

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

DANIEL LIMA GOMES JÚNIOR

**METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE APLICAÇÕES DE RV E RA
COM MARCADORES NATURAIS EM CENÁRIOS INDUSTRIAIS**

SÃO LUÍS - MA

2017

DANIEL LIMA GOMES JÚNIOR

**METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE APLICAÇÕES DE RV E RA
COM MARCADORES NATURAIS EM CENÁRIOS INDUSTRIAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Cardoso de Paiva

Coorientador: Prof. Dr. Aristófanês Corrêa Silva

SÃO LUÍS - MA

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Gomes Júnior, Daniel Lima.

Metodologia para construção de aplicações de RV e RA
com marcadores naturais em cenários industriais / Daniel
Lima Gomes Júnior. - 2017.

119 f.

Coorientador(a): Aristófanês Corrêa Silva.

Orientador(a): Anselmo Cardoso de Paiva.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Eletricidade/ccet, Universidade Federal do
Maranhão, Núcleo de Computação Aplicada, 2017.

1. Haar-like Features. 2. Marcador Natural. 3.
Realidade Aumentada. 4. Realidade Virtual. 5. Sistema
Elétrico de Potência. I. Paiva, Anselmo Cardoso de. II.
Silva, Aristófanês Corrêa. III. Título.

DANIEL LIMA GOMES JÚNIOR
METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE APLICAÇÕES DE RV E RA
COM MARCADORES NATURAIS EM CENÁRIOS INDUSTRIAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Ciência da Computação.

Tese aprovada em 25 de agosto de 2017.

Prof. Dr. Anselmo Cardoso de Paiva
Orientador

Prof. Dr. Aristófanês Corrêa Silva
Coorientador

Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Alberto Barbosa Raposo
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante Neto
Membro da Banca Examinadora

SÃO LUÍS - MA
2017

*Aos meus pais Daniel e Suilan,
minha esposa Viviane e minha filha Rafaela*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que apesar de todas as minhas falhas e defeitos, tem sempre me abençoado.

Aos meus pais, Daniel e Suilan, que me proporcionaram amor e dedicação em todo o tempo.

À minha esposa Viviane, pelo apoio, carinho e companhia durante toda essa jornada. Pelo encorajamento nos momentos difíceis, pela paciência e por nossa querida filha Rafaela, que me motiva a melhorar a cada dia.

Aos meus familiares, pelo incentivo e carinho. Em especial, Suilane e Vasco.

Ao professor Anselmo Paiva, pela orientação, amizade, respeito e valiosas contribuições na elaboração deste trabalho. Foi um prazer aprender sob sua orientação durante todos esses anos de laboratório e pesquisa. Agradeço por toda ajuda e por confiar em mim para mais este desafio.

Ao professor Aristófanês Corrêa pelas sugestões fundamentais para a solução do problema de detecção de objetos. E a todos os professores do PPGE-UFMA pelo trabalho sério e competente.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), pelo apoio na etapa de aquisição de imagens, fundamental para a conclusão deste trabalho. Em especial ao apoio fornecido pelos competentes profissionais Antônio Sérgio e Jozimar Durand.

Ao IFMA, pela liberação para estudo, possibilitando-me tempo e condições favoráveis de trabalho. Aos amigos de trabalho, em especial Adriano, Alex, Anderson, Ivana, Jeane, Karla, Luciana, Saulo, Simone e Ulysses, registro aqui o meu carinho especial. Vocês foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do Núcleo de Computação Aplicada da UFMA. Um agradecimento especial a Alexandre, Artur, Dallyson, Darlan, Denes, Geraldo, João, Otilio, Paulo e Stelmo. Agradeço pela amizade, ajuda e as risadas no café.

A todos os servidores do programa de pós-graduação em engenharia de eletricidade; o trabalho de vocês é essencial para o nosso êxito.

Aos professores da banca examinadora, em especial ao prof. Zair Abdelouahab (*in memoriam*) pelas críticas que me desafiaram a concluir muitas tarefas ainda não resolvidas à época do exame de qualificação.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

*“E não nos desfaleçamos de fazer o bem, pois,
se não desistirmos, colheremos no tempo certo.”*

Gálatas 6.9

RESUMO

Esta pesquisa propõe uma metodologia para construção de aplicações de Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) com uso de marcadores naturais em cenários industriais. A metodologia usa o conceito de anotação de objetos e são apresentadas propostas de visualização para ambientes industriais tanto em formato de RV quanto de RA. Nos ambientes de RV, a metodologia é aplicada através da detecção de objetos no processo de construção semiautomática dos ambientes. Por outro lado, nos ambientes de RA, apresenta-se o conceito de marcadores naturais georreferenciados, que associam dados georreferenciados ao processo de detecção de objetos com técnicas de processamento de imagens. O cenário de subestações de energia elétrica foi utilizado como estudo de caso para as duas abordagens. São apresentadas arquiteturas para construção e visualização de dados em ambientes industriais. Tanto sob a forma de RV quanto de RA, este trabalho propõe o uso de marcadores naturais 3D baseados em *Haar-like features* para o processo de treinamento e detecção de objetos. Os resultados permitem a detecção de equipamentos a partir de diferentes pontos de vista no cenário de operação. Além disso, em RA, esta abordagem permite a estimativa de pose em tempo real com uso de ORB *features* e permite, em RV, a detecção semiautomática de objetos que são utilizados como pontos de informação para adição de informações virtuais. Diversos cenários industriais, principalmente o setor elétrico, possuem grau elevado de complexidade no tratamento e visualização das informações. Nesse sentido, além da metodologia de marcadores naturais 3D, este trabalho apresenta novas aplicações de visualização no cenário industrial com abordagens em RV e RA.

Palavras-chave: Marcador Natural. Realidade Aumentada. Realidade Virtual. *Haar-like Features*. Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

This research proposes a methodology for development of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) applications, using natural markers for industrial scenarios. The proposed methodology uses the object annotation concept and visualization proposals are presented both for development of VR as for AR environments. In VR environments, the methodology is applied for object detection step of the semi-automatic environment development. On the other hand, in AR environments, is presented the concept of georeferenced natural markers, which use the georeferenced data integrated with object detection process using image processing techniques. The energy substations scenarios were used as case study for both approaches. Architectures are presented for construction and data visualization in industrial environments. Both for VR as for AR approaches, this work proposes using 3D natural markers based in Haar-like features for object training and detection process. The results enable the equipment detection at different points of view, within the operating scenario. Besides that, in AR, it enables the pose estimation in real-time using ORB features, while in VR it enables the semi-automatic object detection, which are used as information points for inclusion of virtual information. Several industrial scenarios, and especially the energy sector, has a high degree of complexity in the information processing and visualization. In this sense, beyond the 3D natural markers methodology, this work presents new visualization applications for industrial scenario visualization in VR and AR approaches.

Keywords: Natural Marker. Augmented Reality. Virtual Reality. Haar-like features. Electric Power Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Continuum</i> de realidade-virtualidade.	23
Figura 2 – Marcadores fiduciais para realidade aumentada.	25
Figura 3 – Número de artigos em cada área de ambientes construídos no período de 2005 a 2011	27
Figura 4 – Sistema de realidade aumentada baseado em dados GPS.	32
Figura 5 – Utilização de realidade aumentada <i>markerless</i> para especificação de 4 pontos necessários para calcular o sistema de coordenadas em que os elementos virtuais são adicionados à cena.	32
Figura 6 – Processo de aquisição de dados georreferenciados.	34
Figura 7 – Giroscópio Mecânico.	35
Figura 8 – Exemplos de dispositivos vestíveis no formato HMD	36
Figura 9 – Tipos de panoramas	38
Figura 10 – Etapas de um sistema de Visão Computacional genérico.	41
Figura 11 – Modelos de histogramas unimodal, bimodal e multimodal.	42
Figura 12 – Equalização de histograma.	43
Figura 13 – Filtragem homomórfica.	45
Figura 14 – Filtro homomórfico aplicado à imagem	46
Figura 15 – Haar-like Features.	50
Figura 16 – Representação de valores de imagens integrais.	51
Figura 17 – Classificadores em cascata (Cascade of classifiers). O objetivo desses classificadores é eliminar os erros de detecção através de pouco processamento em cada estágio através de um parâmetro de <i>hit rate</i> para criar sequencialmente um classificador com detecção aceitável.	52
Figura 18 – Restrições para o problema de pose da câmera	54
Figura 19 – Etapas gerais da metodologia proposta para anotação utilizando marcadores naturais em ambientes de realidade virtual e realidade aumentada.	67
Figura 20 – Imagem do ambiente de operação (<i>raster</i>).	68
Figura 21 – Imagem com panorama cilíndrico de 180°.	69
Figura 22 – Exemplos de imagens usadas no treinamento	70
Figura 23 – Ilustração conceitual do marcador natural 3D baseado em <i>Haar-like features</i>	71

