



Pedro Henrique Rodrigues Pereira Silva

**SISTEMA DE MARCADOR FIDUCIAL PARA RASTREAMENTO DE  
OBJETOS EM AMBIENTES SUBMERSOS**

Trabalho de Graduação



Universidade Federal de Pernambuco  
posgraduacao@cin.ufpe.br  
[www.cin.ufpe.br/~posgraduacao](http://www.cin.ufpe.br/~posgraduacao)

RECIFE  
2018





Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática  
Graduação em Engenharia da Computação

Pedro Henrique Rodrigues Pereira Silva

**SISTEMA DE MARCADOR FIDUCIAL PARA RASTREAMENTO DE  
OBJETOS EM AMBIENTES SUBMERSOS**

*Trabalho apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.*

Orientador: *Judith Kelner*  
Co-Orientador: *Bernardo Reis*

RECIFE  
2018

---

Pedro Henrique Rodrigues Pereira Silva  
Sistema de marcador fiducial para rastreamento de objetos em ambientes submersos/  
Pedro Henrique Rodrigues Pereira Silva. – RECIFE, 2018-  
58 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador Judith Kelner

Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Orientador. II. Universidade xxx. III.  
Faculdade de xxx. IV. Título

CDU 02:141:005.7

---

# Agradecimentos

Este trabalho marca o fim desta importante etapa da minha vida profissional e acadêmica. Varias pessoas foram muito importantes durante toda esta trajetória, por isso, me sinto no dever de agradecer-las.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado todas as oportunidades e por colocar no meu caminho pessoas que foram de fundamental importância nesta trajetória.

No âmbito acadêmico, gostaria de agradecer a todos os professores, que transmitiram seus conhecimentos que me formaram como profissional. Em especial, agradeço a minha orientadora Judith Kelnet, pelo suporte dado na escrita deste trabalho e a oportunidade de estar dentro do grupo GRVM.

Agradeço aos gerentes do GRVM: Vini, Berna e Saulo; por todo conhecimento e experiência passados ao longo destes 2 anos de grupo. Aos meus colegas de GRVM: Saulo, Santos, Belga, Figueiredo, Castiel, Teteu, Pri e tantos outros que me ajudaram no tanto no crescimento profissional como pessoal. Obrigado a todos pelo suporte neste trabalho.

Agradeço aos meus colegas da Universidade: Alberto, Hoi, Vitor, João, Thiago, Berger, Belga, entre outros que fizeram estes anos de graduação muito mais leve e divertido. Junto destas pessoas, muitas boas histórias foram geradas ao longo destes anos de graduação.

Por último, não menos importante, aos meus familiares que sempre me apoiaram não só durante esta trajetória, mas em todas as minhas escolhas. Um muito obrigado e dedico este trabalho a vocês.



*Legen wait for it... dary.*

—STINSON, BARNEY





# Resumo

Visão computacional é uma área que tem recebido considerável atenção da comunidade científica recentemente. A extração automatizada de informações a partir de imagens é de grande interesse para diversos campos de pesquisa. Atualmente, um campo de pesquisa que vem recebendo destaque é a integração de algoritmos de visão computacional a operações em ambiente submarino. Uma destas operações é a instalação de equipamentos em ambiente submarino. Por utilizar imagens, informações como profundidade da cena são perdidas, causando problemas de percepção do posicionamento dos objetos na cena. Uma solução para esse problema é a utilização de algoritmos de reconstrução 3D, sendo possível recuperar informações de profundidade dos objetos na cena. Uma das etapas básicas deste processo é o rastreamento dos objetos de interesse na imagem. As características do ambiente submarino, torna esta etapa não trivial, assim é necessária a utilização de marcadores fiduciais.

Este trabalho tem como foco propor um sistema de marcador fiducial robusto às dificuldades encontradas em ambientes submarino. Primeiramente foi realizada uma pesquisa no estado da arte sobre sistema de marcadores fiduciais e a influência das condições encontradas em ambiente submarino sobre estes sistemas. Após a análise dos dados coletados nesta pesquisa, foi possível levantar características necessárias para um bom desempenho de sistema de marcadores no ambiente submarino e desta forma, desenvolver o sistema de marcador fiducial proposto neste trabalho.

Com o intuito de validar o sistema proposto, foram realizados um conjunto de testes em cenário sintético, com a utilização de ferramentas de modelagem 3D, e também em cenário real, com a utilização de imagens de uma operação de interligação da linha de injeção de gás entre um poço de extração de petróleo e uma planta de produção. Os resultados do cenário sintético mostraram que o algoritmo proposto apresentou um baixo erro de posicionamento encontrado em relação ao *ground truth*. Os resultados do cenário real demonstram que o algoritmo se mostrou robusto em cenários submersos, preservando suas características de detecção e apresentando taxas de precisão acima de 62%. Apesar de manter uma boa taxa de detecção no cenário real, houve uma queda no tempo de execução em relação ao cenário sintético, produzindo taxas abaixo do esperado.

**Palavras-chave:** Visão Computacional, Ambiente Submerso, Rastreamento de objetos, Marcadores Fiduciais



# Abstract

Computer vision is an area that has received considerable attention from the scientific community recently. The automated extraction of information from images is great interest to several fields of research. Currently, a field of research that has been highlighted is the integration of algorithms of computational vision to operations in submarine environment. One of these operations is the installation of equipment in a submarine environment. Using images, information like depth of the scene is lost, causing problems of perception of the positioning of the objects in the scene. A solution to this problem is the use of 3D reconstruction algorithms, and it is possible to retrieve depth information of the objects in the scene. One of the basic steps of this process is the tracking of objects of interest in the image. The characteristics of the underwater environment make this step not trivial, so it is necessary to use fiducial markers.

This work aims to propose a fiducial marker system robust to difficulties found in underwater environment. Firstly, a state-of-the-art research on the fiducial markers system and the influence of underwater conditions on these systems were carried out. After analyzing the data collected in this research, it was possible to raise characteristics necessary for a good fiducial marker system in underwater environment, in this way we can develop the fiducial marker system proposed in this work.

In order to validate the proposed system, we performed a set of tests in a synthetic scenario, using 3D modeling tools, and also in real scenario, using images from a interconnection of the gas injection line between an oil extraction well and a production plant. The results of synthetic scenario showed that the proposed algorithm presented a low positioning error found in relation to ground truth. The results of real scenario demonstrate that the algorithm was robust in underwater environment, preserving its detection characteristics and presenting precision rate above 62%. Despite maintaining a good detection rate in the real scenario, there was a decrease in execution time compared to the synthetic scenario, producing below-expected rates.

**Keywords:** Computer Vision, Submerged Environment, Object Tracking, Fiducial Marker



# Lista de Figuras

1.1	Imagem capturada durante uma operação de acoplamento de equipamentos submarinos. (Fonte: Petrobras) . . . . .	18
2.1	Marcadores Planar Fiducial do estado da arte (da esquerda):ARTag <a href="#">FIALA (2005)</a> e ARToolKit <a href="#">KATO; BILLINGHURST; POUPYREV (2000)</a> . . . . .	23
2.2	Marcadores Ponto Fiducial do estado da arte (da esquerda): CCTag <a href="#">CALVET et al. (2016)</a> , SSL <a href="#">NEGRE; PRADALIER; DUNBABIN (2008)</a> , Prasad <a href="#">PRASAD; CHANDRAN; BROWN (2015)</a> e Tsai <a href="#">TSAI (2012)</a> . . . . .	24
3.1	Marcadores do estado da arte, CCTag, PRASAD e Tsai, utilizados no experimento de visualização. (Fonte: Petrobras) . . . . .	28
3.2	Resultado do efeito de <i>Light Scattering</i> , sobre o marcador PRASAD, em razão do meio subaquático. (Fonte: Petrobras) . . . . .	29
3.3	Design do marcador proposto nesse trabalho. . . . .	30
3.4	O pixel com contorno vermelho representa a região de topo, enquanto os pixels com contorno azul representam a vizinhança desta região de topo. . . . .	31
3.5	Exemplo de busca radial utilizando $N = 8$ . . . . .	32
3.6	Exemplo da distância aproximadamente iguais de pontos subsequentes da elipse $E$ ao centro $((c_x, c_y))$ . . . . .	33
4.1	Exemplo da aplicação do ruído de Poisson sobre o marcador proposto. . . . .	39
4.2	Cena simples apresentando o sistema de coordenadas do 3Ds Max. . . . .	40
4.3	Imagens do experimento de distanciamento da câmera no eixo Z (da esquerda): Marcador a 2 metros da câmera e marcador a 8 metros da câmera. . . . .	41
4.4	Gráfico da distância RMS do centro encontrado pelo algoritmo e <i>ground truth</i> por distância entre plano do marcador e câmera, no caso sem a presença de ruído. . . . .	41
4.5	Gráfico da distância RMS do centro encontrado pelo algoritmo e <i>ground truth</i> por distância entre plano do marcador e câmera, com a presença de ruído. . . . .	42
4.6	Problema da amostragem sobre o caminho $R$ , onde as cruzes laranjas representam pontos amostrados do caminho $R$ e o ponto verde o ponto de pico daquele caminho. Da esquerda para direita: pontos sobre o caminho $R$ utilizando um deslocamento de um pixel na radial $n$ e amostragem dos pontos utilizando deslocamento de meio pixel na radial $n$ . . . . .	42
4.7	Imagens do experimento de movimentação circular da câmera no eixo Z (da esquerda): Câmera rotacionada $0^\circ$ do eixo Z e marcador rotacionado a $216^\circ$ do eixo Z. . . . .	43

4.8	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> por ângulo de rotação sobre o eixo Z, sem a presença de ruído. . . . .	44
4.9	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> por ângulo de rotação sobre o eixo Z, com a presença de ruído. . . . .	44
4.10	Imagens do experimento de rotação do plano do marcador no eixo Y a uma distância de 3 metros (da esquerda): Marcador rotacionado a 60° do eixo Y e marcador rotacionado a 0° do eixo Y. . . . .	45
4.11	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> , a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, com a presença de ruído. . . . .	45
4.12	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> , a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, com a presença de ruído. . . . .	46
4.13	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> , a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, sem a presença de ruído. . . . .	46
4.14	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> , a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, sem a presença de ruído. . . . .	47
4.15	Imagens do experimento com cenário complexo (da esquerda para direita): Primeira imagem produzida pelo cenário e última imagem produzida pelo cenário. 48	
4.16	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> por quadro do cenário complexo, sem a presença de ruído. . . . .	49
4.17	Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o <i>ground truth</i> por quadro do cenário complexo, com a presença de ruído. . . . .	49
4.18	Imagens do MCV nas operações de instalação de dutos de petróleo. Da esquerda para direita e de cima para baixo: vídeo A, vídeo B, vídeo C e vídeo D. (Fonte: Sapura) . . . . .	51
4.19	Exemplos de situações onde há falsos positivos. Da esquerda para a direita: falsos positivos no anel e falsos positivos em elementos do MCV. . . . .	52
4.20	Exemplo de situações de falsos negativos. Da esquerda para a direita: oclusão parcial do marcador e situação onde a saturação da imagem causa a junção do anel do marcador ao MCV. . . . .	52

# Lista de Tabelas

4.1	Resultados do experimento de distanciamento da câmera no eixo Z . . . . .	42
4.2	Resultados do experimento de movimentação circular da câmera no eixo Z. . .	43
4.3	Resultados do experimento de rotação do marcador no eixo Y a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador. . . . .	47
4.4	Resultados do experimento de rotação do marcador no eixo Y a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador. . . . .	47
4.5	Resultados dos experimentos em cenário sintético complexo. . . . .	48
4.6	Resultados dos experimentos no cenário real. . . . .	51





# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
1.1	Definição do problema . . . . .	19
1.2	Objetivo . . . . .	19
1.3	Estrutura do documento . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>21</b>
2.1	Rastreamento de Objetos . . . . .	21
2.1.1	Características Naturais . . . . .	22
2.1.2	Características Artificiais - Fiduciais . . . . .	22
2.1.2.1	Planar Fiducial - Marcador Planar . . . . .	22
2.1.2.2	Fiducial Pontual - Marcador Pontual . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Marcador de Topos</b>	<b>27</b>
3.1	Design do Marcador . . . . .	27
3.2	Algoritmo de Detecção do Marcador . . . . .	30
3.2.1	Extração de Candidatos . . . . .	30
3.2.2	Validação do Marcador . . . . .	32
3.2.3	Recálculo do Centro . . . . .	34
3.3	Discussão . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>37</b>
4.1	Métricas de avaliação . . . . .	37
4.2	Implementação e Setup . . . . .	38
4.3	Experimentos Sintéticos . . . . .	39
4.3.1	Cenários Simples . . . . .	40
4.3.1.1	Distanciamento da câmera no eixo Z . . . . .	40
4.3.1.2	Movimentação circular da câmera no eixo Z . . . . .	43
4.3.1.3	Rotação do plano do marcador no eixo Y . . . . .	44
4.3.2	Cenário Complexo . . . . .	48
4.3.3	Discussão (Cenário Sintético) . . . . .	49
4.4	Experimentos Reais . . . . .	50
4.4.1	Discussão (Cenário Real) . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>55</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	56



# 1

## Introdução

Visão computacional é uma área da ciência da computação que busca obter informações de forma automatizada usando câmeras e algoritmos computacionais. Explorando as novas tecnologias e capacidades de processamento computacional, várias aplicações de visão computacional foram concebidas e melhoradas. Algumas destas aplicações requerem a reconstrução de métricas 3D.

A reconstrução 3D (([HARTLEY; ZISSERMAN, 2003](#))) é um processo para obter o modelo tridimensional e a aparência real de um objeto a partir de imagens. Isto é possível relacionando as projeções de um mesmo ponto do objeto em várias imagens, sejam elas em uma sequência de imagens de uma única câmera (reconstrução monocular), ou várias imagens de um mesmo instante de várias câmeras (reconstrução estéreo ou multi-visão). Identificar o mesmo ponto do objeto em várias imagens nem sempre é trivial e por isso é comum a utilização de marcadores fiduciais.

