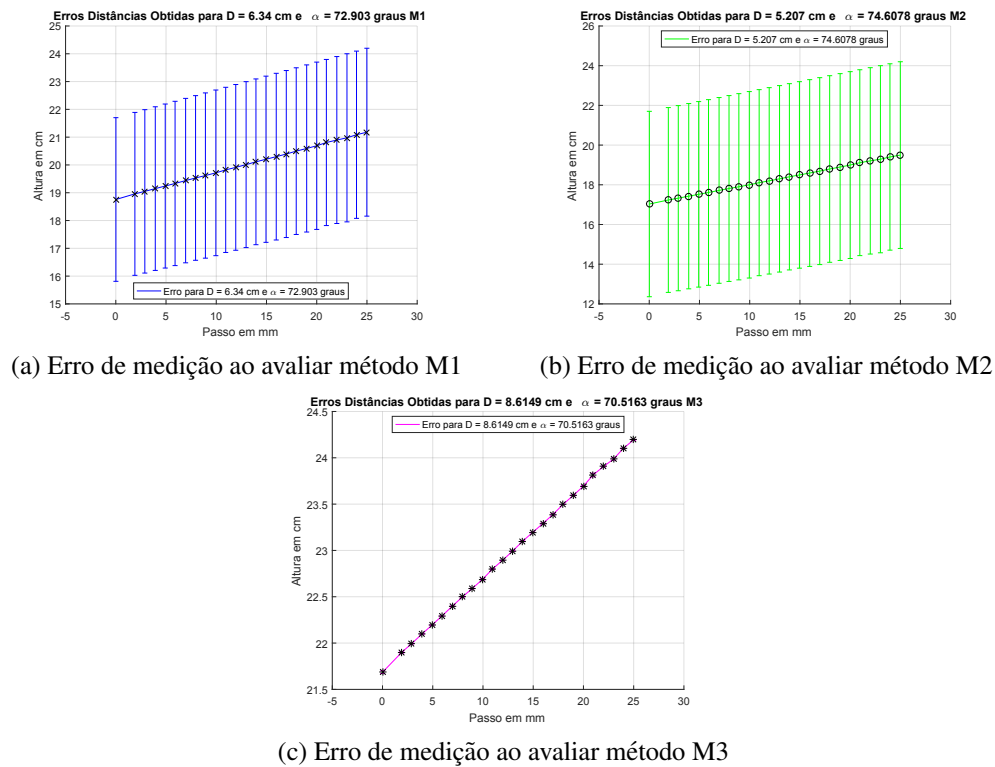


Figura 44: Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α médio.

B.7 Teste 02 ângulo fechado

A tabela 46 mostra os valores calculados pelo método trigonométrico utilizando os valores de D e α de cada método de calibração M1, M2 e M3 utilizados no Teste 02 com ângulo fechado.

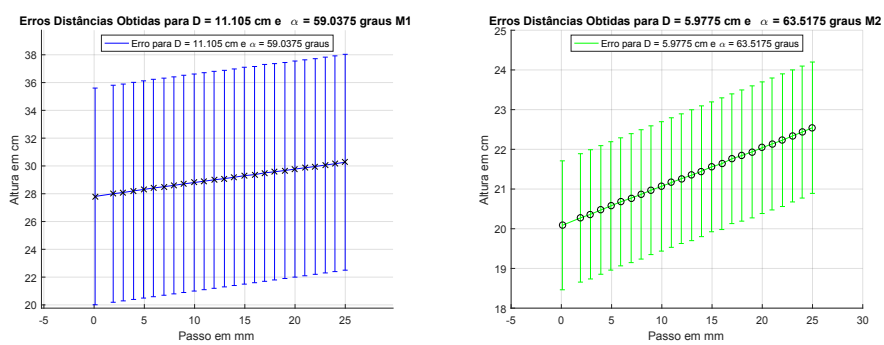
Tabela 46: Medições de distância no teste 02 com ângulo fechado utilizando D e α de cada método de calibração