Figura 24 – Módulos e fluxo de informação na visualização em dispositivos móveis para realidade aumentada	72
Figura 25 – Óculos de realidade virtual com abertura para visão de realidade aumentada utilizado: VR Box.	73
Figura 26 – Arquitetura de aquisição de dados integrada ao SAGE/OTS.	75
Figura 27 – Modelo 3D baseado em <i>features</i> de múltiplas vistas.	76
Figura 28 – Diagrama de atividade para carregamento de modelos de diferentes perspectivas	77
Figura 29 – Diagrama de blocos da arquitetura com extensão do módulo APAT .	78
Figura 30 – Etapas para o processo de visualização dos panoramas aumentados .	79
Figura 31 – Diagrama de atividades para a criação e visualização dos ambientes aumentados	80
Figura 32 – Identificação de objetos dentro do campo de visão do observador. . .	82
Figura 33 – Fluxo de informação do processo de inclusão de anotações na ferramenta de autoria	84
Figura 34 – Transformador 04T2 antes da operação.	89
Figura 35 – Visualização no OTS após passagem da mensagem de solicitação “3#SUT:04T201;TAP;2” que altera o valor do TAP para 2	89
Figura 36 – Transformador 04T2 após a operação e alarme indicando a mudança.	90
Figura 37 – Resultados de detecção de transformador com vista frontal do equipamento e variações do parâmetro de treinamento <i>nStages</i>	91
Figura 38 – Resultados de detecção de transformador com vista lateral do equipamento e variações do parâmetro de treinamento <i>nStages</i>	92
Figura 39 – Visualização de informações de metadados de localização geográfica. .	94
Figura 40 – O método proposto para identificação de equipamentos com integração de dados GPS, sensor de compasso, localização do usuário, localização dos equipamentos e a imagem obtida da câmera	94
Figura 41 – Mudança de posicionamento da câmera, modificando o ângulo do campo de visão. A linha central irá auxiliar a etapa de identificação dos transformadores detectados na imagem.	95
Figura 42 – Visualização da aplicação em <i>tablet</i> (<i>single view</i>).	95
Figura 43 – Visualização estereoscópica em tempo real integrada com dados OTS	96

Figura 44 – Visualização do usuário em realidade aumentada das informações em dispositivo vestível.	97
Figura 45 – Processo de estimativa de pose usando diferentes vistas dos modelos baseados em <i>features</i>	97
Figura 46 – Visualização do usuário na ferramenta de autoria para criação de ambientes baseados em panoramas aumentados com detecção de transformador	101
Figura 47 – Visualização baseada em panorama cilíndrico exibindo informação real do sistema OTS/SAGE	102
Figura 48 – Visualização de panorama esférico com interação do usuário e informação de disjuntor	102
Figura 49 – Resultados de aplicação dos questionários	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de marcadores naturais de realidade aumentada em tempo real.	33
Tabela 2 – Comparação entre tempo de execução do ORB, SURF e SIFT.	49
Tabela 3 – Resultados de detecção com variação do parâmetro <i>nStages</i> de 14 a 28	93
Tabela 4 – Resultados das abordagens para estimativa de pose (com quatro modelos)	98
Tabela 5 – Comparação com diferentes metodologias <i>markerless</i> para construção de ambientes de realidade aumentada	99
Tabela 6 – Comparação entre a arquitetura apresentada e outros trabalhos relacionados	103
Tabela 7 – Resultados do questionário PSSUQ administrado a 71 usuários acadêmicos (linhas brancas) e 6 operadores do sistema elétrico da CHESF (linhas sombreadas)	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAT	<i>Augmented Panorama Authoring Tool</i>
AGC	Controle Automático de Geração
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CV	<i>Computer Vision</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
EP _n P	<i>Efficient Perspective-n-Point</i>
GBH	Gerenciamento da Base de Dados Históricos
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HMD	<i>Head-Mounted Displays</i>
ORB	<i>Oriented FAST and Rotated BRIEF</i>
OTS	<i>Operator Training Simulator</i>
RA	Realidade Aumentada
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
RPC	Chamada Remota de Procedimentos
RV	Realidade Virtual
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SIA	Subsistema de Inteligência Artificial
SIM	Subsistema de Treinamento e Simulação
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>

PUBLICAÇÕES

Artigos publicados

Local	Publicação
Capítulo de livro Qualis C - Computação	dos Reis P.R.J., Junior D.L.G., de Araújo A.S., Júnior G.B., Silva A.C., de Paiva A.C. (2014) Visualization of Power Systems Based on Panoramic Augmented Environments . In: De Paolis L., Mongelli A. (eds) Augmented and Virtual Reality. AVR 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8853. Springer, Cham
Simpósio nacional	Gomes Jr, D. L.; Reis, P. R. J.; Paiva, A. C.; Silva, A. C.; Araújo, A. S. Detecção de transformadores em imagens de Subestações Elétricas com SURF e KNN . In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE2014, 2014, Foz do Iguaçu - PR. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE2014, 2014.
Periódico Qualis B1 - Eng. IV	Gomes Jr, Daniel Lima; Reis, Paulo Roberto Jansen dos; Paiva, Anselmo Cardoso de; Silva, Aristófanés Corrêa; Braz Jr, Geraldo; Gattass, Marcelo; Araújo, Antônio Sérgio de. An Approach for Construction of Augmented Reality Systems using Natural Markers and Mobile Sensors in Industrial Fields . International Journal of Computers Communications & Control, v. 12, p. 507-518, 2017.
Periódico Qualis A2 - Computação	Gomes Jr, Daniel Lima; Reis, Paulo Roberto Jansen dos; Paiva, Anselmo Cardoso de; Silva, Aristófanés Corrêa; Braz Jr, Geraldo; Araújo, Antônio Sérgio de; Gattass, Marcelo. Semi-automatic methodology for augmented panorama development in industrial outdoor environments . In Advances in Engineering Software, 2017, , ISSN 0965-9978, https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.012

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivos específicos	19
1.2	Motivações	20
1.3	Contribuições	21
1.4	Organização do Trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Realidade Virtual e Aumentada	23
2.1.1	Anotações contextualizadas	29
2.1.2	Marcadores naturais	30
2.1.3	Sensores	33
2.1.4	Dispositivos vestíveis (<i>wearable devices</i>)	35
2.1.5	Panoramas aumentados	37
2.2	Visão Computacional e Processamento de Imagens	40
2.2.1	Técnicas de Realce	42
2.2.1.1	Equalização de histograma	42
2.2.1.2	Filtragem homomórfica	43
2.2.2	Detecção de objetos	44
2.2.2.1	<i>Oriented FAST and Rotated BRIEF</i> (ORB)	47
2.2.2.2	<i>Haar-like features</i>	50
2.2.3	Estimativa de pose	53
2.2.3.1	Cálculo de pose em tempo real	55
2.3	Sistemas Elétricos de Potência	56
2.3.1	Integração e utilização dos sistemas SAGE e OTS	58
3	TRABALHOS RELACIONADOS	60
3.1	Visualização em cenário industrial	60
3.2	Visualização com realidade virtual	62
3.3	Visualização com realidade aumentada: aplicações e desafios	63
4	METODOLOGIA PROPOSTA	66

4.1	Aquisição de imagens	68
4.2	Pré-processamento	69
4.3	Deteccção: marcadores naturais 3D com <i>Haar-like features</i> . .	69
4.3.1	Marcadores naturais com detecção em tempo real (RA) . . .	72
4.3.1.1	Módulo de visualização	73
4.3.1.2	Módulo de detecção	74
4.3.1.3	Módulo de comunicação	74
4.3.1.4	Estimativa de pose com múltiplos modelos baseados em <i>features</i> .	75
4.3.2	Marcadores naturais com detecção para autoria de panoramas aumentados (RV)	77
4.3.2.1	Evolução do módulo APAT para detecção de objetos	79
4.4	Identificação do objeto detectado	80
4.4.1	Identificação em realidade aumentada: cálculo do campo de visão do observador com uso de dados georreferenciados . . .	81
4.4.2	Identificação em realidade virtual: inclusão de POIs	83
4.5	Obtenção de informações reais de equipamentos	84
4.6	Visualização com diferentes formatos	86
5	RESULTADOS	87
5.1	Material utilizado	87
5.2	Aquisição de Imagens	88
5.3	Integração com dados SCADA/EMS (SAGE)	89
5.4	Deteccção de objetos com <i>Haar-like features</i>	90
5.5	Estudos de caso para anotação com uso de marcadores naturais	92
5.5.1	Estudo de caso baseado em RA: marcadores naturais georre- ferenciados com detecção em tempo real	92
5.5.1.1	Estimativa de pose	96
5.5.1.2	Discussão	99
5.5.2	Estudo de caso baseado em realidade virtual: metodologia se- miautomática para desenvolvimento de panoramas aumentados	100
5.5.2.1	Discussão	104
6	CONCLUSÃO	107

REFERÊNCIAS	110
-----------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

Realidade Aumentada (RA) é uma abordagem que habilita o usuário a visualizar o mundo real com objetos virtuais sobrepostos ou combinados (AZUMA, 1997). A realidade aumentada faz uso do registro de informações ou imagens geradas por computador a partir de uma visão que o usuário tem do mundo real (mundo físico). Com isso, pretende aumentar ou ampliar a experiência de visualização do usuário, com a adição de informação que esteja associada ao contexto do usuário, resultando em um aumento da compreensão que este usuário possui do ambiente em que se encontra.