Marcadores fiduciais ([LEPETIT; FUA et al. \(2005\)](#)) são padrões visuais que facilitam a identificação e acurácia na detecção de pontos conhecidos na imagem. A definição de um padrão de marcação é composta por duas partes: um design composto de elementos visuais e um algoritmo de detecção apto a identificar tais elementos. Um bom sistema de marcação deve ser detectável mesmo com condições adversas causadas pelo ambiente.

Com os avanços tecnológicos, ambientes antes inexplorados passaram a ser explorados com a utilização de veículos não tripulados, estas explorações geram diversas informações que auxiliam na evolução e surgimento de diversos campos de pesquisa. Um destes ambientes é o ambiente submarino, onde aplicações comerciais na área das indústrias de gás e petróleo passaram a ser comuns. Uma destas aplicações é o monitoramento de operações de instalação de equipamentos submarinos.

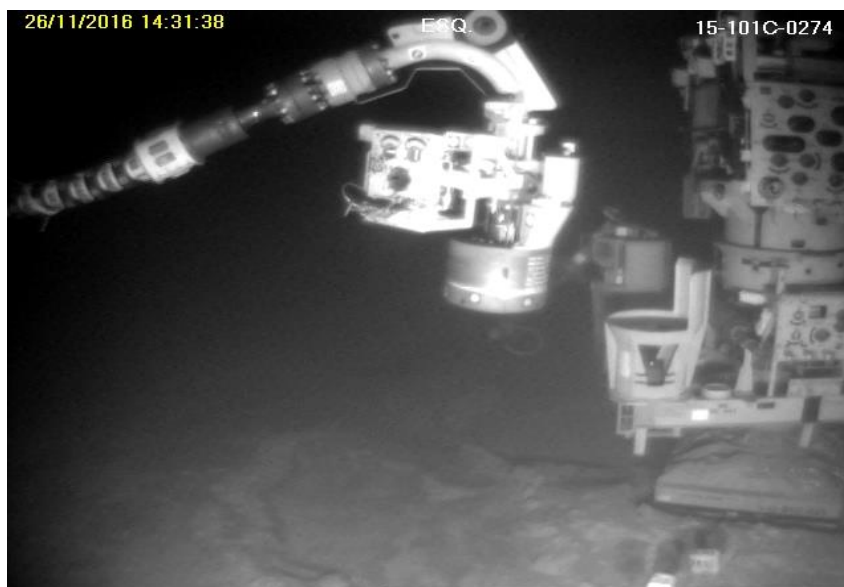
A operação de instalação de equipamentos submarinos consiste em acoplar estruturas utilizadas na exploração de petróleo e gás natural em meio submarino. Devido à profundidade que estas estruturas são instaladas (no âmbito do pré-sal superando 2000 metros de profundidade), o acoplamento é realizado por navios especializados que içam as estruturas em guindastes. Para acompanhar esta operação, é utilizado um veículo operado remotamente (*ROV - Remotely*

*Operated Underwater Vehicle*) [BUDIYONO \(2009\)](#), equipado com câmeras de alta sensibilidade que capturam imagens do ambiente.

Dada que as imagens capturadas pelas câmeras são uma projeção do ambiente, informações de profundidade da cena são perdidas, dificultando a percepção correta do posicionamento relativo entre os equipamentos. Para reduzir a perda de informações causada pela redução de dimensionalidade da visualização, o ROV é movimentado constantemente ao redor do equipamento para efetuar a aquisição de múltiplos pontos de vista da cena. Este procedimento torna esta operação de acoplamento uma tarefa morosa e arriscada.

A utilização de algoritmos de reconstrução 3D pode solucionar a ausência das informações da profundidade dos equipamentos. Com a utilização de marcadores fiduciais, um par de câmeras estéreo calibradas e algoritmos de reconstrução 3D é possível a extração de informações como a pose dos equipamentos em relação as câmeras. Porém, alguns fatores influenciam na extração desta informação. Primeiramente é necessário que uma quantidade mínima de 4 (quatro) marcadores sejam detectados na imagem, ademais é necessário que o ponto que represente o marcador seja extraído de forma precisa pelo algoritmo, pois, um erro na extração da coordenada 2D que representa o marcador na imagem, gera um erro nos pontos 3D gerados. Estes fatores são influenciados pelas condições do ambiente onde os marcadores estão presentes.

O ambiente submarino, em altas profundidades, possui diversas restrições e desafios que influenciam na detecção dos marcadores fiduciais. A Figura 1.1, capturada durante uma operação de acoplamento de equipamentos submarinos, exemplifica alguns fatores responsáveis por gerar limitações aos sistema de marcadores. Estes fatores são: a baixa iluminação do ambiente (a única fonte de iluminação são os iluminadores presentes no ROV), saturação das imagens causada pelas câmeras de alta sensibilidade e o ruído do ambiente (alta salinidade e partículas em suspensão).



**Figura 1.1:** Imagem capturada durante uma operação de acoplamento de equipamentos submarinos. (Fonte: Petrobras)

## 1.1 Definição do problema

O problema que este trabalho de conclusão de curso (TCC) visa solucionar é a detecção de pontos característicos em equipamentos submarinos. Estes pontos, juntamente com um par de câmara estéreo calibradas, possibilita a extração de informações que podem auxiliar operações de acoplamento de equipamentos submarinos. Para isso, é necessário que os pontos extraídos sejam precisos (o erro do ponto extraído pelo algoritmo de detecção e o ponto real seja mínimo) e a quantidade de marcadores presentes na cena detectáveis seja acurado (quantidade média de marcadores detectados seja próximo da quantidade presente na cena).

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma investigação no estado da arte sobre sistema de marcadores fiduciais e a influência das restrições e desafios do ambiente submarino sobre estes marcadores. A finalidade dessa investigação é auxiliar no desenvolvimento de um sistema de marcador fiducial robusto ao cenário definido na seção anterior. Para o problema apresentado, este sistema de marcador fiducial, deve apresentar:

- Uma taxa de detecção acurada, ou seja, o padrão deve ser detectável em algumas condições impostas pela operação, como: quando a posição do padrão estiver em perspectiva na imagem e/ou a uma distância de 2 a 6 metros da câmara;
- Uma detecção precisa, isto é, o erro do ponto 2D deve ser abaixo de 1 pixel entre o ponto extraído pelo algoritmo e o ponto real;
- O algoritmo deve detectar múltiplos marcadores na cena;
- A taxa de execução do algoritmo de detecção deve apresentar taxas próximas de execução em tempo real (24 quadros por segundo).

## 1.3 Estrutura do documento

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Apresenta os trabalhos da literatura relacionados a rastreamento de objetos. Alguns desses trabalhos serviram como base para o desenvolvimento do sistema de marcador fiducial proposto neste documento.
- **Capítulo 3** - Descreve de forma detalhada a proposta de sistema de marcador fiducial foco desta pesquisa, abordando tanto o design como o algoritmo de detecção associado ao marcador proposto.

- **Capítulo 4** - Expõe e apresenta os testes realizados para avaliar e validar o sistema de marcador fiducial proposto neste documento.
- **Capítulo 5** - Este capítulo detalha as conclusões obtidas com os resultados apresentados. Descreve também direcionamentos para a continuação do trabalho, com novas investigações e melhorias a serem desenvolvidas.

# 2

## Trabalhos Relacionados

Rastrear um objeto em uma sequência de imagens significa, identificar a posição deste objeto na imagem de forma contínua, enquanto o objeto ou a câmera se movimentam ao longo da sequência. Para realização desta atividade, há uma variedade de abordagens, na qual a sua escolha depende de fatores como formato do objeto, cenário de execução da técnica e graus de liberdade da câmera e do objeto. Neste capítulo serão expostas algumas abordagens do estado da arte, elencando seus pontos positivos e negativos para o cenário de interesse neste trabalho.

### 2.1 Rastreamento de Objetos

Técnicas de rastreamento de objeto são utilizadas para identificar a localização de um objeto em uma dada imagem ou cena, esta localização juntamente com a matriz da câmera permite determinar a pose relativa do objeto em relação a câmera. A busca pelo objeto é frequentemente realizada utilizando características significantes que identifiquem o objeto na imagem.

Características naturais do objeto, como sombras, arestas e texturas, podem ser utilizadas para identificar os mesmos, não havendo necessidade de alteração do ambiente para identificação do objeto.

Características artificiais, podem ser classificadas como ativas ou passivas. Características artificiais ativas, são aquelas que utilizam de alguma fonte de energia, como iluminadores e sonares. Características artificiais passivas, também conhecidas como fiduciais, são características que não utilizam uma fonte de energia, como código de barras e padrões de marcação. Por conta da impossibilidade de fornecer energia aos marcadores no cenário de aplicação; torna-se inviável a utilização de características artificiais ativas, assim as características artificiais apresentadas e discutidas serão apenas fiduciais.

A seguir, serão apresentados e discutidos métodos de detecção de características naturais e posteriormente métodos de detecção de características artificiais presentes no estado da arte.

### 2.1.1 Características Naturais

O uso de marcadores para rastreamento de objetos requer que o cenário seja modificado, porém algumas vezes essas mudanças não são possíveis. Assim, torna-se necessária a utilização de características já presentes no cenário, como: sombras, arestas e texturas; para realização do rastreamento do objeto. Para isso, pode ser utilizado algumas abordagens, como: rastreamento baseado em modelos ou rastreamento baseado em cálculo de correspondência como proposto por [BAY; TUYTELAARS; VAN GOOL \(2006\)](#) e [LOWE \(1999\)](#). Porém, em cenários com grande quantidade de ruído no ambiente (partículas em suspensão, alta salinidade, baixa resolução das imagens e animais submarinos), as características naturais dos objetos são perdidas, desta forma não é trivial a detecção do objeto. Tendo em vista esta dificuldade, a utilização de características artificiais para identificação do objeto pode ser vantajosa.

### 2.1.2 Características Artificiais - Fiduciais

Marcadores fiduciais vêm sendo usados em diversas aplicações ao longo dos anos. A localização do marcador fiducial na imagem pode ser medida de forma mais precisa e acurada, em comparação com a utilização de características naturais. Esta pesquisa adotou a classificação de fiduciais apresentada em [LEPETIT; FUA et al. \(2005\)](#). Essa divisão, apresenta dois tipos distintos de fiduciais. O primeiro, chamado de "Fiducial Planar", é representado por fiduciais com formato planar, constituído por bordas identificáveis, de modo que com apenas um fiducial planar, juntamente com a matriz de câmera, se torna possível extrair a pose do objeto. O segundo tipo, chamado de "Fiducial Pontual" é comumente representado por um formato circular, de forma que cada fiducial oferece um ponto 2D de correspondência entre a cena e a imagem.

#### 2.1.2.1 Planar Fiducial - Marcador Planar

Marcadores planares são amplamente utilizados no campo de Realidade Aumentada (RA). O design dos marcadores planares são projetados com uso de uma borda quadrada, facilitando a detecção e a extração da pose da câmera. O design é concluído com um padrão interno único, assim possibilitando a identificação do marcador. Entre os diversos marcadores planares, dois se destacam: o marcador proposto por [KATO; BILLINGHURST; POUPYREV \(2000\)](#) e marcador apresentado por [FIALA \(2005\)](#). Estes dois marcadores apresentam a mesma borda preta quadrada, porém se diferenciam nos seus padrões internos e os métodos realizados para identificação das bordas e padrões internos, como pode ser visto na Figura 2.1.





**Figura 2.1:** Marcadores Planar Fiducial do estado da arte (da esquerda):ARTag [FIALA \(2005\)](#) e ARToolKit [KATO; BILLINGHURST; POUPYREV \(2000\)](#)

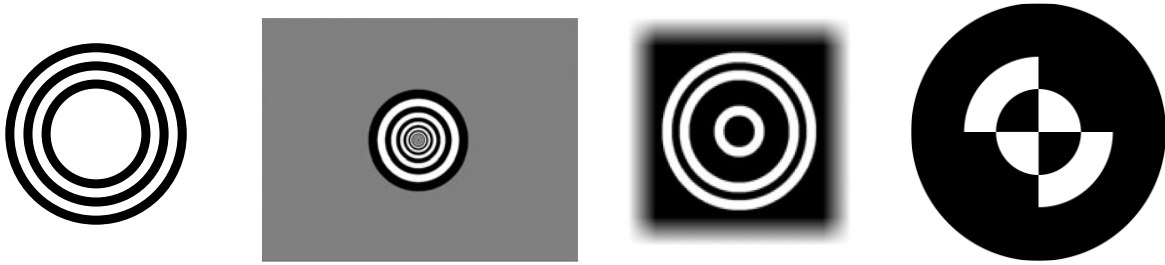
O trabalho de [KATO; BILLINGHURST; POUPYREV \(2000\)](#) vem sendo utilizado nos campos de RA e de Interação Humano Computador (IHC). O design deste marcador consiste de uma borda preta quadrada e um padrão binário variado no seu interior. Para detecção do marcador, primeiramente é identificada a sua borda quadrada. Essa detecção é feita encontrando grupos de pixels conectados, onde suas intensidades estão abaixo de um limiar definido como entrada do algoritmo de detecção do marcador, o contorno deste grupo é definido como "candidato a marcador" e seus cantos são utilizados para remoção da perspectiva da imagem. Após a detecção das bordas do marcador é utilizado um casamento de padrões tendo como base uma biblioteca de identificadores de marcadores conhecidos. Por utilizar um método de limiarização, este marcador não é apropriado em cenários que apresentam mudança de iluminação.

[FIALA \(2005\)](#) propõe um marcador fiducial projetado para identificação de objetos e extração de pose confiável, em um cenário com variação nas condições de iluminação. Assim como o trabalho de [KATO; BILLINGHURST; POUPYREV \(2000\)](#), o design do marcador consiste de uma borda preta quadrada e uma matriz binária como padrão interno. De modo similar aos demais fiduciais planares, em [FIALA \(2005\)](#) primeiramente busca-se identificar sua borda quadrada, para isso é utilizado um método de detecção de bordas. Pelo fato de utilizar um método de detecção de bordas, o mesmo se torna mais robusto a variações de iluminação, em comparação aos demais fiduciais planares que utilizam métodos de limiarização. Após a identificação da borda do marcador, é necessária a identificação do padrão interno do marcador, este padrão interno é gerado através de técnicas de codificação digital.