Real	M1	M2	M3
21.71	27.807	20.0863	21.7031
21.89	27.9991	20.273	21.8916
21.99	28.0911	20.3626	21.9823
22.093	28.2042	20.4733	22.0944
22.192	28.3079	20.5749	22.1974
22.29	28.4124	20.6776	22.3016
22.395	28.5071	20.7708	22.3964
22.494	28.6024	20.8649	22.4922
22.592	28.709	20.9705	22.5997
22.696	28.8057	21.0664	22.6976
22.795	28.903	21.1633	22.7965
22.894	29.0009	21.261	22.8964
22.997	29.0886	21.3486	22.986
23.095	29.1878	21.448	23.0879
23.195	29.2989	21.5596	23.2024
23.297	29.3771	21.6384	23.2833
23.397	29.5009	21.7633	23.4119
23.496	29.5803	21.8436	23.4945
23.599	29.6715	21.9361	23.5899
23.699	29.7747	22.0411	23.6982
23.797	29.8671	22.1353	23.7955
23.901	29.9601	22.2303	23.8938
24.001	30.0654	22.3381	24.0055
24.097	30.1596	22.4348	24.1058
24.199	30.2663	22.5447	24.2198

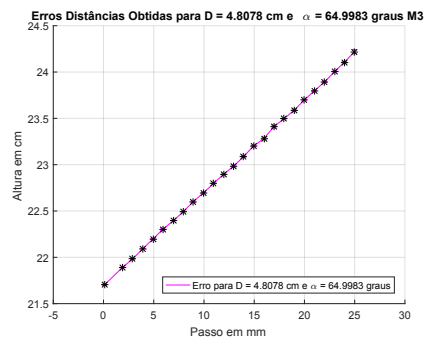
Os resultados mostrados na Figura 45a no ensaio para ângulo α de 59.03 graus mostram um erro médio de 6.09 cm e desvio padrão de 0.1957 mm para método de calibração M1.

O erro para as distâncias medida pelo método trigonométrico no ensaio para ângulo α de 63.51 graus apresentam um erro médio de 1.63 cm e desvio padrão de 0.1797 mm executando o método de calibração M2, como mostrado Figura 45b.

Já os valores obtidos no ensaio para ângulo α de 64.99 graus apresentam Figura 45c um erro médio de 0.637 cm e desvio padrão de 0.0517 mm ao utilizar o método de calibração M3.



(a) Erro de medição ao avaliar método M1 (b) Erro de medição ao avaliar método M2



(c) Erro de medição ao avaliar método M3

Figura 45: Erros obtidos ao avaliar métodos M1, M2 e M3 no Teste 02 para ângulo α fechado.

REFERÊNCIAS

- [1] BROERING, C. E., ET AL. Desenvolvimento de sistemas para automação da soldagem e corte térmico, 2005.
- [2] BUG-O SYSTEMS CORPORATION. Instructions and parts manual: modular drive system. <https://www.red-d-arc.com/pdf/Bug-020Systems20MDS20Manual.pdf>, 2014. [Online; acessado 10-setembro-2017].
- [3] CHEN, K., CAO, G. Z., SUN, J. D., AND YANG, J. J. A path-planning algorithm of the automatic welding robot system for three-dimensional arc welding using image processing. In *2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)* (Aug 2016), pp. 692–697.
- [4] CHEN, S.-B., CHEN, X., QIU, T., AND LI, J. Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 43, 1 (2005), 77–97.
- [5] COLEMAN, T., AND LI, Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. *SIAM Journal on Optimization* 6, 2 (1996), 418–445.
- [6] CORKE, P. I., ET AL. *Visual Control of Robots: high-performance visual servoing*. Research Studies Press Baldock, 1996.
- [7] DE OLIVEIRA RODRIGUES, L. *ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS NA SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR*. PhD thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2005.
- [8] DIGIMESS INSTRUMENTOS DE PRECISÃO LTDA. Relógio Comparador Digimess modelo 121.336 . <http://www.digimess.com.br/produtos/relogios-comparadores-digitais.html>, 2017. [Online; acessado 6-março-2017].
- [9] DREWS, P., FRASSEK, B., AND WILLMS, K. Optical sensor systems for automated arc welding. *Robotics* 2, 1 (1986), 31–43.