Especialmente na última década, aplicações que usam realidade aumentada têm sido desenvolvidas para diversas áreas, tais como a área médica, militar, educacional, turismo, geoespacial, design, dentre outras (CARMIGNIANI et al., 2011; NEE et al., 2012; MEKNI; LEMIEUX, 2014; FIORENTINO et al., 2014; ENGELKE et al., 2015; GHEISARI et al., 2016a; GHEISARI et al., 2016b).

Apesar do crescimento e demanda por aplicações que utilizam o conceito de realidade aumentada, tanto no cenário de treinamento quanto na realização de operações, o uso destes sistemas ainda é feito de forma bastante limitada em algumas áreas como Arquitetura, Engenharia e Construção, pois estas áreas requerem alta precisão, além do processamento em tempo real (CÔTÉ et al., 2013b). A dificuldade de uso de realidade aumentada é causada principalmente pela necessidade do processamento em tempo real. Além disso, existem fatores relacionados à complexidade das informações envolvidas em cada área e o processo de detecção/rastreamento de objetos presentes nesses cenários.

Outro grande desafio em sistemas de realidade aumentada é a determinação da forma de apresentação das informações adicionais e onde estas informações devem ser exibidas. Podemos afirmar que o ponto central das tecnologias de realidade aumentada é a aquisição de imagens com uma câmera em tempo real e a estimativa das características dessas imagens de modo a possibilitar a inclusão de objetos virtuais nos locais corretos, independente do ponto de vista do usuário. Uma solução típica para esse problema é a utilização de um objeto com um padrão desenhado conhecido, denominado de marcador fiducial (ou artificial), que é inserido na cena para esse fim.

Outra abordagem possível é a utilização de objetos que já façam parte das cenas naturalmente e sejam utilizados para inclusão das informações virtuais. Essa abordagem

cria o conceito de marcadores naturais e pode ser utilizada para auxiliar o problema de detecção.

Marcadores naturais (*markerless* ou *natural markers*) são objetos detectáveis presentes em cenas não preparadas ou instrumentadas previamente. A detecção desses objetos requer a extração de características das imagens e procedimentos de comparação (*matching*) com padrões previamente registrados. A utilização de realidade aumentada proporciona ainda, com base na interatividade, que o usuário selecione o tipo de informação desejada em relação a um determinado objeto.

Apesar dos benefícios, o uso de marcadores naturais em realidade aumentada ainda não é uma prática adotada largamente nas aplicações e principalmente na indústria. A principal causa disso é a dificuldade em realizar todas as operações necessárias deste tipo de marcador (detecção, rastreamento, estimativa de pose, carregamento de informações) em tempo real. Na área de realidade aumentada diversos protótipos e técnicas foram apresentados ao longo dos anos, mas o custo de implementação e os benefícios da utilização de realidade aumentada geralmente são considerados em aplicações reais, como os cenários industriais.

Por conta desses e de outros fatores, os marcadores fiduciais têm sido largamente utilizados para criação dos ambientes de realidade aumentada. Sua utilização aumenta a robustez e reduz o custo computacional, mas se faz necessária a inclusão deste tipo de marcador no ambiente. Essa restrição dificulta bastante sua utilização, principalmente em ambientes industriais com insalubridade e periculosidade.

Ao contrário do uso de marcadores fiduciais, a utilização de marcadores naturais para sistemas de realidade aumentada é considerada a tarefa mais complexa no processo de criação destas aplicações. Embora existam técnicas que tratem do problema de detecção de características e reconhecimento de objetos (LOWE, 2004; BAY et al., 2008; RUBLEE et al., 2011; NIGAM; DEB; KHARE, 2013; LIANG et al., 2015), não existe uma solução de uso geral e o tempo de processamento se constitui um desafio para estes sistemas, já que em aplicações de realidade aumentada, a detecção necessita ser realizada em tempo real.

Na área de visão computacional, a detecção de objetos em imagens é um dos problemas fundamentais. O problema da detecção associado à estimativa de pose tem sido um dos problemas de pesquisa desafiadores na área.

Existe, portanto, uma demanda por meios de utilização de tecnologias de realidade

aumentada e Realidade Virtual (RV) em ambientes industriais ao ar livre (*outdoor*). Verifica-se ainda que uma solução robusta para detecção e identificação de objetos em tempo real permanece um problema em aberto e desafiador. Diversas razões existem para explicar esse desafio, tais como: iluminação, mudança brusca de ponto de vista que modifica o foco da câmera e dificulta a obtenção das características da imagem, oclusão de parte do objeto, dentre outras.

Faz-se necessário apresentar propostas de inovação no aspecto de visualização desses cenários. De forma geral, o uso de marcadores naturais permite criar ambientes com anotações de informações que independam de acessórios incluídos no ambiente real e possibilitem uma navegação mais natural pelo ambiente criado.

1.1 Objetivos

O objetivo desta tese é a proposição de uma metodologia para construção de ambientes de realidade aumentada e panoramas aumentados baseados na detecção de marcadores naturais em cenas de ambientes industriais, permitindo a detecção do tipo dos objetos na cena, sua identificação e a detecção do ponto de vista (pose) de onde está sendo visualizado. Esta tese apresenta ainda duas arquiteturas de *software* para a construção de aplicações em cenas de ambientes industriais de realidade aumentada e realidade virtual que implementam a metodologia proposta.

1.1.1 Objetivos específicos

De maneira específica, pretende-se:

- Propor uma metodologia para detecção de equipamentos em um ambiente industrial, com imagens reais do ambiente de operação para aplicações de realidade virtual baseada em panoramas e realidade aumentada;
- Permitir a integração da visualização do ambiente físico com anotações de informação acerca dos equipamentos;
- Propor uma arquitetura semiautomática para construção de panoramas aumentados;
- Possibilitar que em aplicações de realidade aumentada:

- Sejam associados marcadores naturais detectados a dados georreferenciados em tempo real;
- Seja estimada a pose dos objetos detectados e permitida a inclusão de modelos tridimensionais;
- Sejam construídas aplicações com visão monocular e estereoscópica utilizando a metodologia proposta de marcadores naturais;
- Em aplicações de realidade virtual com panoramas aumentados:
 - Seja realizada a visualização com panoramas esféricos, garantindo imersão total do usuário;
 - Validar a arquitetura proposta com a construção de uma aplicação de realidade virtual com panoramas aumentados;

1.2 Motivações

Uma das motivações desta pesquisa é a busca por uma solução para uso de marcadores naturais em ambientes de realidade aumentada, que em geral utiliza marcadores fiduciais, além da demanda crescente por aplicações de realidade aumentada voltadas para o cenário industrial. Porém, apesar do grande potencial do uso desta tecnologia em ambientes industriais, diversos problemas como a detecção e identificação de objetos em tempo real, a utilização de dispositivos móveis (que possuem menor capacidade de processamento), a conexão com as bases de dados contendo informações dos equipamentos ainda se apresentam como desafios para o desenvolvimento dessas aplicações.

O desenvolvimento de propostas de visualização com realidade aumentada visa possibilitar a instrumentação dos operadores como uma ferramenta inovadora para visualização de dados.

Além do uso da detecção com conceito de marcador natural em realidade aumentada, é possível aplicá-la na construção de ambientes de realidade virtual, visando a construção mais rápida destes sistemas e auxiliando os usuários para inclusão de anotações. Além disso, a visualização com realidade virtual visa apresentar um formato de visualização remota das áreas de operação.

Vale ressaltar que a proposta de visualização com realidade virtual é a evolução do trabalho de (REIS et al., 2014). As melhorias pretendidas nesta pesquisa em relação

ao trabalho original são a inclusão do panorama esférico para visualização de cenários das subestações (que permite uma visão com maior grau de imersão) e a proposição de uma metodologia semiautomática da construção destes cenários baseada em marcadores naturais para panoramas aumentados.

1.3 Contribuições

A presente tese possui como principais contribuições:

- Proposta para integração de algoritmos de pré-processamento (para reduzir efeitos de iluminação) e de detecção de *features* para uso como marcadores naturais.
- O desenvolvimento de uma metodologia que faz uso dos marcadores naturais associados aos dados georreferenciados como proposta inovadora em ambiente industrial, permitindo a anotação de equipamentos e apresentação de informações aumentadas. Essa proposta, associada ainda aos dispositivos móveis, possibilita a visualização de dados no local em que o operador realiza suas atividades de manutenção, como uma solução para descentralizar as informações das salas de controle.
- Proposta de visualização remota de dados com criação rápida de ambientes de realidade virtual, através da criação semiautomática de ambientes baseados em panoramas aumentados. Essa contribuição apresenta um novo formato para visualização de informações de equipamentos industriais com realidade virtual.
- Utilização de algoritmos de estimativa de pose ($EPnP$ e RANSAC) com abordagem de uso de múltiplos modelos, possibilitando a estimativa de pose independente do ponto de vista do usuário.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica necessária para a construção deste trabalho, abordando os temas referentes à visão computacional, realidade virtual e realidade aumentada. O Capítulo 3 apresenta trabalhos relacionados à pesquisa, que mostram a evolução na área de visão computacional associada à detecção de objetos e das tecnologias de realidade virtual e realidade aumentada, além das aplicações no cenário industrial. O Capítulo 4 apresenta a metodologia

proposta para anotação com uso de marcadores naturais, bem como as arquiteturas voltadas para realidade aumentada e realidade virtual. O Capítulo 5 apresenta os resultados do trabalho, contendo as diferentes abordagens e aplicações. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados obtidos, as contribuições atingidas e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se o referencial teórico utilizado no desenvolvimento desta tese. As seções e subseções seguintes mostram com maior detalhamento os temas e as técnicas utilizadas em processamento de imagens e reconhecimento de padrões.