Como foi mostrado anteriormente, os trabalhos de [KATO; BILLINGHURST; POUPYREV \(2000\)](#) e o de [FIALA \(2005\)](#) precisam de apenas um marcador para gerar a pose do objeto em relação a câmera. Porém, apesar do trabalho de [FIALA \(2005\)](#) ser robusto a variação de iluminação, o mesmo não foi projetado para cenários com as limitações encontradas no cenário considerado neste trabalho. Características da cena como, tamanho limitado do marcador, obliquidade do plano do marcador para câmera e efeito de borramento causado pela compensação da câmera, fazem com que esses marcadores sejam inviáveis de serem utilizados no cenário submarino. Como solução, é necessário o emprego de um marcador fiducial que seja detectável em cenários ruidosos, embora extraia menos informação do marcador.

### 2.1.2.2 Fiducial Pontual - Marcador Pontual

Marcadores pontuais são utilizados em sistemas de guia e ancoragem de veículos autônomos e veículos operados remotamente. Os designs de marcadores pontuais, geralmente, são projetados com um formato circular. Em particular, este design é utilizado pelas facilidades apresentadas pelo marcador circular, tais como: tamanho compacto, independência na orientação da câmera e facilidade na detecção do centroide (BOSE; AMIR, 1990).



**Figura 2.2:** Marcadores Ponto Fiducial do estado da arte (da esquerda): CCTag CALVET et al. (2016), SSL NEGRE; PRADALIER; DUNBABIN (2008), Prasad PRASAD; CHANDRAN; BROWN (2015) e Tsai TSAI (2012).

Apesar das facilidades de detecção trazidas por marcadores pontuais, estes apenas retornam uma correspondência 2D entre a cena e a imagem. Portanto, é necessário a utilização de mais marcadores e métodos para extração da pose do objeto. No artigo de NEGRE; PRADALIER; DUNBABIN (2008) foi realizada uma alteração do marcador proposto por BRIGGS et al. (2000), utilizando um padrão com 3 marcadores auto similares para possibilitar a extração da pose do marcador. Porém, como citado em CALVET et al. (2016), as propriedades de auto similaridade só funcionam em teoria para aquisições de imagens *front-parallel* por câmeras calibradas.

No trabalho de TSAI (2012) foi proposto um marcador para uso em sistema de ancoragem automática. O seu algoritmo utilizado para detecção explora duas técnicas de limiarização diferentes para selecionar as áreas de interesses. Primeiramente é aplicado um *adaptive threshold*, para selecionar as áreas com presença do marcador é utilizada uma técnica de conexão de componentes baseada na política de 4-vizinhança. Apesar deste processo selecionar as áreas com os marcadores, as componentes internas do marcador podem não ser capturadas. Para recuperar as componentes internas é utilizada uma técnica de *local threshold* e de forma similar é aplicada uma técnica de conexão das componentes para selecionar a área de interesse. A partir dos resultados de cada técnica de limiarização é realizada uma mistura das imagens, assim recuperando as componentes internas e externas do marcador. Para validar as áreas de interesse são utilizadas as características de proporcionalidade das áreas de preto e branco do marcador. Por utilizar a proporcionalidade entre as áreas de preto e branco do marcador para sua validação, este marcador se torna apto aos efeitos presentes no cenário de interesse desta pesquisa, como: o efeito de saturação na imagem decorrente da compensação aplicada pela câmera e o efeito da distância nas componentes de alta frequência dos marcadores, causada pela propagação da luz.

Os marcadores propostos em [CALVET et al. \(2016\)](#) e [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) são similares ao proposto neste TCC. Em [CALVET et al. \(2016\)](#) é apresentado um marcador fiducial projetado para aplicações tendo em conta cenários com: variações de distância e angulação, oclusão parcial e rápido movimento de câmera. O design do marcador consiste da combinação de 3 a 4 anéis concêntricos. O algoritmo de detecção do marcador busca encontrar regiões que possam suportar uma porção de contorno externo do marcador proposto, esta região é denominada pelo autor como *outer elliptical arc*. Essas regiões devem obedecer algumas propriedades geométricas, como convexidade e suavização, além de restrições fotométricas vindas de propriedades diferenciais de imagens em tons de cinza, relacionada ao campo de gradiente dentro de uma imagem de um marcador circular. Porém, alguns efeitos do cenário tornam inviável sua detecção, como o efeito da distância nas componentes de alta frequência dos marcadores. Este efeito faz com que as características utilizadas na detecção sejam perdidas, assim impossibilitando os marcadores de serem detectados.

Em [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) é proposto um marcador fiducial projetado para aplicações utilizando quadricoptero. Seu design consiste de um fundo quadrado preto e o seu interior contém um conjunto de anéis podendo variar de 2 a 4 anéis. Seu algoritmo de detecção é baseado em 4 (quatro) etapas. A primeira aplica um filtro de Gabor na imagem para isolar localizações de potenciais padrões. Na segunda etapa, são formados *clusters* utilizando a resposta do filtro de Gabor. A terceira etapa aplica uma Análise de Componente Principal (ACP) em cada grupo para determinar a direção que não é afetada pelo borramento. Na última etapa o perfil da intensidade das regiões extraídas na etapa anterior é usado para classificar o marcador. Por conta das características do cenário, a resposta do anel interno ao filtro de Gabor pode ser muito baixa, portanto o marcador pode não ser detectado corretamente.

O próximo capítulo apresenta a proposta do sistema de marcador fiducial deste trabalho, tanto o design como o algoritmo de detecção associado ao marcador proposto.



# 3

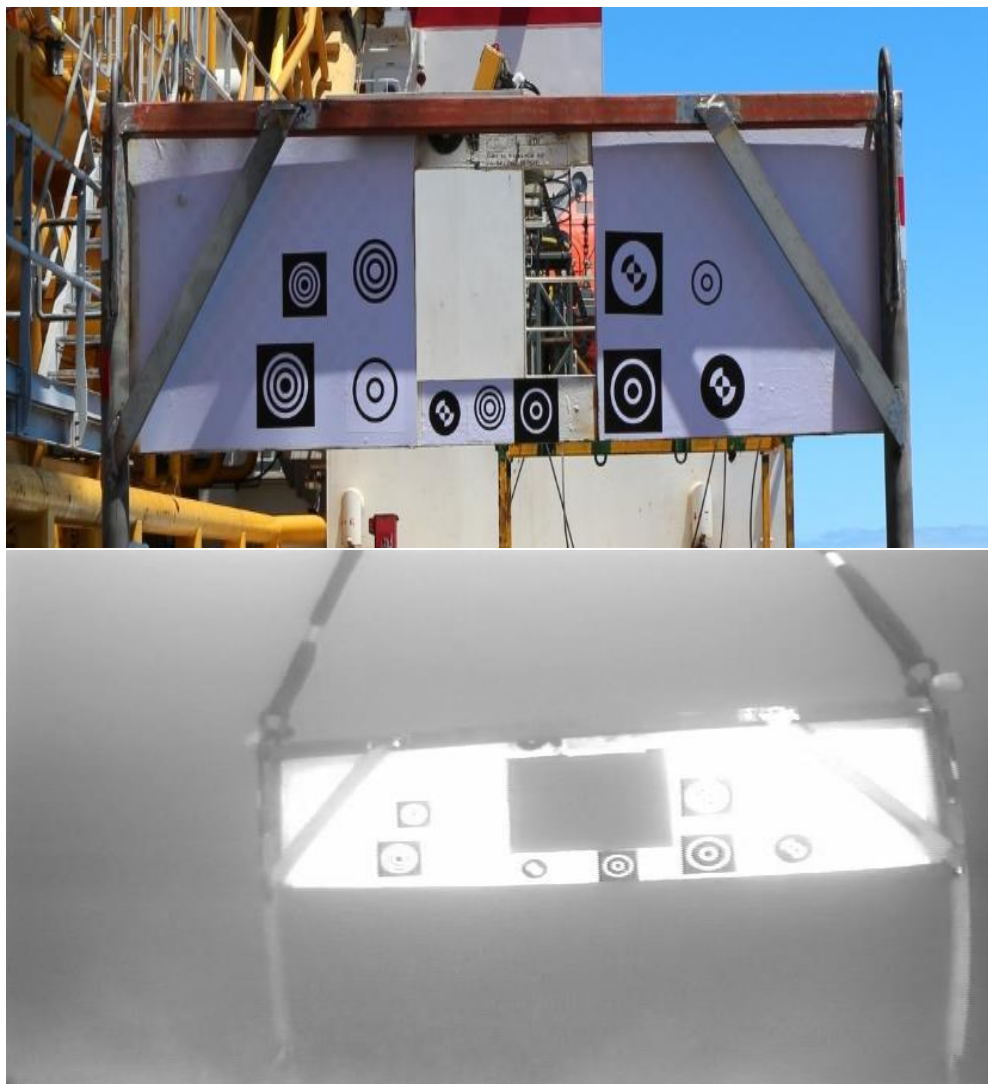
## Marcador de Topos

Rastreamento de objetos é uma importante tarefa no campo da visão computacional, permitindo identificar e rastrear objetos de interesse em imagens, como equipamentos em um cenário, por exemplo, o monitoramento de instalações de tubulações submarinas. A primeira etapa para realização do rastreamento de um objeto é a identificação de *features* já conhecidas. Uma *feature* é um ponto específico, conhecido previamente, o qual o algoritmo é capaz de detectar sob condições variadas. Porém, o processo de identificação das *features* nem sempre é trivial, e por isso é comum a utilização de marcadores fiduciais para desempenhar o papel de *feature*.

Marcadores fiduciais facilitam a identificação e acurácia na detecção de pontos conhecidos na imagem. Um sistema de marcação fiducial é composto por duas partes, um design composto de elementos visuais e um algoritmo de detecção apto a identificar tais elementos. Com a criação do design e utilizando um algoritmo robusto, marcadores fiduciais podem ser utilizados para rastreamento de objetos, mesmo em cenários desafiadores, sob influência de diversos tipos de ruído. Neste capítulo, serão especificados, o design e algoritmo de detecção estabelecidos para o marcador proposto neste TCC.

### 3.1 Design do Marcador

O ambiente submarino possui diversas restrições e desafios que precisam ser levados em consideração para a modelagem do design do marcador. Para verificação das restrições e desafios do cenário, foi realizado um experimento de visualização, com intuito de avaliar a influência do cenário sobre os marcadores. A Figura 3.1, apresenta duas imagens de um padrão com diversos marcadores do estado da arte. Estas imagens foram capturadas mostrando o padrão na superfície e no fundo do mar, a uma profundidade de aproximadamente 2000 metros. Posteriormente, foi analisado o comportamento dos marcadores no ambiente submarino, buscando identificar fatores que devem ser considerados para definição do design do marcador. Os fatores identificados são: a saturação das imagens (câmeras de alta sensibilidade) e o ruído do ambiente (alta salinidade, partículas em suspensão e animais aquáticos).



**Figura 3.1:** Marcadores do estado da arte, CCTag, PRASAD e Tsai, utilizados no experimento de visualização. (Fonte: Petrobras)

Observando as imagens do experimento com os marcadores, podem ser notados algumas particularidades do cenário que tornam os marcadores propostos por [CALVET et al. \(2016\)](#) e [TSAI \(2012\)](#) inviáveis para o nosso experimento. A primeira delas é o efeito causado pelo tipo de câmera utilizada para este ambiente. Por conta da pouca iluminação presente no ambiente e do auto balanceamento de contraste aplicado em compensação, ocorre um efeito de saturação nas imagens. A segunda é o efeito da distância nos componentes de alta frequência dos marcadores, esses componentes são perdidos por conta da propagação da luz na água. Estes efeitos fazem com que as características utilizadas na detecção sejam perdidas, portanto, impossibilitando os marcadores de serem detectados.

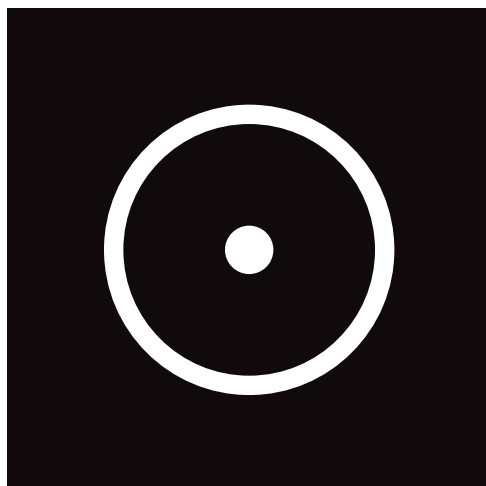
O marcador proposto [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) conseguiu preservar as características utilizadas na detecção apesar das particularidades do cenário. Porém, a utilização de um anel interno, torna esse marcador suscetível há perdas destas características, tal consequência é causada pelo efeito de *Light Scattering* [ØGENDAL \(2013\)](#) presente no meio

subaquático. Nesta situação, o anel interno cresce na imagem e acaba sendo visualizado como um círculo central, como visto na Figura 3.2, impossibilitando a detecção do marcador. Levando em conta as observações extraídas dos experimentos, podemos propor um design de marcador robusto as particularidades do cenário.



**Figura 3.2:** Resultado do efeito de *Light Scattering*, sobre o marcador PRASAD, em razão do meio subaquático. (Fonte: Petrobras)

O design do marcador proposto utiliza um padrão circular, em detrimento da utilização de um marcador planar, apesar do design proposto conter um fundo preto, seu formato não é utilizado na detecção. Em particular, esta escolha foi feita por conta das facilidades trazidas pelo marcador circular, tais como: tamanho compacto, independência na orientação da câmera e facilidade na detecção do centroide [BOSE; AMIR \(1990\)](#), porém, este marcador sozinho não é permite determinar a orientação do objeto. Levando em conta os marcadores do estado da arte utilizados no experimento de visualização, foi possível ver que o marcador apresentado em [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) sofreu menos influência das particularidades do cenário. Assim, o design do marcador proposto nesse trabalho, foi baseado no design do marcador de [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#). O nosso marcador é constituído de um fundo preto, um círculo central e um anel ao redor do círculo, como apresentado Figura 3.3. A distribuição dessas características deve ser feita com uma margem de segurança, para que não sejam perdidas por conta das influências do cenário.