- [10] GHOSAL, S., AND MEHROTRA, R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection. *Pattern recognition* 26, 2 (1993), 295–306.
- [11] HACKENHAAR, W. Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem mag em diferentes geometrias de juntas, 2016.
- [12] HIRSCHMULLER, H., AND SCHARSTEIN, D. Evaluation of cost functions for stereo matching. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (June 2007), pp. 1–8.
- [13] HUANG, Y., XIAO, Y., WANG, P., AND LI, M. A seam-tracking laser welding platform with 3d and 2d visual information fusion vision sensor system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67, 1-4 (2013), 415–426.
- [14] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 60825-1:2007 - Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements*, 2.0 ed., 2007.
- [15] JING, L., FENGSHUI, J., AND EN, L. Rgb-d sensor-based auto path generation method for arc welding robot. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2016 Chinese* (2016), IEEE, pp. 4390–4395.
- [16] KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* 82, 1 (1960), 35–45.
- [17] KAWAHARA, M. Tracking control system using image sensor for arc welding. *Automatica* 19, 4 (1983), 357–363.
- [18] KIM, J. S., SON, Y. T., CHO, H. S., AND KOH, K. I. A robust visual seam tracking system for robotic arc welding. *Mechatronics* 6, 2 (1996), 141–163.
- [19] KIM, T., LEE, S., BAEK, S., AND BOO, K. A study on the welding seam tracking by using laser vision sensor. In *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on* (2010), IEEE, pp. 779–782.
- [20] LEONARDO, B. Q., STEFFENS, C. R., DA SILVA FILHO, S. C., MÓR, J. L., HÜTTNER, V., DO AMARAL LEIVAS, E., DA ROSA, V. S., AND DA COSTA BOTELHO, S. S. Vision-based system for welding groove measurements for robotic welding applications. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on* (2016), IEEE, pp. 5650–5655.
- [21] LIU, J., FAN, Z., CHRISTENSEN, K. H., KRISTENSEN, J. K., ET AL. A real-time passive vision system for robotic arc welding. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (2015), IEEE, pp. 389–394.

- [22] MACHADO, E., ET AL. Influência dos ventos sobre a qualidade das soldas realizadas em estaleiros pelo processo arame tubular, 2015.
- [23] MALIS, E. Survey of vision-based robot control. *ENSIETA European Naval Ship Design Short Course, Brest, France* (2002).
- [24] MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., AND BRACARENSE, A. Q. *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG, 2005.
- [25] MUÑOZ, G. L. L. Análise comparativa das técnicas de controle servo visual de manipuladores robóticos baseadas em posição e em imagem. Tech. rep., Universidade de Brasília, 2011.
- [26] ODROID. Odroid-XU4. http://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php?g_code=G143452239825, 2017. [Online; acessado 10-setembro-2017].
- [27] OHSHIMA, K., YAMAMOTO, M., TANII, T., AND YAMANE, S. Digital control of torch position and weld pool in mig welding using image processing device. *IEEE transactions on industry applications* 28, 3 (1992), 607–612.
- [28] PERRONE, R. B. D. M. Controle servovisual de veículos aéreos multirrotores. Tech. rep., Universidade Federal da Bahia, 2013.
- [29] SIQUEIRA, M. L., PIRATELLI FILHO, A., AND MOTTA, J. M. S. Avaliação da exatidão na posição de robôs industriais utilizados para soldagem em trajetórias retilíneas através de programação off-line.
- [30] SISTEMAS. Benchmark – Raspberry Pi vs Orange Pi vs Banana Pi vs Odroid. <http://www.sistemasembarcados.org/2016/04/02/benchmark-raspberry-pi-orange-pi-banana-pi-odroid/>, 2016. Online; acessado 10-setembro-2017.
- [31] SOUZA, F. V. M. D. Comparação de sistemas de visão estereoscópica para medição de distância de objetos heterogêneos, 2014.
- [32] SUZUKI, S., ET AL. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer vision, graphics, and image processing* 30, 1 (1985), 32–46.
- [33] SZELISKI, R. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [34] TEUNISSEN, P. Nonlinear least squares, 1990.

- [35] UNION. UNION OPTRONICS CORP. https://www.google.com.br/?gws_rd=cr&ei=PYozWYGGMiKpwATwg4nwAg#q=5mw+laser+diode+datasheet&spf=1496549950127, 2017. [Online; acessado 10-setembro-2017].
- [36] WEI, S., KONG, M., LIN, T., AND CHEN, S. Autonomous seam acquisition and tracking for robotic welding based on passive vision. In *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer, 2011, pp. 41–48.
- [37] WU, W.-Y., AND YU, W.-B. Subpixel detection of circular objects using geometric property. In *Proceedings of International Conference on Image, Signal and Vision Computing* (2009), pp. 236–240.
- [38] XIE, W.-F., LI, Z., TU, X.-W., AND PERRON, C. Switching control of image-based visual servoing with laser pointer in robotic manufacturing systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56, 2 (2009), 520–529.
- [39] XU, D., WANG, L., TU, Z., AND TAN, M. Hybrid visual servoing control for robotic arc welding based on structured light vision. *Acta Automatica Sinica* 31, 4 (2005), 596.
- [40] ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 22, 11 (2000), 1330–1334.