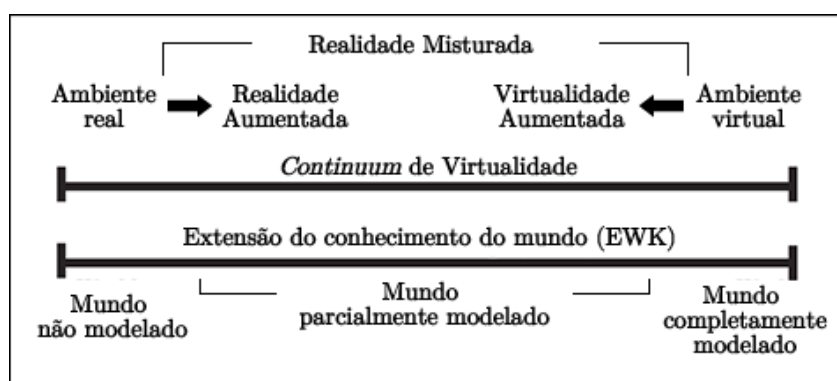
2.1 Realidade Virtual e Aumentada

De acordo com (CARDOSO et al., 2007), realidade virtual e realidade aumentada são áreas relacionadas com novas gerações de interface do usuário facilitando e potencializando as interações do usuário com as aplicações computacionais.

Realidade virtual é considerada uma das formas mais avançadas de interface do usuário com o computador. Segundo a definição clássica, é um formato no qual os usuários podem visualizar, manipular e interagir com computadores e dados complexos (AUKSTAKALNIS; BLATNER, 1992). Pode ainda ser considerada uma técnica avançada de interface, na qual podemos conseguir um maior grau de imersão do usuário em um ambiente sintético tridimensional gerado por computador.

Outro conceito importante é que os elementos de realidade virtual e realidade aumentada são partes constituintes do *continuum* de realidade-virtualidade definido em (MILGRAM; KISHINO, 1994). De um lado, o ambiente é puramente real e do outro lado o ambiente é puramente virtual (Figura 1).

Figura 1 – *Continuum* de realidade-virtualidade.



Fonte: Adaptado de (MILGRAM; KISHINO, 1994)

Dentro desse conceito, a realidade virtual possui três características principais: imersão, interação e envolvimento. Essas características simultaneamente proporcionam

uma tecnologia de inovação e melhoria da forma de visualização e manipulação de dados. Nesta compreensão, pode-se imaginar diversas aplicações de visualização.

Segundo (BOWMAN et al., 2004), as interfaces de usuário (UI) são parte crucial no processo de desenvolvimento de *software* e hardware. Apesar de todo produto relacionado à área de computação se projetar como de fácil uso ou intuitivo, a grande maioria das UIs tem utilizado os mesmos princípios e design na última década ou mais. A utilização da realidade virtual, dos ambientes virtuais e da própria realidade aumentada tem mudado esta visão e tem se apresentado como uma evolução das interfaces de usuário.

Nos sistemas de realidade virtual geralmente existe um usuário, uma interface homem-máquina e um computador. O usuário é inserido em um novo mundo gerado virtualmente no computador, usando dispositivos sensoriais de percepção e controle, sendo que os ambientes virtuais podem simular tanto ambientes imaginários quanto ambientes reais.

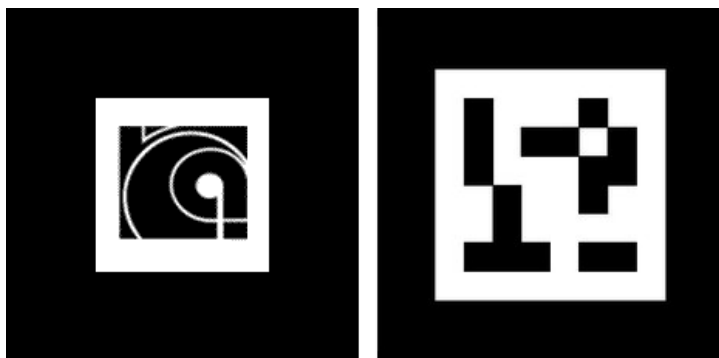
A realidade aumentada, por outro lado, pode ser considerada uma tecnologia que possibilita visualizar mais informações do ambiente real. De acordo com (KREVELLEN; POELMAN, 2010), a realidade aumentada combina objetos reais e virtuais em um ambiente real; alinha objetos reais e virtuais mutuamente; e possui interatividade, tridimensionalidade e execução em tempo real.

A tecnologia de realidade aumentada não se limita a uma tecnologia de visualização simplesmente e nem se limita ao sentido da visão. O conceito de realidade aumentada pode ser aplicado a todos os sentidos, incluindo audição, tato, paladar e olfato. A abordagem de remover objetos reais sobrepondo com objetos virtuais também pode ser considerada um exemplo de realidade aumentada.

As aplicações de realidade aumentada geralmente necessitam de um marcador para incluir as informações virtuais. Esses marcadores podem ser fiduciais (Figura 2) – utilizados na maioria das aplicações de RA – ou marcadores naturais, sendo que este último tipo necessita processar a informação natural da cena observada com técnicas de processamento de imagens e ainda utilizar informações adicionais como geolocalização, dados de giroscópio, sensores térmicos, dentre outros sensores.

Os marcadores naturais geralmente são específicos para cada tipo de aplicação e o tipo de objeto a ser identificado. Para o processo de inclusão dos elementos virtuais 3D necessitam ainda do cálculo de alinhamento do sistema de coordenadas do objeto ao sistema de coordenadas do mundo para o correto posicionamento das informações virtuais

Figura 2 – Marcadores fiduciais para realidade aumentada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3D na cena real.

Podemos classificar as aplicações de realidade aumentada de acordo com o dispositivo de visualização em:

- Baseada em dispositivos móveis: captura de vídeo e localização (GPS¹) do dispositivo;
- Baseada em visualização desktop: utiliza a webcam e apresenta no monitor o vídeo capturado juntamente com os objetos virtuais;
- Baseada em óculos (NORMAND; MOREAU, 2012):
 - Visores semitransparentes: geralmente usam lentes especiais com visão classificada como *Optical See-Through* (OST);
 - Visores baseados em vídeos: subdividem-se com o uso de *Head-Mounted Displays* (HMD²) e com uso de dispositivos com câmeras não acopladas ao usuário (como *tablets* e *smartphones*)
- Baseada em projetores: denominados de *Spatially Augmented Reality* (SAR), que consiste na adição de informação no mundo real. Os projetores inserem as imagens virtuais geradas por computadores diretamente em objetos reais.

Também podemos classificar essas aplicações quanto à dimensão dos tipos de realidade aumentada:

¹ Global Positioning System é um sistema de posicionamento global americano largamente utilizado que usa a triangulação de satélites para determinação da posição do utilizador.

² *Head-Mounted Displays* são dispositivos de visualização montados na cabeça dos usuários, podendo disponibilizar além da tela de visualização outros sensores como giroscópio, GPS, dentre outros.

- Bidimensional (2D): conhece a posição e orientação de um plano e sobrepõe a imagem sobre o vídeo;
- Tridimensional (3D): conhece a posição de todos os objetos da cena e insere objetos reais e virtuais no buffer, o que possibilita a renderização com oclusão.