**Figura 3.3:** Design do marcador proposto nesse trabalho.

## 3.2 Algoritmo de Detecção do Marcador

Dadas as especificações do marcador definidas na Seção 3.1, ainda é necessário a definição de um algoritmo que consiga detectá-lo com robustez na cena. Para atender este requisito, foi definido um algoritmo de detecção em 3 (três) etapas sequenciais, com objetivo de extrair os pontos que representam os centros dos marcadores presentes em uma imagem de entrada.

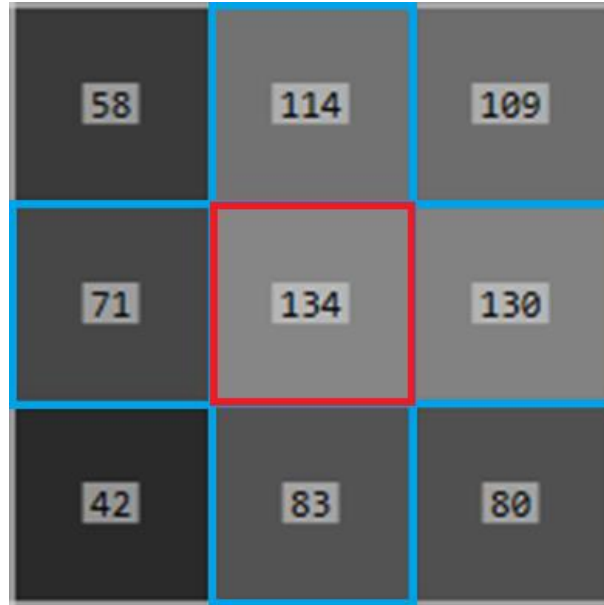
Para inicializar a detecção é importante buscar uma *feature* de fácil detecção. Assim, a primeira etapa procura na imagem o círculo interno do marcador, gerando candidatos a marcador. A partir dos candidatos encontrados é necessário filtrar aqueles que realmente são marcadores, utilizando outra *feature* do seu design. Deste modo, a segunda etapa avalia a região ao redor dos candidatos em busca do anel referente ao marcador, assim validando o candidato.

Apesar de o círculo interno ser detectado na primeira etapa, ruídos causados pelo cenário podem deslocar o centroide geométrico do círculo em comparação ao centro ideal do marcador. Logo, é necessária uma nova computação de um centroide para o marcador. O terceiro passo busca refinar o centroide do marcador utilizando pontos localizados no seu anel.

### 3.2.1 Extração de Candidatos

A etapa de extração de candidatos tem por objetivo detectar o círculo central do marcador. Este círculo central pode ser visto como uma região composta por um ou vários pixels de mesma intensidade, cujos vizinhos, que representam o fundo preto do marcador, tenham intensidade menor, sendo esta denominada região de topo Figura 3.4. Após a detecção das regiões de topo, é calculado o centroide geométrico de cada região.





**Figura 3.4:** O pixel com contorno vermelho representa a região de topo, enquanto os pixels com contorno azul representam a vizinhança desta região de topo.

O primeiro passo da extração de candidatos é classificar um dado pixel como sendo um pixel pretendente a região de topo ou não. Uma região de topo deve conter um conjunto de pixels conectados que tenham a mesma intensidade e os vizinhos desse conjunto sejam de menor intensidade. Dada a imagem  $I$ , cada pixel  $p$  da imagem, localizado na coordenada  $(x, y)$  será classificado segundo o critério  $C$

$$C(p) = \begin{cases} \text{Região de topo,} & \text{se } \forall q \in N_4(p) \ I(p) > I(q) \\ \text{Pretendente a região de topo,} & \text{se } \forall q \in N_4(p) \ I(p) \geq I(q) \wedge \exists q \in N_4(p) \ I(p) = I(q) \\ \text{Descartado,} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

baseado na política de 4-vizinhanças, definida pelo conjunto

$$N_4(p) = \{(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)\}. \quad (3.1)$$

Este passo de classificação divide os pixels em 3 (três) categorias: região de topo, pretendente a região de topo e descartado, apenas analisando os vizinhos diretos de cada pixel. Quando o critério de classificação enquadra um pixel como pretendente a região de topo, não é possível garantir que há ali um topo apenas analisando os vizinhos diretos, sendo necessário realizar uma etapa de análise dos vizinhos de todos os pixels pretendentes conexos.

A verificação de uma região pretendente tem início em um pixel pretendente aplicando um critério de classificação aos seus vizinhos. Os vizinhos que possuírem mesma intensidade são empilhados para análise posterior; os vizinhos de intensidade menor são descartados. Caso haja algum pixel vizinho de intensidade maior, toda a região é descartada. Esse procedimento é realizado para todos os pixels da região enquanto existir elementos na pilha; ou até que a região

seja descartada. Ao final do processo, caso a região não seja descartada, ela é classificada como uma região de topo.

Para cada região de topo, é calculado o centroide para representar esta região. O centroide geométrico de uma região de topo é calculado como a média aritmética das coordenadas de todos os pixels pertencentes ao topo. Após computar os centroides de todos os candidatos a marcador é necessário validar se aquela região realmente representa um marcador ou não, procedimento o qual é realizado na próxima fase do algoritmo.

### 3.2.2 Validação do Marcador

Essa etapa tem como propósito validar ou descartar os candidatos a marcadores. Esta validação é feita avaliando a região no entorno dos pontos candidatos em busca de uma região que representa o anel do marcador.

Para encontrar o anel do marcador, a técnica precisa analisar os pixels em torno da região de topo que representa o círculo central de um possível marcador. Por conta do formato circular do anel, essa avaliação é feita através de  $N$  caminhos dispostos em radiais equiangulars de tamanho  $M$ , partindo do centroide da região de topo, como representado na Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Exemplo de busca radial utilizando  $N = 8$ .

Seja  $A$  o conjunto de centroides das regiões de topos candidatas a marcador, para cada centroide  $p \in A$ , o caminho  $R$  na radial  $n$  é definido por

$$R_n(p) = \{p + m * \delta d \mid 1 \leq m \leq M\}, \quad (3.2)$$

sendo  $d = [\sin(\theta), \cos(\theta)]$ , onde  $\theta = n * 2 * \pi / N$ . Dado os  $N$  caminhos ao redor de  $p$ , na radial  $n$ , procura-se em  $R_n$  por conjuntos de pixels conectados que tenham a mesma intensidade e os vizinhos destes conjuntos sejam de menor intensidade. Esta busca é feita de forma similar a

busca de regiões de topos feita na extração de candidatos, agora utilizando o critério  $D$

$$D(B) = \begin{cases} \text{Região de topo,} & \text{se } \forall q \in N_2(B) \wedge \forall r \in BI(r) > I(q) \\ \text{Não região de topo,} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

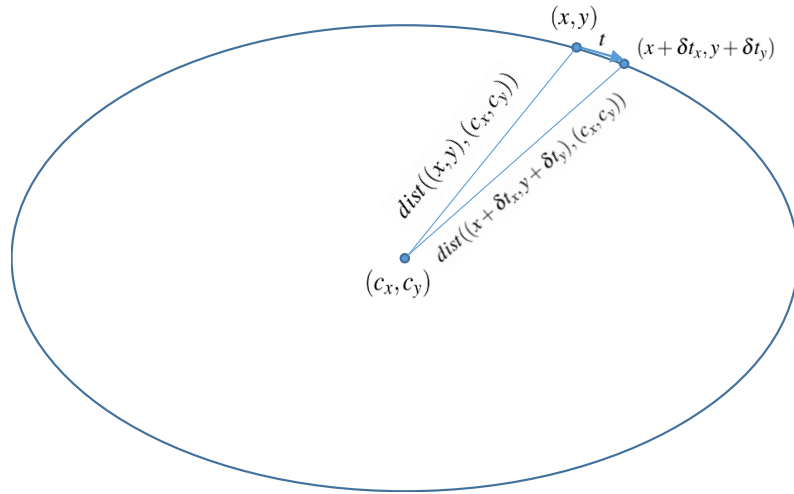
sendo  $B$  o conjunto de pontos subsequentes e conectados do caminho  $R_n(p)$  aplicando a política de 2-vizinhança, definido pelo conjunto

$$N_2(R_n(p)_m) = \{(R_n(p)_{m+1}), (R_n(p)_{m-1})\}, \quad (3.3)$$

onde as intensidades dos pontos do conjunto  $B$  são iguais. Conhecendo a região ao redor dos candidatos a marcador, é mandatório verificar a existência do anel do marcador.

Para realizar a validação do anel do marcador é necessário avaliar se os pontos que formam este anel estão dispostos de forma equidistante ao centro do anel, porém quando visto em perspectiva, o anel passa a ter um formato de uma elipse. No entanto, uma elipse pode ser degenerado a uma circunferência, assim o anel do marcador pode ser representado, de forma geral, através de uma elipse  $E$ . Sendo  $(x, y)$  a coordenada de um ponto referente a  $E$ , o ponto  $(c_x, c_y)$  o centro de  $E$  e  $\vec{t}$  o vetor tangente a  $E$  em  $(x, y)$ , as distâncias de  $(x, y)$  e o ponto subsequente de  $(x, y)$  pertencente a elipse  $E$  na direção de  $\vec{t}$ , a  $(c_x, c_y)$  como visto na Figura 3.6 são aproximadamente iguais, ou seja,

$$\text{dist}((x, y), (c_x, c_y)) \approx \text{dist}((x + \delta t_x, y + \delta t_y), (c_x, c_y)). \quad (3.4)$$



**Figura 3.6:** Exemplo da distância aproximadamente iguais de pontos subsequentes da elipse  $E$  ao centro  $((c_x, c_y))$ .

Assim, aplicando uma discretização na elipse  $E$ , dividindo-a em  $K$  setores  $s$ , onde  $K < N/2$  e distribuídos de forma equiangulares ao centro da elipse. Então sejam dois pontos  $(x, y)$  e  $(k, l)$  pertencentes a um mesmo setor  $s$ , as distâncias de ambos ao centro da elipse são aproximadamente iguais, ou seja,

$$\text{dist}((x, y), (c_x, c_y)) \approx \text{dist}((k, l), (c_x, c_y)). \quad (3.5)$$

Então, para que haja uma elipse em torno de  $p$ , os  $N/K$  topos pertencentes a este setor devem ser aproximadamente equidistantes de  $p$ . Considerando as variações do tamanho do marcador, é necessário que o espaço aceitável entre os topos pertencentes a um mesmo setor seja proporcional à própria distância do topo ao ponto  $p$ . Caso os  $N/K$  caminhos de  $R_n$  pertencentes a esse setor contenham um topo sendo observado por uma janela de tamanho proporcional à distância do topo ao ponto  $p$ , considera-se que o setor observa um topo. Se todos os  $K$  setores respeitarem a condição, aquele  $p$  é considerado um marcador.

### 3.2.3 Recálculo do Centro

Essa etapa tem como objetivo, refinar o ponto que representa o centroide do marcador. Apesar do ponto  $p$  ser a representação encontrada do centroide no círculo central, o mesmo pode se encontrar deslocado em comparação com o ponto ideal do centro do marcador. Este efeito é causado pela presença de ruídos do cenário na imagem. Assim, torna-se necessário um novo cálculo do centroide do marcador.

Após a validação do marcador são encontrados  $N$  topos que representam o anel do marcador. Aproveitando esses  $N$  topos para encontrar um novo ponto que represente o centro do marcador, pode se dissipar o erro causado pelo ruído do cenário. Assim, é realizado um Fit de Elipse como proposto em [GANDER \(2008\)](#), utilizando dos  $N$  topos. Como resultado da técnica é obtido o centro da elipse que representa o anel do marcador, encontrando uma estimativa do centro do marcador menos afetada pelos ruídos. Apesar de tentar reduzir o erro do centro do marcador utilizando o centro da elipse, esse processo é apenas uma aproximação, pois em perspectiva, o centro do marcador não é igual ao centro da elipse do plano de projeção.

## 3.3 Discussão

O marcador proposto em [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) serviu de base para o desenvolvimento do design do marcador proposto nesse trabalho. O algoritmo de detecção proposto por [PRASAD; CHANDRAN; BROWN \(2015\)](#) se baseia na detecção da direção dominante não afetada pelo efeito de borrimento da imagem, para extrair o perfil de intensidade e assim classificar o marcador, diferentemente do algoritmo de detecção proposto neste TCC.

O algoritmo de detecção de [CALVET et al. \(2016\)](#) busca, a partir do anel externo identificar os anéis mais internos para validar o marcador. Diferentemente do marcador proposto neste TCC, que se baseia, a partir do círculo central utilizar o seu anel externo para validar o mesmo.

Apesar de ser projetado para ter uma boa performance levando em consideração todas as características do cenário, o algoritmo de detecção do marcador proposto não trabalha para

---

resolver problemas de oclusão do marcador.

O próximo capítulo apresenta as configurações dos experimentos, junto com os resultados encontrados sobre os sistemas de marcação discutidos.



# 4

## Resultados e Discussões

No Capítulo 3 foi apresentada a proposta de sistema de marcação fiducial deste trabalho. Este capítulo visa validar o sistema proposto utilizando cenários sintéticos e reais. As cenas sintéticas foram produzidas na ferramenta 3DS Max 2018 [AUTODESK \(2018\)](#) o que permitiu obter os valores exatos da projeção do centro do modelo, desta forma foi possível avaliar a precisão da técnica proposta. Os posicionamentos extraídos pela ferramenta serão referenciados como *ground truth* ao longo do restante do texto. Os testes em cenário real foram realizados utilizando imagens obtidas de uma operação de interligação da linha de injeção de gás entre um poço de extração de petróleo e uma planta de produção. Para realizar a avaliação e validação da técnica proposta é necessário a utilização de algumas métricas de avaliação. As métricas utilizadas para avaliar a técnica proposta estão especificadas na próxima seção.

### 4.1 Métricas de avaliação

O resultado do algoritmo proposto a uma dada imagem de entrada é o conjunto de pontos 2D representando as coordenadas dos centros dos marcadores na imagem. Para analisar se o algoritmo é eficiente faz-se necessário definir um conjunto de métricas de avaliação. Uma boa métrica de avaliação deve expressar a solução para um conjunto de números de forma que seja possível avaliar a qualidade desta solução. Para este trabalho foram selecionadas três métricas de avaliação:

- **Precisão e Cobertura:** Esta métrica é comumente utilizada para investigar e compreender a relevância de um conjunto de dados. Para a avaliação do algoritmo proposto, precisão representa a fração de resultados retornados pelo algoritmo que realmente são marcadores, enquanto a cobertura representa a fração de resultados relevantes que são recuperados com êxito. Precisão e cobertura podem ser definidos como,

$$Precisão = \frac{t_p}{t_p + f_p}, \quad (4.1)$$

$$Cobertura = \frac{t_p}{t_p + f_n}, \quad (4.2)$$

onde  $t_p$  é o número de resultados retornados pelo algoritmo que representam um marcador válido,  $f_p$  é o número de resultados retornados que não representam um marcador e  $f_n$  é o número de marcadores que não foram detectados pelo algoritmo.

- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMS):** Esta métrica é comumente utilizada para calcular a diferença entre valores previstos e os valores observados. Os valores previstos serão o *ground truth* obtido pela ferramenta 3DS Max 2018, enquanto os valores observados serão as respostas do algoritmo proposto obtido da imagem de entrada. A variante da equação RMS utilizada será:

$$RMS = \left( \frac{1}{t_p} \sum_{i=1}^{t_p} ((x_i - x_{gt_i})^2 + (y_i - y_{gt_i})^2) \right)^{1/2}, \quad (4.3)$$

onde,  $(x_i, y_i)$  representa o  $i$ -ésimo ponto e  $(x_{gt_i}, y_{gt_i})$  representa o *ground truth* do  $i$ -ésimo ponto. Para um marcador ser considerado válido seu erro RMS deve ser abaixo de 4 pixels.

- **Tempo de execução:** Esta métrica é comumente utilizada para avaliar o desempenho da técnica em relação a sua velocidade de execução. Para a avaliação do algoritmo proposto será utilizada a velocidade de execução da técnica em quadro por segundo (qps). A implementação da técnica proposta utilizada para computação desta métrica serão detalhadas na próxima seção, juntamente com as configurações da máquina onde os experimentos foram realizados.

## 4.2 Implementação e Setup

O algoritmo de detecção do marcador proposto foi implementado no ambiente de programação Visual Studio 2015 utilizando a linguagem de programação C++ e as bibliotecas Eigen [GUENNEBAUD G. \(2018\)](#) e OpenCV [OPENCV \(2018\)](#). Eigen é uma biblioteca que oferece algoritmos de álgebra linear, sendo utilizada para representar matrizes, vetores e suas operações. A biblioteca OpenCV foi usada para leitura e processamento da imagem permitindo a redução de ruídos.

Visando a otimização do tempo de execução do algoritmo de detecção, algumas etapas podem ser paralelizadas. A versão utilizada nos experimentos deste trabalho utiliza a biblioteca OpenMP para paralelizar a aquisição das radiais do candidato a marcador, na etapa de validação do marcador.

O computador utilizado para a execução do algoritmo possui um processador Intel Core i7-6700 com 3.40 GHz, 16GB de memória RAM e placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 520



com 1GB de memória dedicada, executando o sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

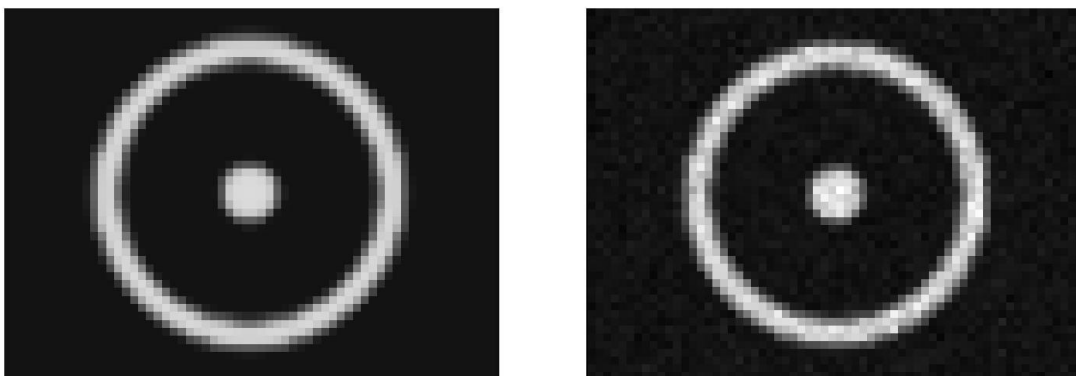
As próximas seções irão descrever cada cenário de avaliação apresentando os resultados obtidos, e uma breve discussão.

### 4.3 Experimentos Sintéticos

Foram criados 4 (quatro) cenários sintéticos na ferramenta Autodesk 3DS Max 2018 [AUTODESK \(2018\)](#), dos quais 3 (três) cenários são simples, por conter apenas um marcador na cena. O outro cenário, considerado mais complexo, tem como objetivo simular aproximadamente as condições do cenário de aplicação, como: a presença de múltiplos marcadores, objetos na cena e movimentação de câmera. Para cada cenário foram gerados um conjunto de imagens do cenário e o *ground truth* dos marcadores presentes nas imagens de entrada.

Para cada imagem gerada pelo 3DS Max foi criada uma segunda imagem equivalente, com a presença de ruído. Para geração deste ruído foi utilizado o ruído de Poisson ([HASINOFF \(2014\)](#)).

O ruído de Poisson é um ruído eletrônico modelado por um processo de Poisson. Em sensores óptico, o ruído de Poisson está associado à independência da chegada das partículas de fóton ao sensor. Desta forma, um sinal depende da independência de um sinal adjacente. Em ambiente de altas profundidades, onde não há iluminação natural e apresenta limitações de fóton devido a baixas condições de iluminação, são simulados através do uso de ruído de Poisson, como mostrado na Figura 4.1. Este ruído gera múltiplas regiões de topos sobre a área do marcador.



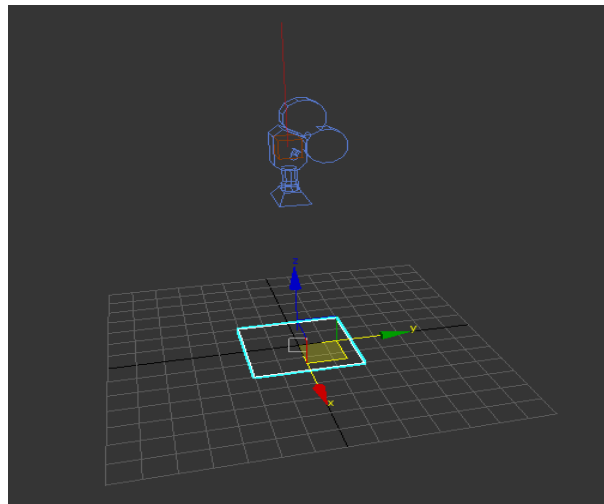
**Figura 4.1:** Exemplo da aplicação do ruído de Poisson sobre o marcador proposto.

Além do algoritmo proposto (denominado Marcador de Topos ou *MT*), foi avaliada uma versão sem a etapa de recálculo do centroide (denominado Marcador de Topos Modificado ou *MTM*). A saída da técnica *MTM* é o próprio candidato a marcador validado. Com esta avaliação comparativa buscamos justificar a etapa de recálculo do centroide. Os cenários utilizados na avaliação serão detalhados nas próximas subseções, e os resultados obtidos serão discutidos.

### 4.3.1 Cenários Simples

As cenas criadas usando os cenários simples contém uma câmera e uma superfície planar com o marcador proposto. A superfície planar do marcador foi criada com dimensões de 30x30cm. A câmera criada no 3DS não apresenta distorções. O tamanho da imagem produzida é de 640 pixels de largura por 480 pixels de altura.

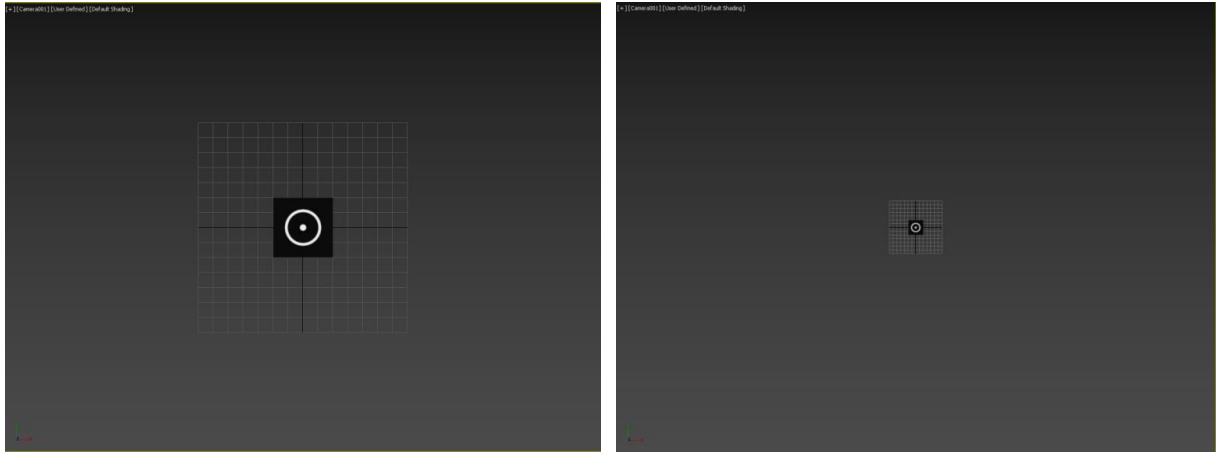
Cada cenário apresenta uma movimentação do par (marcador, câmera) diferente, esta movimentação é aplicada utilizando o sistema de coordenadas do 3Ds Max mostrado na Figura 4.2, utilizando a notação  $(X, Y, Z)$  para representar a coordenada tridimensional do objeto, expressa em cm. A seguir, as cenas serão detalhadas e os resultados obtidos discutidos.



**Figura 4.2:** Cena simples apresentando o sistema de coordenadas do 3Ds Max.

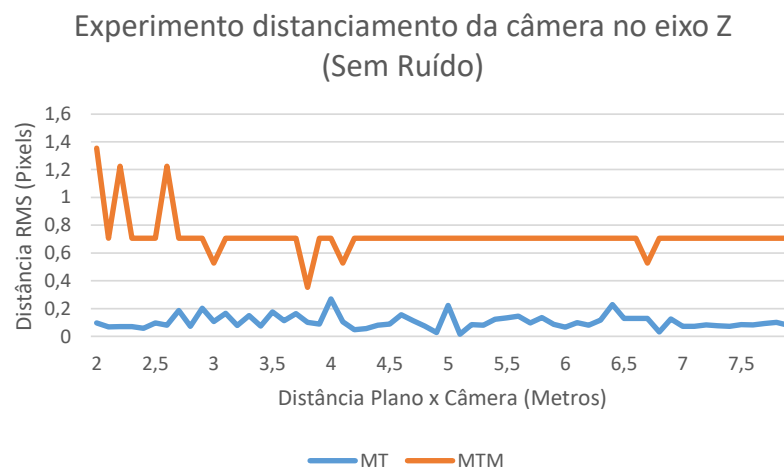
#### 4.3.1.1 Distanciamento da câmera no eixo Z

Este cenário apresenta o marcador fixo na posição  $(0,0,0)$  e a câmera inicialmente posicionada a 2 metros do marcador, na coordenada  $(0,0,200)$ . A câmera se afasta do marcador no eixo Z a uma velocidade constante de  $10\text{ cm/quadro}$  até alcançar uma distância de 8 metros. Duas imagens obtidas no experimento são apresentadas na Figura 4.3.

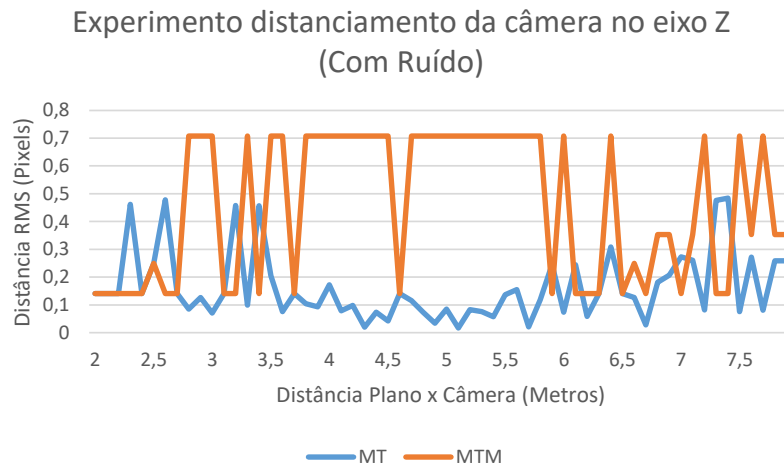


**Figura 4.3:** Imagens do experimento de distanciamento da câmera no eixo Z (da esquerda): Marcador a 2 metros da câmera e marcador a 8 metros da câmera.