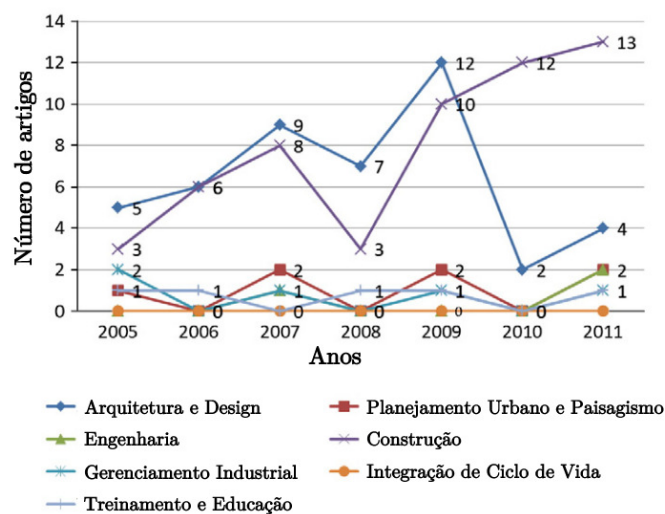
Em (WANG et al., 2013) apresenta-se uma classificação de realidade aumentada, mostrando as perspectivas relacionadas à pesquisa em realidade aumentada. São analisadas as aplicações desenvolvidas e inovações publicadas entre 2005 e 2011, em um total de 120 artigos especificamente relacionados a realidade aumentada. Neste levantamento de trabalhos publicados, uma avaliação importante é a quantidade de artigos publicados em cada área. As áreas com menor quantitativo foram as áreas de Engenharias em geral (essa área não inclui a engenharia civil que está classificada como área de Construção) com apenas 3 artigos e a área de Gerenciamento Industrial totaliza 5 artigos. Por outro lado, as áreas com maior adesão às aplicações de realidade aumentada foram de Construção e Arquitetura com 55 e 45 artigos, respectivamente (Figura 3). Estes dados mostram que a tecnologia de realidade aumentada pode ser utilizada em diversas áreas e algumas dessas áreas, como as engenharias não relacionadas à construção, ainda possui pouco destaque nesta utilização. Além disso, um dado importante mostrado neste comparativo é que nenhum dos trabalhos avaliados foi adotado como ferramenta na área industrial. Na avaliação realizada neste aspecto, o trabalho projeta que essa adoção pela indústria deverá acontecer naturalmente em decorrência do amadurecimento dos métodos relacionados à realidade aumentada.

A possibilidade de usar informações adicionais ao ambiente real no formato de realidade aumentada permite ainda auxiliar atividades de manutenção, pois possibilita a visualização das informações no local onde a demanda existe. Geralmente o operador precisa se deslocar até a sala de controle para visualizar uma determinada informação, porém com o uso de realidade aumentada é possível incluir as informações desejadas por esse operador e incluir como anotações ao equipamento.

De acordo com (CRAIG, 2013), os sistemas de realidade aumentada necessitam de requisitos de *hardware* e *software* para implementar uma experiência aceitável de realidade aumentada.

Existem diversos equipamentos utilizados para fornecer o suporte necessário às aplicações de realidade aumentada, assim como diferentes tecnologias que podem prover

Figura 3 – Número de artigos em cada área de ambientes construídos no período de 2005 a 2011



Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2013)

as funções necessárias. Na verdade, em muitos casos – assim como neste trabalho – várias tecnologias são utilizadas em conjunto para implementar as funções em uma aplicação de realidade aumentada.

As tecnologias e o hardware voltado para construção de sistemas de realidade aumentada têm mudado rapidamente e as tecnologias envolvidas têm ficado cada vez mais acessíveis aos usuários (CRAIG, 2013). Os principais componentes de um sistema de realidade aumentada são:

- Sensores;
- Processadores;
- Telas para visualização (*displays*).

Os sensores são utilizados para recuperar informações do mundo real e comunicá-los à aplicação de realidade aumentada para uma variedade de objetivos. Um dos objetivos é proporcionar informação relacionada à localização e orientação do usuário inserido no ambiente de realidade aumentada. Outras funções disponíveis são informações relacionadas a temperaturas, iluminação e qualquer outra informação sobre o ambiente. Obviamente para cada tipo de informação desejada pode existir um tipo diferente de sensor.

A maioria dos sensores converge para o objetivo de tentar localizar o usuário dentro do mundo real (também chamado de rastreamento ou *tracking*). Nas aplicações de

realidade aumentada, a visualização de informações virtuais e mundo real apresentam-se misturadas. Dessa forma, a localização do usuário no mundo real é muito importante para atualizar as informações virtuais.

O acelerômetro é um sensor utilizado para obter informação de movimentação relativa baseada em eixos. São sensores de baixo custo e basicamente utilizam outros sensores, como estruturas microscópicas de cristal que se estressam por causa das forças de aceleração. O acelerômetro interpreta a tensão desses cristais para descobrir o quão rápido o *smartphone* está se movimentando. Um exemplo prático desse sensor é a identificação da posição do *smartphone* para modificar a câmera do modo retrato para o modo paisagem e *vice-versa*.

Existem diferentes métodos utilizados para realizar o rastreamento em sistemas de realidade aumentada. Em cenários *indoor*³ a visão computacional é utilizada através do uso de diferentes técnicas, sendo que o principal sensor utilizado neste caso é a própria câmera. As câmeras podem ter diferentes resoluções e finalidades (como câmeras de visão noturna, infravermelho, dentre outras), embora na maioria das vezes as aplicações desenvolvidas façam uso de simples câmeras web (*webcams*) ou câmeras presentes em dispositivos móveis.

Um exemplo desta utilização de sensores para a detecção de marcadores naturais é o Xbox Kinect (MICROSOFT, 2016b), que utiliza uma combinação de sensores de profundidade, rastreamento óptico e um conjunto de microfones (rastreamento acústico) para conceber um sistema bastante preciso que faz o rastreamento das ações dos participantes, sem a necessidade dos usuários terem que vestir ou segurar algum objeto para identificar sua localização e movimentação. No entanto, esta solução possui como limitação a distância. O usuário precisa estar próximo ao equipamento de detecção para esta finalidade, o que pode ser melhorado com o uso de dispositivos móveis.

Além do receptor GPS que, em geral, já vem acoplado aos *smartphones*, outro sensor utilizado na etapa de *tracking* é o sensor de compasso⁴, que é utilizado basicamente para retorno da informação de orientação do usuário.

Esses sensores têm se difundido extensamente nos dispositivos móveis apre-

³ Ambientes fechados, que dificulta a utilização de satélites GPS

⁴ Sensor embutido em *smartphones* que aponta para a direção de orientação do usuário. Em geral, as bússolas utilizam ímãs, mas em dispositivos móveis utiliza-se o efeito Hall para medir frequências extremamente baixas provenientes de uma região (norte ou sul) e, juntamente com o acelerômetro, fornecem a orientação ao usuário.

sentando, inclusive, várias versões e fabricantes que disponibilizam telas multi-toque, acelerômetros, giroscópios e sensores de profundidade.

2.1.1 Anotações contextualizadas

Um dos motivos que denota o grande potencial da realidade aumentada é que o uso de anotações nestes sistemas proporcionam um meio eficiente e intuitivo para disponibilizar aos usuários uma informação contextualizada e associada à visão do mundo real. Dessa forma, as anotações se tornam informações a respeito de um determinado contexto e na mesma localização do objeto ao qual está relacionado (WANG et al., 2013; WITHER; DIVERDI; HÖLLERER, 2009).

Anotações são utilizadas como uma solução para visualização de informações, tanto em realidade virtual quanto em realidade aumentada. É mais comum associar este termo aos ambientes de realidade aumentada, no entanto, de acordo com a definição apresentada em (WITHER; DIVERDI; HÖLLERER, 2009), uma anotação é a adição de informação extra a respeito de um objeto; ou informação virtual associada a um determinado objeto (não necessariamente sobre o próprio objeto) e registrada a esse objeto. Podem ser consideradas um meio importante para ampliar as informações do mundo em torno do usuário. Além disso, o uso de anotações adiciona contexto à informação, pois é disponibilizada conjuntamente ao objeto anotado.

As anotações subdividem-se em duas categorias principais: diretas e indiretas. As anotações diretas adicionam informações diretamente sobre o objeto como uma camada e estão diretamente relacionadas com o objeto em si. Por exemplo, inserir os dados de um equipamento sobrepostos ao próprio equipamento.

Por outro lado, as anotações indiretas adicionam informação de forma mais abstrata. São geralmente usadas em funções de navegação e são entendidas como parte de um conteúdo global ao invés de limitar-se ao objeto anotado. Um exemplo desse tipo de anotação seria a criação de um mundo virtual 3D com avatares de operadores a partir da vista atual do operador, e possibilitar a interação deste operador com outras informações da planta e seus equipamentos. Nesse caso, as informações não são restritas a um objeto em particular, mas proporcionam conteúdo virtual daquilo que existe no mundo real. Além disso, tanto anotações diretas quanto indiretas podem assumir formatos de texto, figuras, modelos, sons, e até de interações hápticas.

De acordo com (WITHER; DIVERDI; HÖLLERER, 2009), cada anotação possui duas características principais:

- Dependência de localização: a anotação funciona como um *link* entre o mundo real e virtual. A informação virtual precisa estar registrada em algum sistema de coordenadas e também precisa estar associada a um objeto particular da cena.
- Independência espacial: deve existir alguma diferença entre o conteúdo virtual e a visualização do ambiente real para que exista alteração na percepção do usuário, caso contrário, não pode ser considerada uma anotação.

Segundo (RUBIO et al., 2004), o objetivo da construção de ambientes de visualização aumentada é a obtenção de sistemas portáteis que sejam leves, pequenos, e tão potentes quanto possível, permitindo ao usuário a exploração de um ambiente não preparado. O uso de anotações em objetos em ambientes *outdoor* possibilita a construção de sistemas de realidade virtual e realidade aumentada em várias áreas de aplicação.