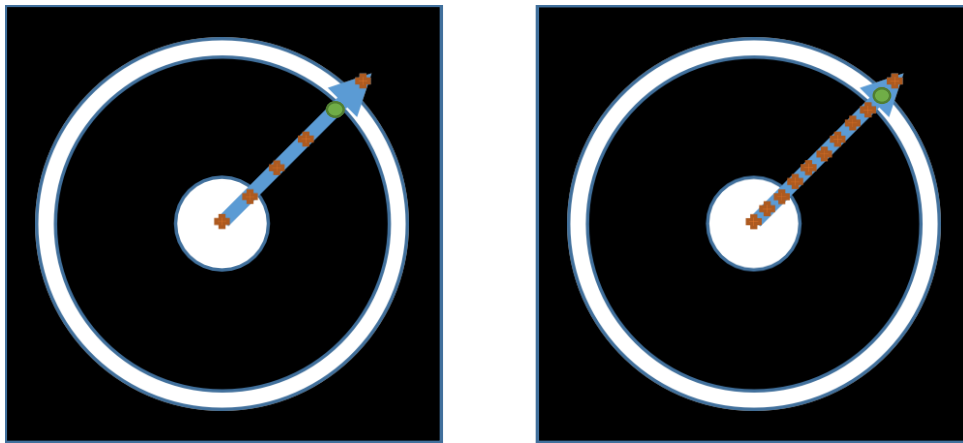
Observando os gráficos da Figura 4.4 e da Figura 4.5, pode ser vista uma instabilidade na técnica. Esta instabilidade provém dos pontos do anel selecionados para fazer o fit de elipse. Pelo fato dos pontos que representam o caminho na radial serem definidos através de um vetor unitário na direção  $n$ , acarreta em um problema de amostragem para seleção dos pontos que representam os picos do anel, como visto na Figura 4.6.



**Figura 4.4:** Gráfico da distância RMS do centro encontrado pelo algoritmo e *ground truth* por distância entre plano do marcador e câmera, no caso sem a presença de ruído.



**Figura 4.5:** Gráfico da distância RMS do centro encontrado pelo algoritmo e *ground truth* por distância entre plano do marcador e câmera, com a presença de ruído.



**Figura 4.6:** Problema da amostragem sobre o caminho  $R$ , onde as cruzeiras laranjas representam pontos amostrados do caminho  $R$  e o ponto verde o ponto de pico daquele caminho. Da esquerda para direita: pontos sobre o caminho  $R$  utilizando um deslocamento de um pixel na radial  $n$  e amostragem dos pontos utilizando deslocamento de meio pixel na radial  $n$ .

**Tabela 4.1:** Resultados do experimento de distanciamento da câmera no eixo Z

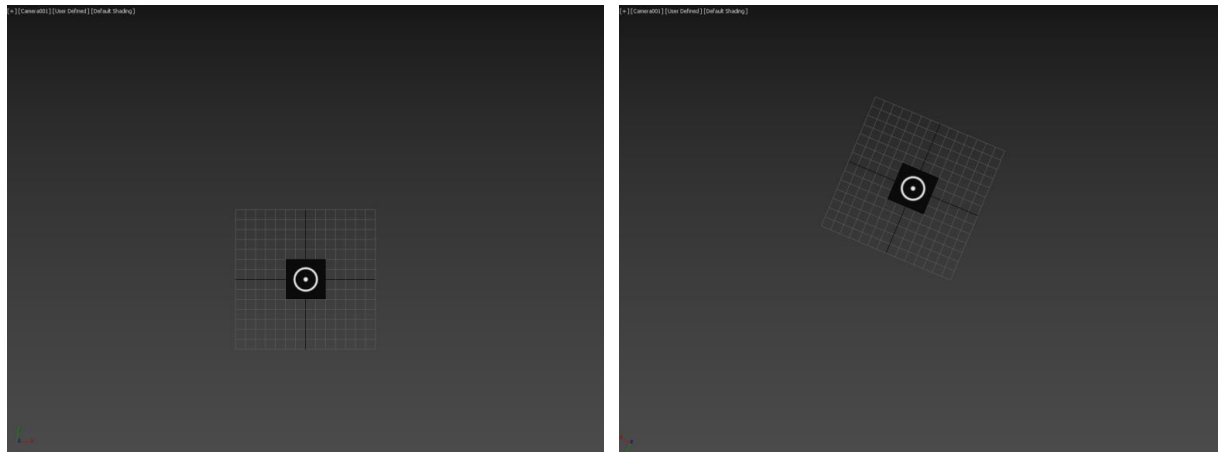
Técnica	Precisão(%)	Cobertura(%)	RMS(Pixels)	Tempo de Execução(qps)
MT(Sem Ruído)	100.0	100.0	0.11666	30.8
MTM(Sem Ruído)	100.0	100.0	0.53574	31.7
MT(Com Ruído)	100.0	100.0	0.20387	26.1
MTM(Com Ruído)	100.0	100.0	0.77421	28.0

A partir dos resultados ilustrados na Tabela 4.1, pode ser observado que a técnica proposta apresenta menor erro da distância do centro encontrado ao *ground truth*, do que a modificação

da técnica. Além disto, a precisão e cobertura para este cenário foram de 100%, mostrando que todos e apenas os marcadores presentes no conjunto de imagens deste experimento foram detectados pela técnica. Também pode ser observado que a adição de ruído causou um custo extra no tempo de execução do algoritmo, medido em quadros por segundo (qps). Este custo provém do ruído de Poisson gerar novas áreas de topos, consequentemente gerando uma maior quantidade de candidatos a marcadores que devem ser avaliados.

#### 4.3.1.2 Movimentação circular da câmera no eixo Z

Este cenário apresenta o marcador fixo na posição  $(0, 0, 0)$  e câmera inicialmente posicionada a 3 metros da superfície do marcador, na coordenada  $(0, 0, 300)$ . A câmera é movimentada de forma circular sobre o eixo Z. Esta movimentação é aplicada utilizando um raio de 20 cm e com angulo de  $36^\circ$ /quadro gerando 9 (nove) imagens como exemplificado na Figura 4.7.



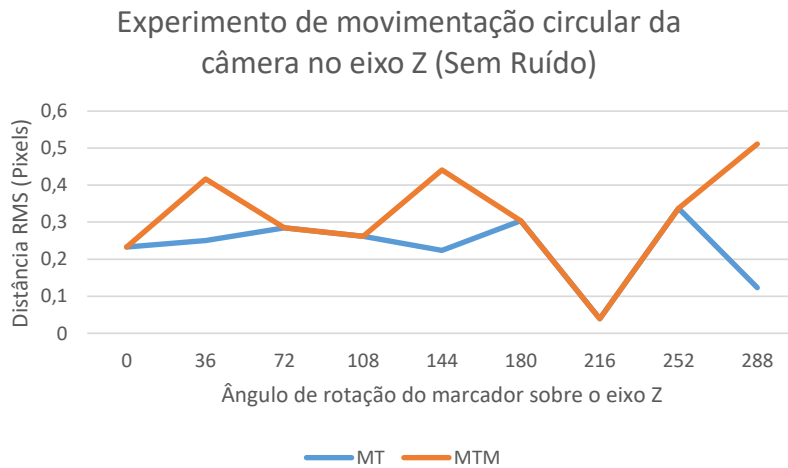
**Figura 4.7:** Imagens do experimento de movimentação circular da câmera no eixo Z (da esquerda): Câmera rotacionada  $0^\circ$  do eixo Z e marcador rotacionado a  $216^\circ$  do eixo Z.

**Tabela 4.2:** Resultados do experimento de movimentação circular da câmera no eixo Z.

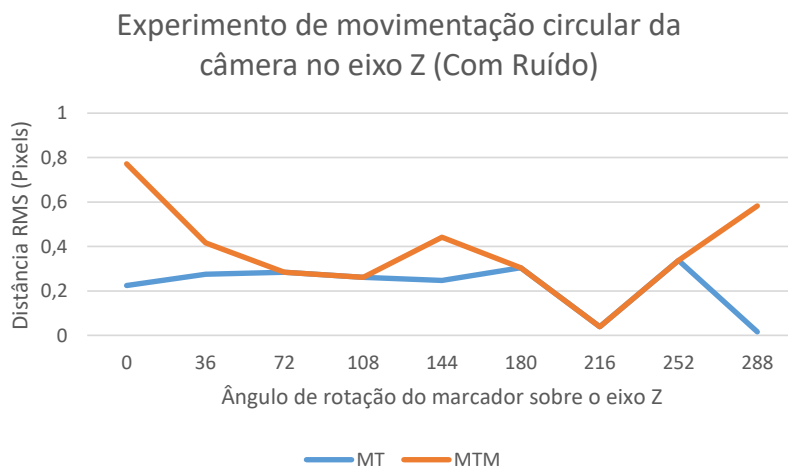
Técnica	Precisão(%)	Cobertura(%)	RMS(Pixels)	Tempo de Execução(qps)
MT(Sem Ruído)	100.0	100.0	0.24485	30.5
MTM(Sem Ruído)	100.0	100.0	0.34008	32.8
MT(Com Ruído)	100.0	100.0	0.24615	26.8
MTM(Com Ruído)	100.0	100.0	0.42959	28.7

Os resultados das técnicas podem ser observados nos gráficos da Figura 4.8 e da Figura 4.9, juntamente com os resultados apresentados na Tabela 4.2. O algoritmo proposto apresentou menor erro em relação ao centro do marcador encontrado, comparado com a versão modificada. De forma similar aos demais experimentos, a adição de ruído causou um custo computacional maior no tempo de execução do algoritmo. Além disto, a precisão e a cobertura

para este cenário foram de 100%, mostrando que todos e apenas os marcadores presentes no conjunto de imagens deste experimento foram detectados pela técnica. Este custo provém do ruído de Poisson gerar novas áreas de topos, gerando uma maior quantidade de candidatos a marcadores que devem ser avaliados pela técnica.



**Figura 4.8:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth* por ângulo de rotação sobre o eixo Z, sem a presença de ruído.

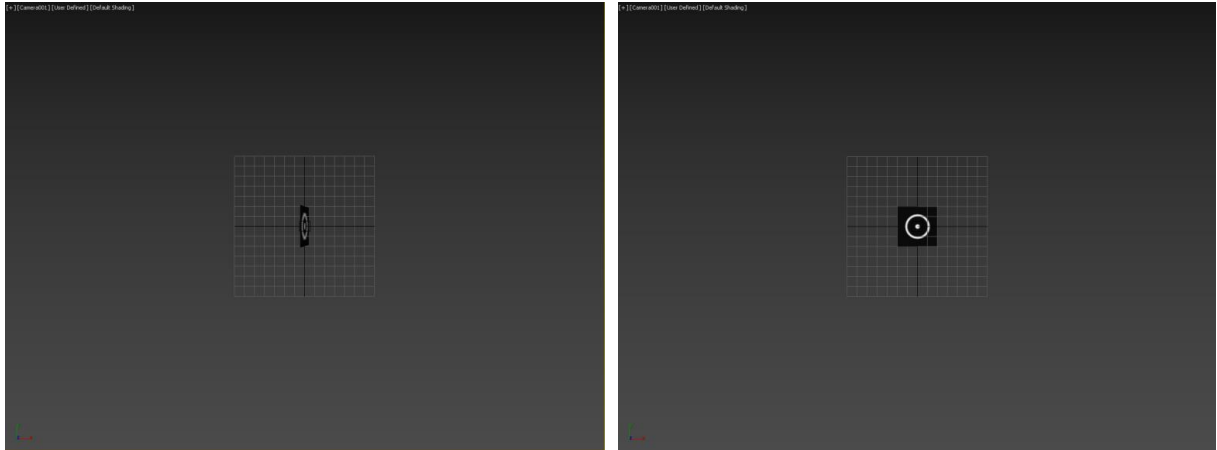


**Figura 4.9:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth* por ângulo de rotação sobre o eixo Z, com a presença de ruído.

#### 4.3.1.3 Rotação do plano do marcador no eixo Y

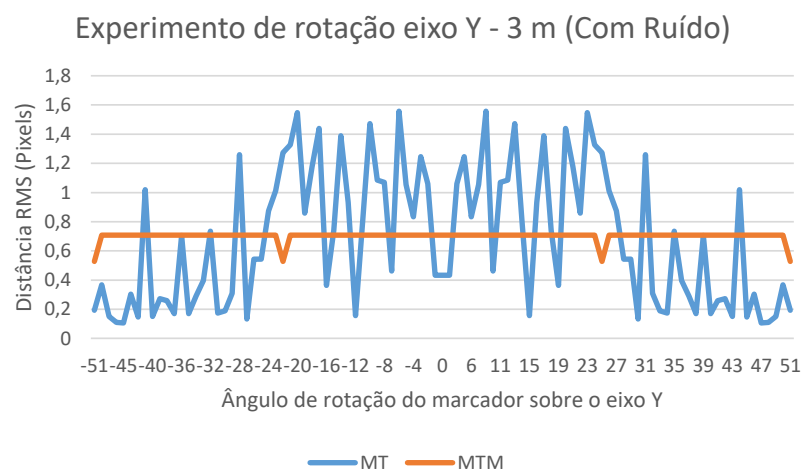
Este cenário apresenta o marcador fixo na posição  $(0, 0, 0)$  rotacionado a  $-90^\circ$  sobre o eixo Y. Foram produzidos dois conjuntos de imagens, o primeiro com a câmera a 3 metros de distância do marcador, na posição  $(0, 0, 300)$  e o segundo com a câmera a 5 metros de distância do marcador, na posição  $(0, 0, 500)$ . A superfície planar do marcador foi rotacionada a  $1^\circ$ /quadro sobre o eixo Y. Cada câmera gerou 180 quadros, onde no primeiro quadro, o plano do marcador

deveria estar rotacionado de  $-90^\circ$  sobre o eixo Y até o ultimo quadro onde o marcador deveria estar rotacionado de  $90^\circ$  sobre o eixo Y. Duas imagens obtidas no experimento são apresentadas na Figura 4.10.

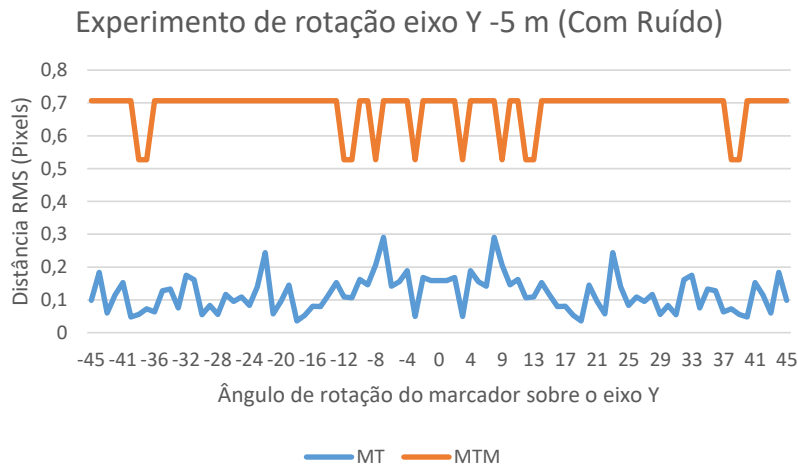


**Figura 4.10:** Imagens do experimento de rotação do plano do marcador no eixo Y a uma distância de 3 metros (da esquerda): Marcador rotacionado a  $60^\circ$  do eixo Y e marcador rotacionado a  $0^\circ$  do eixo Y.

Nos gráficos das Figura 4.11 e da Figura 4.12 pode ser observado que o ruído de Poisson amplifica a instabilidade da técnica proposta de forma inversamente proporcional à distância do marcador. Este fato se deve a maior proximidade do marcador para a câmera, portanto, maior será a área do marcador sobre influência do ruído de Poisson.

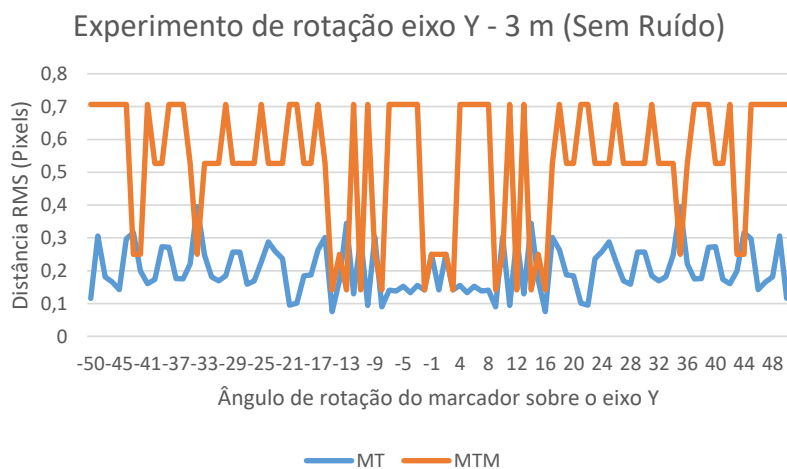


**Figura 4.11:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth*, a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, com a presença de ruído.



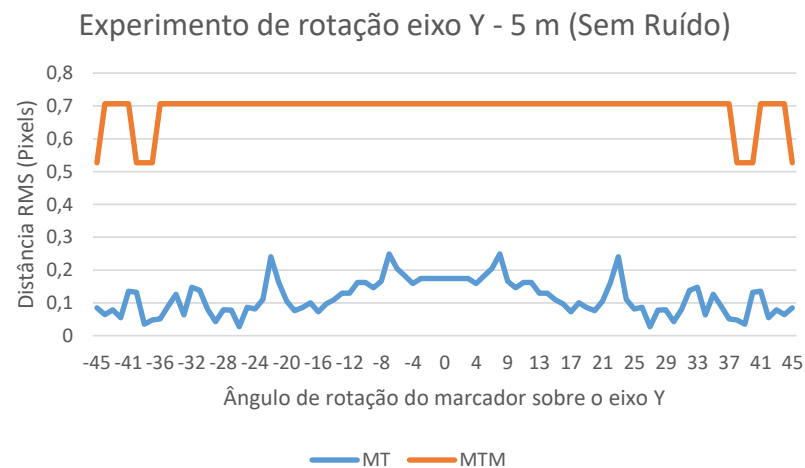
**Figura 4.12:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth*, a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, com a presença de ruído.

Considerando os gráficos das Figura 4.13 e da Figura 4.14, pode ser analisado que o ângulo máximo de detecção do marcador varia com a distância do marcador para a câmera. Também pode ser observado que a uma distância de 5 metros, o ângulo máximo de detecção é de 45°, demonstrando uma robustez da técnica proposta ao angulo de visão do marcador.



**Figura 4.13:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth*, a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, sem a presença de ruído.





**Figura 4.14:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth*, a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador, por ângulo de rotação sobre o eixo Y, sem a presença de ruído.

**Tabela 4.3:** Resultados do experimento de rotação do marcador no eixo Y a uma distância de 3 metros entre câmera e marcador.

Técnica	Precisão(%)	Cobertura(%)	RMS(Pixels)	Tempo de Execução(qps)
MT(Sem Ruído)	100.0	56.38	0.2118	30.3
MTM(Sem Ruído)	100.0	56.38	0.58147	32.5
MT(Com Ruído)	96.45	57.22	0.99435	27.5
MTM(Com Ruído)	37.59	57.22	0.70115	28.9

**Tabela 4.4:** Resultados do experimento de rotação do marcador no eixo Y a uma distância de 5 metros entre câmera e marcador.

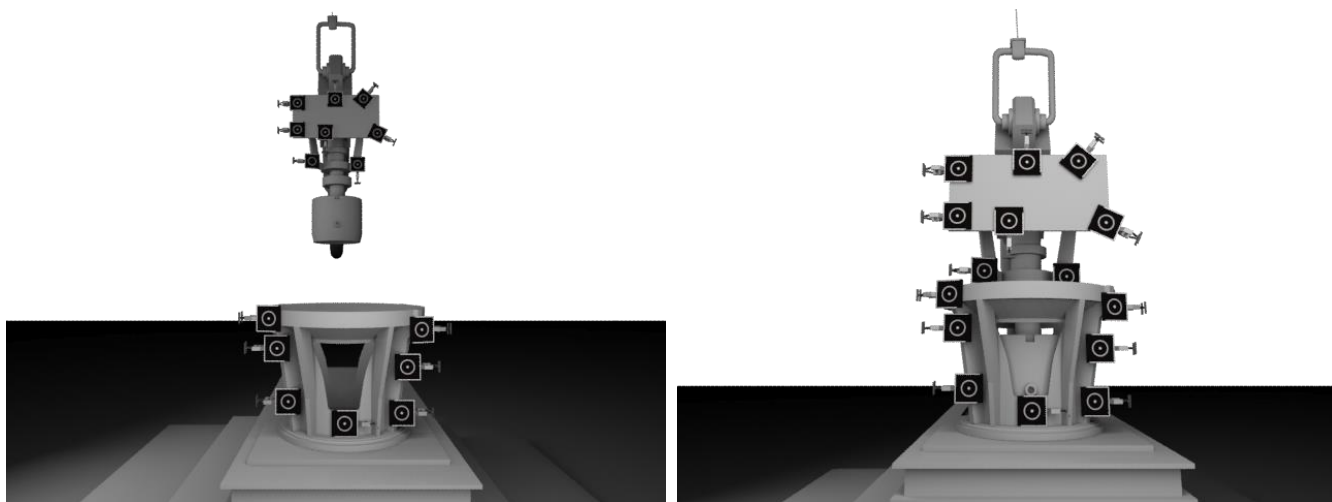
Técnica	Precisão(%)	Cobertura(%)	RMS(Pixels)	Tempo de Execução(qps)
MT(Sem Ruído)	100.0	48.89	0.12734	30.0
MTM(Sem Ruído)	100.0	48.89	0.69267	32.9
MT(Com Ruído)	100.0	50.54	0.13056	28.1
MTM(Com Ruído)	100.0	50.54	0.68675	30.5

Analisando a Tabela 4.3, pode ser observado que a presença de ruído causou um aumento no erro do centro do marcador encontrado. Porém, a precisão da *MT* se manteve acima dos 96%, enquanto a precisão da *MTM* caiu para abaixo dos 38%, devido ao erro do marcador encontrado pela técnica *MTM* ser acima do erro máximo para a resposta de técnica ser considerado um marcador válido. Na Tabela 4.4, pode se observar que, diferentemente do caso anterior, a

aplicação do ruído não influencia de forma tão significativa o resultado, isto se deve ao fato da área do marcador afetada pelo ruído ser menor do que no caso anterior.

### 4.3.2 Cenário Complexo

Este cenário simula certas condições encontradas nas operações de acoplamentos de dutos de petróleo. A cena apresenta dois objetos principais, uma base de encaixe com a presença de 7 marcadores e um duto com 8 marcadores. Todos os marcadores apresentam dimensões iguais de 21x21cm. A câmera criada no 3DS Max não apresenta distorções. O tamanho da imagem produzida é de 640 pixels de largura por 480 pixels de altura. A movimentação da câmera é feita de forma que ambos os objetos sejam enquadrados na imagem produzida pela câmera e a distância entre os marcadores e a câmera se mantenham entre 2 e 8 metros. Duas imagens obtidas no experimento são apresentadas na Figura 4.15.



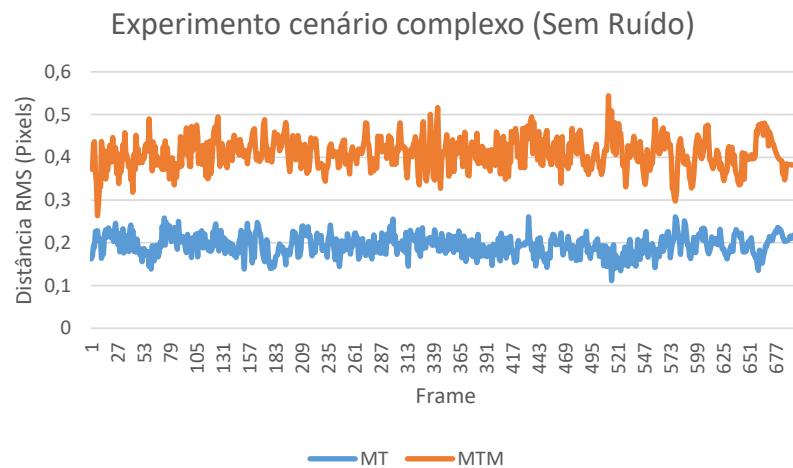
**Figura 4.15:** Imagens do experimento com cenário complexo (da esquerda para direita): Primeira imagem produzida pelo cenário e última imagem produzida pelo cenário.

**Tabela 4.5:** Resultados dos experimentos em cenário sintético complexo.

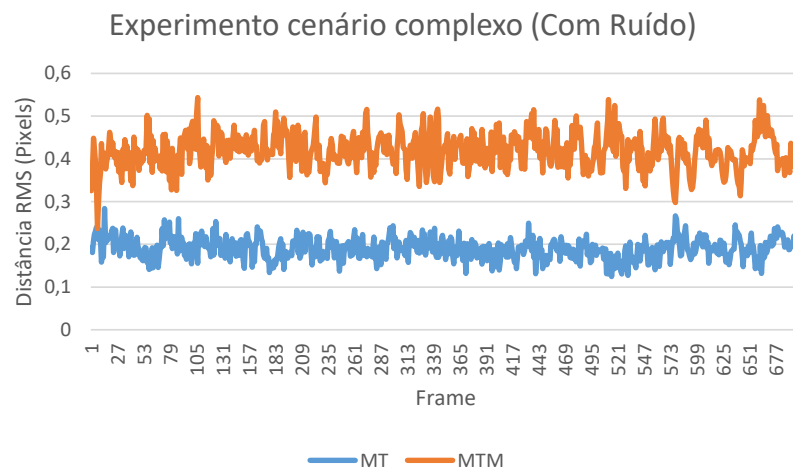
Técnica	Precisão(%)	Cobertura(%)	RMS(Pixels)	Tempo de Execução(qps)
MT(Sem Ruído)	99.87	98.00	0.19128	26.0
MTM(Sem Ruído)	99.92	98.00	0.41079	27.3
MT(Com Ruído)	95.86	97.71	0.19539	23.6
MTM(Com Ruído)	95.86	97.71	0.42132	24.4

Os resultados das técnicas podem ser observados nos gráficos da Figura 4.16 e da Figura 4.17, juntamente com os resultados apresentados na Tabela 4.5. O algoritmo proposto apresentou menor erro em relação ao centro encontrado, do que a versão modificada do mesmo. Além disto, a precisão e a cobertura para este cenário ficaram próximas de 100%, apresentando

uma boa taxa de detecção, mesmo com a presença de múltiplos marcadores na cena. A adição de ruído não afetou o erro da distância do centro encontrado ao *ground truth* significativamente, porém causou um custo computacional extra ao tempo de execução da técnica por gerar mais candidatos a marcador.



**Figura 4.16:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth* por quadro do cenário complexo, sem a presença de ruído.



**Figura 4.17:** Gráfico da distância RMS entre o centro encontrado pelo algoritmo e o *ground truth* por quadro do cenário complexo, com a presença de ruído.

### 4.3.3 Discussão (Cenário Sintético)

A partir dos experimentos sintéticos pode ser observado que, embora o centro extraído a partir do fit de elipse seja uma aproximação do centro real do marcador e ter apresentado uma certa instabilidade, seus valores tenderam a ser mais precisos que o centroide do candidato a marcador. Em relação a precisão, a técnica proposta apresentou precisão acima dos 95%, mostrando uma baixa detecção de falso positivos. A taxa de cobertura da técnica piorou no

cenário de rotação do marcador no eixo Y, porém pode ser observado uma robustez a angulação do plano do marcador.

A partir dos tempos de execuções de ambas as técnicas, pode ser visto que mesmo com o custo da etapa de recálculo do centroide e o custo causado por novos candidatos gerados pelo ruído de Poisson, a técnica apresentou tempos de execução próximos dos 24 qps. Desta forma, para o cenário sintético, a técnica demonstra ser executável para os requisitos de tempo real.