2.1.2 Marcadores naturais

O processo de registro (alinhamento de objetos virtuais) e detecção são considerados críticos em aplicações de realidade aumentada (NIVEDHA; HEMALATHA, 2015). A tarefa de detecção é considerada também um obstáculo para aplicações *outdoor* e torna-se um desafio para aplicações de realidade aumentada devido à restrição de visualização em tempo real. Em aplicações que requerem processamento em tempo real, essa complexidade ocasiona um *delay* (atraso) ao processamento e inviabiliza, em muitos casos, a criação de aplicações de realidade aumentada.

Como foi dito anteriormente, uma das formas de tornar essa detecção mais rápida e eficiente é através da utilização de marcadores fiduciais, o que geralmente acontece em sistemas de realidade aumentada. Os marcadores fiduciais são padrões bidimensionais incluídos em uma determinada localização que podem ser utilizados para incluir informações através de algoritmos simplex de processamento de imagem (MENG-MENG; XIAO-WU; YI-LI, 2010).

No entanto, em ambientes industriais, a maioria dos equipamentos está energizado durante todo o tempo. Essa característica restringe tanto a movimentação de pessoas para

distâncias mínimas de segurança quanto o processo de instalação de marcadores desse tipo nesses cenários.

Mesmo com o uso de categorias de marcadores fiduciais que são mais resistentes aos desgastes naturais causados por inúmeros fatores (calor, mau tempo, dentre outros), esse tipo de marcador precisa estar visível ao observador para ser detectado e calculado pelo dispositivo de realidade aumentada. Essa desvantagem limita sua aplicação em ambientes industriais devido aos problemas de oclusão que podem ocorrer causados por outros equipamentos e elementos do ambiente, ou mesmo da situação do observador estar visualizando uma face do equipamento que não possui o marcador fiducial instalado.

Neste sentido, o meio mais eficiente de detectar objetos de interesse é através do uso de marcadores naturais. Em outras palavras, as aplicações devem possuir a capacidade de distinguir características entre objetos presentes na cena (KIM; JUN, 2011). Vale ressaltar que há condições imprevisíveis que podem dificultar a detecção tanto com a abordagem utilizando marcadores fiduciais quanto com marcadores naturais.

Apesar de originalmente a realidade aumentada utilizar-se de marcadores fiduciais para inclusão dos objetos virtuais na cena real, a utilização dos marcadores naturais proporciona um impacto na criação de ambientes de realidade aumentada. Os avanços da tecnologia têm feito os sistemas de realidade aumentada migrar de sistemas baseados em marcadores fiduciais para sistemas que não necessitam de marcadores. Em geral, as soluções *markerless*, utilizam unicamente os dados de GPS para marcação de localizações e pontos de informação (POIs), dissociados de etapas de processamento de imagens (Figura 4).

Ainda de acordo com (WANG et al., 2013), as tendências para as aplicações de realidade aumentada no futuro devem ser:

- Padronização dos protocolos de comunicação e formatos de dados para compartilhamento entre diferentes plataformas de RA;
- Arquitetura orientada a serviço (SOA) para complementar a arquitetura de comunicação cliente-servidor;
- Sistemas de realidade aumentada móveis multiusuários;
- Utilização de reconhecimento de objetos e processamento de imagens ou realidade aumentada *markerless*, que pode ser exemplificada na Figura 5;

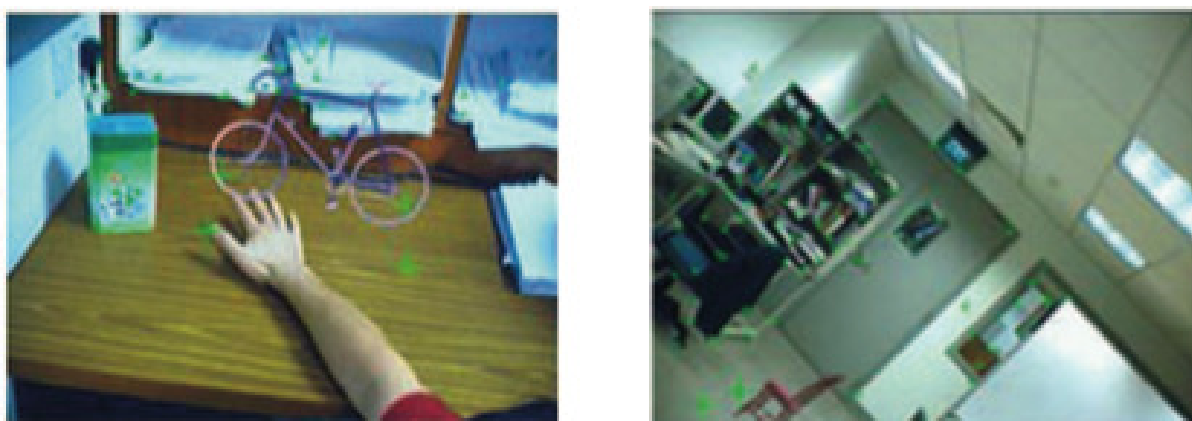
Figura 4 – Sistema de realidade aumentada baseado em dados GPS.



Fonte: (WIKITUDE, 2015)

- Interação homem e sistema de realidade aumentada através de comandos naturais como gestos;
- Ferramentas de autoria para construção de ambientes de realidade aumentada.

Figura 5 – Utilização de realidade aumentada *markerless* para especificação de 4 pontos necessários para calcular o sistema de coordenadas em que os elementos virtuais são adicionados à cena.



Fonte: (YUAN; ONG; NEE, 2006)

Existem vantagens com a utilização do marcador natural que podem ser visualizados na Tabela 1. As principais vantagens são a utilização do ambiente sem alteração ou necessidade de inclusão de marcadores fiduciais, e pode ser construída com a detecção independente do ponto de vista do observador.

Como pode ser observado, o reconhecimento de objetos é a tendência natural das aplicações de realidade aumentada. Para isso, a etapa de detecção dos objetos precisa ter

Tabela 1 – Comparação de marcadores naturais de realidade aumentada em tempo real.

Aspecto técnico	Marcador fiducial	QR Code	Marcador natural
Independência de treinamento	Não	Sim	Não
Armazenamento do modelo de detecção	Local	Internet	Local ou Internet
Ambiente permanece inalterado	Não	Não	Sim
Detecção independente do ponto de vista	Não	Não	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

um cuidado relevante para possibilitar a inclusão na posição correta em tempo real.

2.1.3 Sensores

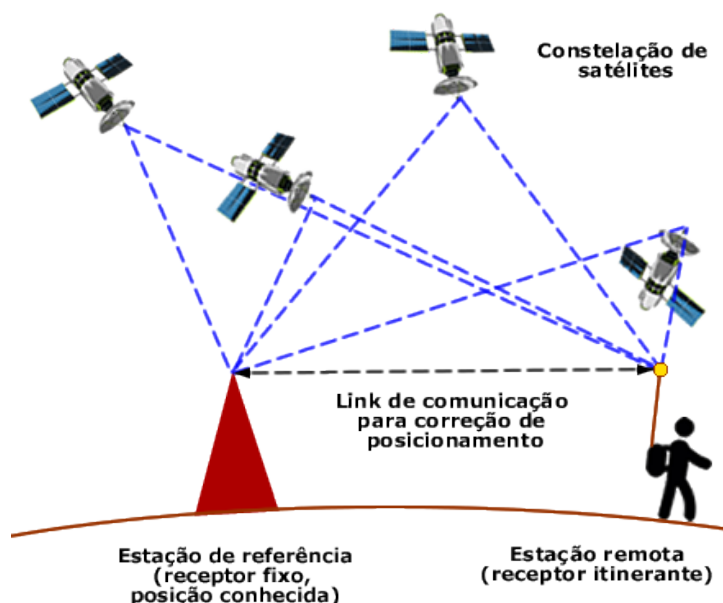
Diversos dispositivos, como *smartphones* e câmeras digitais, possuem sensores auxiliares de geolocalização. Comumente referenciam-se dados GPS ao conceito de dados georreferenciados, mas vale ressaltar que o GPS (Americano) é apenas um dos sistemas de posicionamento global, existem outros como o GLONASS (Russo), Galileo (União Europeia) e o Compass (Chinês).

A definição apresentada em (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001) mostra que os dados georreferenciados são aqueles que contêm as informações de coordenadas geográficas de uma localidade ou de um objeto qualquer. Normalmente para a aquisição dos dados são utilizados quatro satélites conectados a uma estação de referência próxima ao receptor do sinal para correção de posicionamento (Figura 6), porém ainda com as correções aplicadas, os dados possuem erro estimado de precisão de 5 a 15 metros em aparelhos civis, dependendo do cenário *indoor* ou *outdoor*.

Para aplicações que não necessitam de grande precisão, o sensor GPS consegue solucionar o problema da localização, sendo utilizado principalmente em situações de localização em mapas.

Em aplicações como a detecção de um equipamento dentro de um ambiente industrial, utilizar apenas o dado de GPS não constitui uma solução razoável. Existem diversos *frameworks* para construção de ambientes de realidade aumentada que utilizam apenas dados de GPS como a principal fonte de informação para adicionar informações virtuais ao mundo real. O *framework* (WIKITUDE, 2015) é um exemplo nesta categoria de soluções, que apresenta problemas, principalmente relacionados à precisão. Testes realizados com a utilização deste *framework* mostraram que a baixa precisão do sensor GPS

Figura 6 – Processo de aquisição de dados georreferenciados.



Fonte: Adaptado de (HARBOR, 2015)

afeta o resultado final da aplicação, ocasionando muitas vezes a exibição de informações em posições incorretas. Esse comportamento é causado, principalmente, devido à inexistência de uma camada de associação do elemento independente do posicionamento GPS.

Além do GPS, o sensor de compasso é outro sensor presente na maioria dos dispositivos móveis. Este sensor funciona como um apontador ao polo Norte. Os compassos em *smartphones*, devido à presença de ruídos destes dispositivos, não utilizam bússolas com ímãs comuns, ou seja, como compassos magnéticos simples, e sim uma tecnologia avançada para fornecer uma direção melhorada ao usuário.

O *smartphone* faz a medição dos sinais com frequências extremamente baixas vindas de uma direção (norte ou sul) e com a ajuda de giroscópios, fornece a orientação ao usuário. Os giroscópios são dispositivos usados para indicar as mudanças de direção de um objeto em movimento (Figura 7). São bastante utilizados como instrumentos de navegação, ajudando a manter aviões e navios em seu trajeto.

Estes tipos de compasso, baseados em giroscópios, possuem melhor desempenho que os compassos magnéticos.

Figura 7 – Giroscópio Mecânico.



Fonte: (USP-LDSV, 2016)

2.1.4 Dispositivos vestíveis (*wearable devices*)

A busca por tecnologias onipresentes, aquelas que são praticamente naturais e imperceptíveis dentro dos ambientes de operação, tem crescido em ambientes industriais. Estas tecnologias proporcionam um controle amplo dentro dos cenários e visam minimizar a complexidade já existente em muitas áreas industriais. Geralmente, essas tecnologias são compostas por sensores que trazem novas informações aos operadores de sistemas, mas segundo (OSSWALD; WEISS; TSCHELIGI, 2013), novos desafios e paradigmas nesse contexto de tecnologias onipresentes podem ser explorados, com o uso de tecnologias vestíveis, dentro dos ambientes industriais.

Existem diversos dispositivos vestíveis como, por exemplo, relógios, roupas, braceletes, luvas e óculos. Esses dispositivos são feitos sob demanda para cada finalidade. Em (JAFRI; ALI, 2014), é mostrado o potencial do uso dos dispositivos HMD, que são dispositivos vestíveis que funcionam como capacetes de realidade virtual ou realidade aumentada. Os dispositivos baseados em óculos possuem alto potencial, mas até o momento poucos são efetivamente utilizados em ambiente industrial, apesar de diversos fabricantes apresentarem protótipos e produtos nos últimos anos visando o uso dessa tecnologia (Figura 8).

Diversos protótipos têm surgido buscando versatilidade e focando em aplicações para o público em geral, apesar de algumas dessas promessas na área, como o Google Glass, não terem alcançado o sucesso esperado, sendo utilizados apenas como instrumento

Figura 8 – Exemplos de dispositivos vestíveis no formato HMD



(a) HTC VIVE



(b) Samsung Gear



(c) Microsoft HoloLens



(d) Smart Helmet® - DAQRI

Fonte: (HTC, 2016; SAMSUNG, 2015; MICROSOFT, 2016a; DAQRI, 2016)

de entretenimento e como novos *gadgets*⁵, com a finalidade de gravação de vídeos e outras funções mais simples.

A utilização de dispositivos de visualização vestíveis (*wearable display devices*), baseados em óculos, enumeram algumas vantagens para utilização, que podem facilitar o uso em sistemas de realidade aumentada, como:

- Possibilitam uma máquina computacional vestível com a liberdade das mãos do usuário, permitindo que as tarefas sejam executadas;
- Eliminam a necessidade de orientação manual do dispositivo. A tarefa de mudar a visão do observador é realizada de forma natural;
- Possuem potencial para disponibilizar funções para tarefas diferentes disponíveis no computador portátil acoplado à cabeça do usuário.

De acordo com (HAN; HAN; KIM, 2014), a busca por dispositivos vestíveis na indústria é considerada uma evolução ao uso de *smartphones*. Esses dispositivos não devem significar mudanças dos hábitos pessoais enquanto são utilizados. Além disso, quando se

⁵ Equipamento com função específica. Podem ser entendidos ainda como dispositivos eletrônicos portáteis com forte apelo de inovação em tecnologia.

usa um HMD o usuário não necessita fornecer entrada de dados; o dispositivo inteligente deve utilizar sensores e mostrar a informação desejada sem intervenção do utilizador.

O presente trabalho apresenta a aplicação da metodologia na construção de *softwares* utilizados em dispositivos vestíveis. Os HMDs são considerados dispositivos vestíveis, como mostrado em (JIANG et al., 2015), e possuem diversos modelos como óculos ou capacetes operacionais. Dessa forma, os dispositivos vestíveis devem ser considerados como um novo formato de sistemas computacionais que proporcionam serviços exclusivos e personalizados ao usuário.

2.1.5 Panoramas aumentados

Os panoramas são definidos como uma visão ampla de um cenário particular. Muitos trabalhos sobre panoramas (BROWN; LOWE, 2007; CARUFEL; LAGANIERE, 2011) focam na questão de estratégias de casamento de características (*feature matching*) de imagens planares para a montagem de uma imagem panorâmica. Existem diversos tipos de panoramas e cada tipo possui um modo específico de interação e visualização.

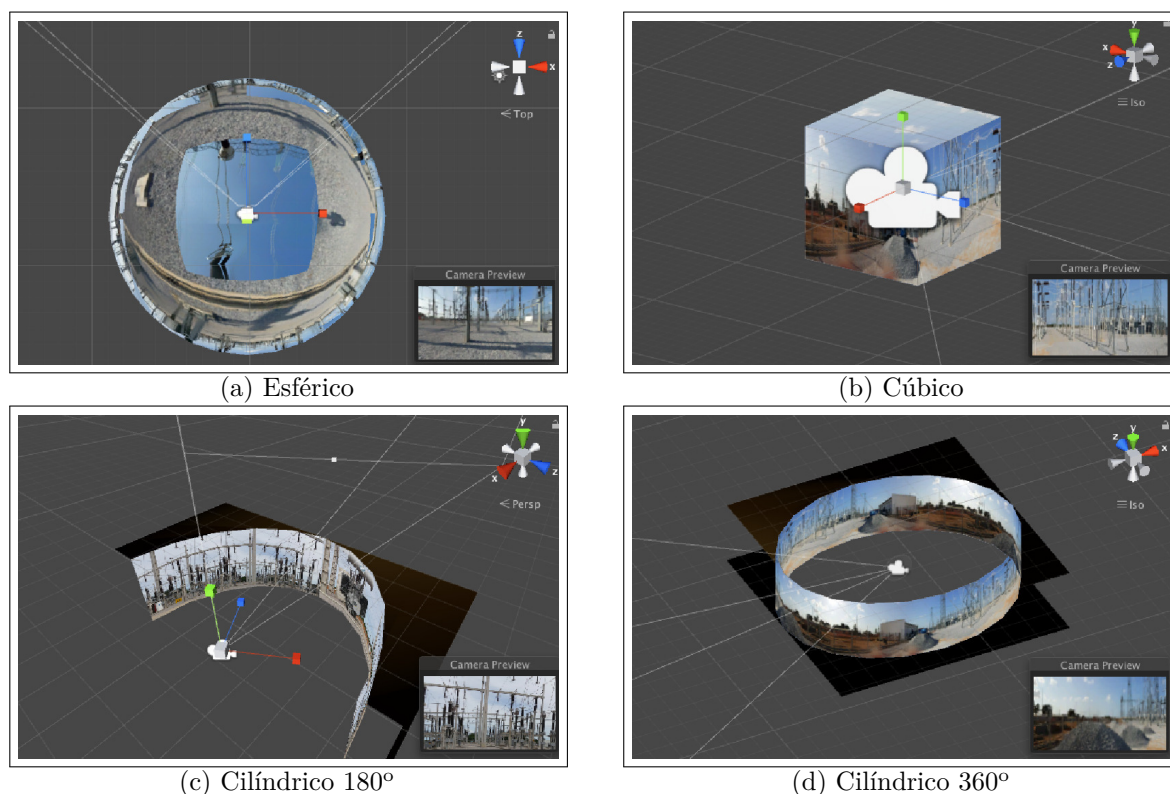
Existem diversas técnicas para montagem de panoramas, que são classificadas em dois grupos: métodos ópticos e métodos baseados em mosaico de imagens. Os métodos ópticos utilizam sistemas dióptrico e catadióptrico para aquisição de imagens. O sistema dióptrico consiste basicamente no uso de lentes do tipo *fisheye*, com amplo campo de visão (*field of view* - FOV), enquanto o catadióptrico combina espelhos e lentes para projetar o cenário ao redor da câmera (XU et al., 2014).