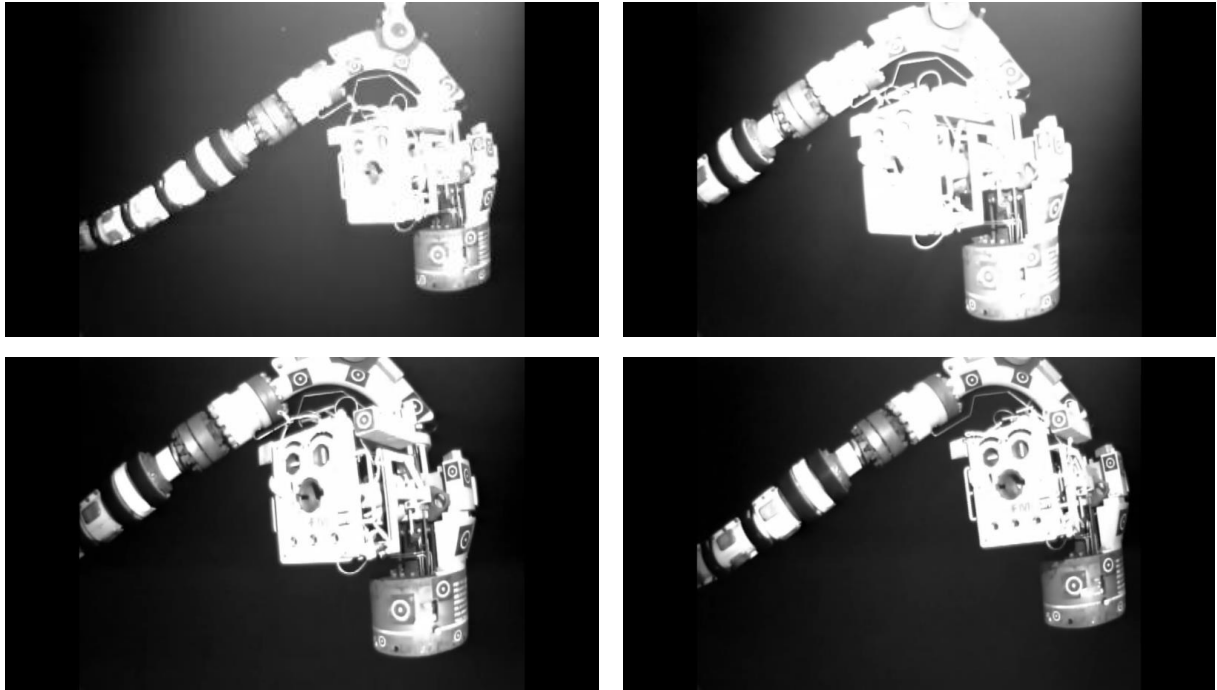
## 4.4 Experimentos Reais

Para validar o sistema de marcador proposto em ambientes submersos foram utilizadas as imagens de uma operação de interligação da linha de injeção de gás entre os poços de extração de petróleo. Nesta operação apenas o MCV (Modulo de Conexão Vertical) foi marcado, e foram utilizados 13 marcadores para realização da marcação.

Os marcadores utilizados na operação possuem dimensões distintas, objetivando avaliar qual a melhor dimensão para uso no cenário do experimento. Foram utilizados marcadores com dimensões de 15x15cm, 20x20cm e 25x25cm, confeccionados em adesivos de vinil fosco. A marcação no MCV foi feita limitando a área de marcação como visto na Figura 4.18. Estas limitações, são devido ao MCV apresentar algumas marcações que não podem ser ocluídas.

O experimento foi realizado com o acompanhamento de um ROV (*Remotely Operated Underwater Vehicle*) equipado com um par de câmeras Kongsberg OE15-101C [MARITIME \(2018\)](#), juntamente com um iluminador. As câmeras foram devidamente calibradas e as distorções foram removidas dos vídeos. Ao final da operação foram produzidos 4 (quatro) vídeos nos quais é possível visualizar o MCV e os marcadores, como exemplificado na Figura 4.18.

Os *ground truths* deste cenário foram gerados utilizando o algoritmo de rastreamento de pontos KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) [TOMASI; KANADE \(1991\)](#). No início de cada vídeo, os centros dos marcadores foram marcados e utilizando o algoritmo KLT, fornecido pela ferramenta MATLAB, permitindo obter a posição dos marcadores ao longo dos vídeos. Por conta da baixa precisão desta abordagem, a métrica de distância RMS se torna inviável. Desta forma, para os experimentos no cenário real, apenas será aplicada as métricas de precisão e cobertura, e tempo de execução.



**Figura 4.18:** Imagens do MCV nas operações de instalação de dutos de petróleo. Da esquerda para direita e de cima para baixo: vídeo A, vídeo B, vídeo C e vídeo D. (Fonte: Sapura)

**Tabela 4.6:** Resultados dos experimentos no cenário real.

Vídeo	Frames	Precisão(%)	Cobertura(%)	Tempo de Execução(qps)
A	485	77.15	69.57	16.5
B	313	64.32	51.42	15.7
C	88	82.74	80.87	18.0
D	423	83.27	74.21	17.8

#### 4.4.1 Discussão (Cenário Real)

Avaliando os valores da Tabela 4.6, pode ser observado que o tempo de execução do algoritmo cai em relação ao cenário sintético, devido as características do cenário. Por conta do ruído das imagens, existe geração de um maior número de candidatos a marcador, influenciando diretamente no tempo de execução da técnica.

Em relação a precisão e cobertura da técnica é necessário avaliar os casos de falsos positivos e falsos negativos para compreender melhor os resultados. Em geral, os casos de falsos positivos ocorrem em 2 situações: no anel do próprio marcador e em elementos do MCV. Estas situações se tornam mais comuns no vídeo B, onde os iluminadores causam uma saturação na imagem, como exemplificado na Figura 4.19.



**Figura 4.19:** Exemplos de situações onde há falsos positivos. Da esquerda para a direita: falsos positivos no anel e falsos positivos em elementos do MCV.

A situação onde são detectados falsos positivos no anel do marcador ocorre devido à presença de ruído na imagem. Este ruído causa a presença de regiões de topos ao redor de pontos do anel do marcador. A segunda situação recorrente é o caso de falsos positivos em elementos do MCV. Esta situação ocorre devido à similaridade do formato de alguns elementos do MCV ao marcador proposto.

Os casos de falsos negativos ocorrem em 2 situações: quando o marcador é parcialmente ocluído e em momentos onde há um alto nível de saturação, acarretando na junção do anel do marcador ao equipamento. Estas situações são exemplificadas na Figura 4.20.

A situação onde o marcador não é detectado pois está parcialmente ocluído ocorre devido à etapa de validação do marcador exigir que os todos os caminhos, a partir do candidato a marcador, apresentem regiões de topos. Desta forma, situações de oclusão parcial acarretam em uma falha na detecção. A segunda situação recorrente de falsos negativos acontece quando a saturação da imagem causa a junção do anel do marcador ao equipamento. Por conta desta junção, o marcador não consegue ser validado, pois regiões de topos pertencentes ao mesmo setor não estão equidistantes do ponto que representa o candidato a marcador  $p$ .



**Figura 4.20:** Exemplo de situações de falsos negativos. Da esquerda para a direita: oclusão parcial do marcador e situação onde a saturação da imagem causa a junção do anel do marcador ao MCV.

Apesar de terem ocorrido algumas falhas de detecção na técnica, os resultados mostraram

que a técnica apresentou taxas de precisão e cobertura acima dos 50%, mesmo em imagens com alto nível de ruído, como no exemplo do vídeo B mostrado na Figura 4.18. Em relação ao tempo de execução da técnica, pode ser observado que nenhum vídeo conseguiu atingir taxas acima de 24 qps, devido ao ruído nas imagens, altos números de candidatos são avaliados, assim tornando custosa a execução do algoritmo.

O próximo capítulo apresenta as conclusões sobre a técnica proposta neste trabalho, juntamente com trabalhos futuros a serem realizados.





# 5

## Conclusão

Neste trabalho foi proposto um sistema de marcadores para utilização em ambientes submersos em água. A abordagem foi implementada e validada utilizando imagens de cenários sintéticos e real. As imagens do cenário real foram produzidas através da realização de experimentos em operações de interligação da linha de injeção de gás entre poços de extração de petróleo.

Durante os experimentos, as seguintes conclusões foram obtidas através da observação dos resultados coletados:

- Os marcadores de [CALVET et al. \(2016\)](#) e de [TSAI \(2012\)](#) se mostraram inadequados para o cenário dos experimentos propostos neste TCC. Os principais motivos são: o efeito de saturação e a perda de componentes de alta frequência no fundo do mar, considerando que as características utilizadas na detecção desses marcadores são perdidas, impossibilitando deste modo que os marcadores sejam detectados.
- No cenário sintético pôde ser apurado que a técnica proposta apresenta uma instabilidade sobre o centroide do marcador. Esta instabilidade decorre por causa da amostragem sobre os  $N$  caminhos  $R$ , como ilustrado na Figura 4.6. Apesar desta instabilidade, o algoritmo proposto apresentou uma precisão da distância do centro encontrado para o *ground truth* abaixo de 0.4 pixels. A exceção encontrada foi o experimento de rotação no eixo Y com 3 metros de distância entre o marcador e a câmera, que apresentou erro médio quadrado de aproximadamente 1 pixel. Ainda assim, o erro médio atendeu os requisitos deste TCC.
- No cenário sintético, também pôde ser observado que o marcador conseguiu ser detectado em condições impostas pela operação, como: a uma distância de 2 à 8 metros entre a câmera e o marcador, com múltiplos marcadores na mesma cena e quando observado sob um ponto de vista oblíquo.
- No cenário real observa-se que a técnica proposta se mostrou robusta em cenários submersos. Como pode ser analisado pelas imagens, o marcador proposto conseguiu

preservar suas características utilizadas para sua detecção, diferentemente dos marcadores do estado da arte. Também, pelos resultados, pode ser notado que a técnica proposta apresentou taxas de precisão acima de 62% e taxas de cobertura acima de 50%, apesar do alto grau de ruídos presentes nas imagens.

- Em relação ao tempo de execução, o algoritmo proposto exibiu taxas acima de 24 qps para cenários sintéticos, embora no cenário real ele tenha apresentado taxas inferiores. Este aumento no tempo de execução se deve a maior quantidade de candidatos a marcadores serem gerados por conta dos ruídos presentes em imagens reais.

## 5.1 Trabalhos Futuros

A continuação deste trabalho poderá ser em três frentes de investigações:

- **Acelerar o algoritmo de detecção** - Como visto o algoritmo apresentou um tempo de execução abaixo do requisito de tempo real para o cenário real. Uma solução possível é a utilização de processamento em *GPU*, permitindo um aumento da performance computacional do algoritmo de detecção.
- **Investigação da parametrização do algoritmo** - Ao longo da descrição da Seção 3.2 foram apresentados alguns parâmetros para o algoritmo. Estes parâmetros influenciam de forma direta o desempenho do algoritmo, assim uma investigação mais intensa da parametrização da técnica pode acarretar em um melhor desempenho computacional do algoritmo de detecção.
- **Retificação do plano do marcador** - No trabalho de [CALVET et al. \(2016\)](#) é descrita uma proposição para calcular a homografia retificadora canônica com apenas 2 graus de liberdade, utilizando o centro do círculo de duas elipse concêntricas. Esta retificação, permite a remoção da projeção do plano do marcador podendo reduzir o erro do cálculo do centro do marcador.

# Referências

- AUTODESK. **3DS MAX**. Acessado em, 04/02/2018, <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. Surf: speeded up robust features. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. p.404–417.
- BOSE, C. B.; AMIR, J. Design of fiducials for accurate registration using machine vision. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [S.l.], v.12, n.12, p.1196–1200, 1990.
- BRIGGS, A. J. et al. Mobile robot navigation using self-similar landmarks. In: ROBOTICS AND AUTOMATION, 2000. PROCEEDINGS. ICRA'00. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2000. v.2, p.1428–1434.
- BUDIYONO, A. Advances in unmanned underwater vehicles technologies: modeling, control and guidance perspectives. , [S.l.], 2009.
- CALVET, L. et al. Detection and accurate localization of circular fiducials under highly challenging conditions. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2016. p.562–570.
- FIALA, M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques. In: COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2005. CVPR 2005. IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005. v.2, p.590–596.
- GANDER, W. The Singular Value Decomposition. **ETH Zurich, December**, [S.l.], v.12, 2008.
- GUENNEBAUD G., J. B. e. a. . **Eigen**. Acessado em, 15/03/2018, <http://eigen.tuxfamily.org/>.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple view geometry in computer vision**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.
- HASINOFF, S. W. Photon, poisson noise. In: **Computer Vision**. [S.l.]: Springer, 2014. p.608–610.
- KATO, I. P. H.; BILLINGHURST, M.; POUPYREV, I. Artoolkit user manual, version 2.33. **Human Interface Technology Lab, University of Washington**, [S.l.], v.2, 2000.
- LEPETIT, V.; FUA, P. et al. Monocular model-based 3d tracking of rigid objects: a survey. **Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision**, [S.l.], v.1, n.1, p.1–89, 2005.
- LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: COMPUTER VISION, 1999. THE PROCEEDINGS OF THE SEVENTH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1999. v.2, p.1150–1157.
- MARITIME, K. **Kongsberg Maritime**. Acessado em, 01/02/2018, <https://www.km.kongsberg.com>.

NEGRE, A.; PRADALIER, C.; DUNBABIN, M. Robust vision-based underwater homing using self-similar landmarks. **Journal of Field Robotics**, [S.l.], v.25, n.6-7, p.360–377, 2008.

ØGENDAL, L. Light Scattering. , [S.l.], 2013.

OPENCV. **OpenCV**. Acessado em, 07/05/2018, <https://opencv.org/>.

PRASAD, M. G.; CHANDRAN, S.; BROWN, M. S. A motion blur resilient fiducial for quadcopter imaging. In: APPLICATIONS OF COMPUTER VISION (WACV), 2015 IEEE WINTER CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.254–261.

TOMASI, C.; KANADE, T. Detection and tracking of point features. , [S.l.], 1991.

TSAI, D. **Autonomous Vision-Based Docking of the Tethered Axel Rover for Planetary Exploration**. 2012.