Os métodos baseados em mosaico de imagens consistem na montagem dessas imagens para criação dos panoramas. Esta técnica pode ser realizada através do uso de múltiplos sensores ou pela rotação de uma câmera pelo ambiente. Consiste basicamente em criar um mosaico a partir da junção de imagens (PELEG; BEN-EZRA, 1999).

Os panoramas podem ser completos ou parciais, de acordo com o FOV que possuem. Panoramas completos representam o ambiente em 360° no sentido horizontal e no sentido vertical, sendo ideais para criação de aplicações imersivas. Os tipos mais usados e conhecidos são esféricos, cúbicos e cilíndricos. A aplicação destes tipos de panoramas é mostrada na Figura 9.

Os panoramas esféricos e cúbicos proporcionam um grau de imersividade maior, e possuem 360° horizontalmente e verticalmente. São diferenciados apenas pelo formato

Figura 9 – Tipos de panoramas



Fonte: Elaborado pelo autor.

de aquisição e o conjunto de imagens para montagem do panorama.

Os panoramas cilíndricos, apesar de possuírem 360° no sentido horizontal, não proporcionam uma visão imersiva completa na direção vertical. Apesar disso, esse tipo de panorama é bastante comum e utilizado devido à simplicidade na aquisição e construção dos panoramas. A aquisição de imagens do panorama cilíndrico pode ser realizada com uma câmera simples fixada em uma posição pivô (SHUM; SZELISKI, 2000).

A grande vantagem de aplicações que utilizam câmeras simples para o processo de montagem do panorama é o baixo custo envolvido na aquisição das imagens, sendo necessário apenas a própria câmera para criação do mosaico (LENG; LI; YANG, 2014).

O termo panorama aumentado é descrito em (GHEISARI et al., 2016a). Este conceito diz que a adição de camadas em uma visão *offline* do ambiente pode ser definida como panorama aumentado. Os panoramas aumentados, neste sentido, devido à sua característica estática, são considerados uma oportunidade para cobrir limitações do uso com uma abordagem puramente de realidade aumentada.

Nas aplicações baseadas em panoramas aumentados, a utilização de imagens do

mundo real proporciona uma experiência imersiva com maior grau de autenticidade que o uso tradicional de modelos 3D nas aplicações de realidade virtual (GURRIERI; DUBOIS, 2013; SZELISKI; SHUM, 1997). No entanto, é possível afirmar que existem aplicações e benefícios diferentes tanto para uso de modelos 3D quanto para uso de panoramas aumentados.

A maior vantagem do uso de panoramas aumentados é a redução no tempo e custo de desenvolvimento, visto que essa abordagem descarta a necessidade de criação de modelos 3D realistas. Vale lembrar que existe a necessidade de aquisição das imagens panorâmicas no cenário real, mas este processo é mais simples que a construção ou modificação dos modelos 3D.

Esta abordagem pode ser utilizada ainda com visão estéreo (estereoscopia), em um ambiente completo de imersão com panoramas aumentados. É possível também adaptar a visualização com uso de câmeras de vídeo panorâmicas em tempo real, aplicadas como texturas em aplicações baseadas em panoramas.

Um aspecto importante é a utilização de ferramentas de autoria para acelerar a construção das aplicações de realidade virtual, permitindo dinamicidade para produzir ambientes panorâmicos aumentados. Vale ressaltar que ferramentas de autoria também podem ser aplicadas à construção de ambientes de realidade aumentada. Em (GIMENO et al., 2013a), é apresentada uma ferramenta de autoria para criação de aplicações de realidade aumentada para auxiliar a execução de procedimentos industriais. O estudo mostrou um benefício de 90% do tempo gasto para construção de 259 novas aplicações. As aplicações de realidade aumentada mostraram ainda o benefício de redução de 75% dos erros durante a execução dos procedimentos pelos usuários.

Dessa forma, a utilização de panoramas aumentados permite a criação de ambientes de realidade virtual, utilizando imagens panorâmicas estáticas (ou *offline*) do ambiente de operação e também a criação de ambientes de realidade aumentada, com uso de câmeras panorâmicas de vídeo. Este trabalho apresenta, como estudo de caso, a aplicação de detecção com marcadores naturais integrados a uma ferramenta semiautomática de autoria para a construção de ambientes baseados panoramas aumentados.

2.2 Visão Computacional e Processamento de Imagens

A Visão Computacional (CV) é entendida como uma iniciativa que se utiliza de métodos estatísticos para organizar dados, usando modelos construídos com a ajuda da geometria, física e teoria de aprendizado. Por outro lado, a CV depende de uma sólida compreensão de câmeras e do processo físico de formação da imagem para possibilitar inferências a partir de valores individuais de *pixels*, e ainda combinar estas informações em múltiplas imagens com coerência. Além disso, é possível ordenar grupos de *pixels* e separá-los para construir informações com base na forma e também reconhecimento de objetos usando geometria ou técnicas de probabilidade (FORSYTH; PONCE, 2003).

Além dessa definição, de acordo com (SZELISKI, 2011), o processamento de imagens é o primeiro estágio de qualquer aplicação na área de CV. Esse passo é usado para pré-processar a imagem e convertê-la em um formato conveniente para realização de diversas análises adicionais. Exemplos de operações incluem balanceamento de cor, redução de distorção e aumento de precisão na imagem.

Segundo (OSHIRO; GOLDSCHMIDT, 2008), uma imagem qualquer pode ser compreendida como uma representação visual de um objeto. Do ponto de vista matemático, a imagem é uma função bidimensional $f(x, y)$ em que x e y são coordenadas planas, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é a intensidade ou nível de cinza da imagem no ponto determinado. Quando esta amplitude de f faz parte de um conjunto de valores finitos, ou discretos, a imagem é chamada de imagem digital (GONZALEZ; WOODS, 2008).

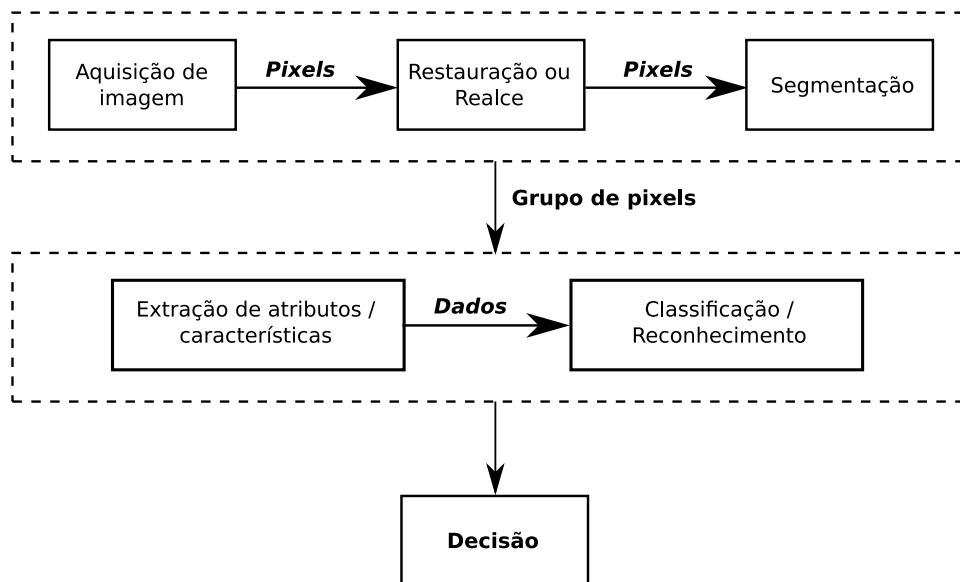
Um sistema de CV tem por objetivo obter, a partir de uma imagem, informações geométricas, topológicas ou físicas sobre o cenário e os objetos que fazem parte da imagem. De acordo com a aplicação, essas informações podem permitir o reconhecimento de padrões, classificação de objetos, movimentação de robôs, dentre outras possibilidades, pois as imagens digitais carregam consigo informações como cores e intensidade de luz, que permitem uma análise da imagem através do processamento desta imagem.

De acordo com (AZEVEDO; CONCI, 2003), existem várias etapas em um sistema de CV genérico que vai desde a captura da imagem até a etapa de decisão, baseada nas informações ou grupo de dados obtidos no processamento da imagem.

A maioria das aplicações de CV como reconhecimento ou fotografia computacional exige cuidado no processo de montagem dos estágios de processamento de imagens, com a

finalidade de conseguir bons resultados no objetivo traçado. A representação das etapas pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 – Etapas de um sistema de Visão Computacional genérico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa trata da aquisição das imagens, que neste trabalho utiliza câmeras fotográficas e tablets com a função fotográfica. As imagens adquiridas nesta pesquisa são utilizadas tanto para o treinamento quanto para os testes de detecção. Em seguida, é realizada a aplicação de técnicas para garantir melhor confiabilidade dos resultados de detecção, principalmente com relação à iluminação da cena. A técnica utilizada nesta etapa foi a filtragem homomórfica, que internamente utiliza ainda a equalização de histograma.

Na etapa de extração de características, é feita a detecção das *features* (características) das imagens para compará-las e utilizá-las para a discriminação entre classes de objetos. O método utilizado neste trabalho cria um conjunto de classificadores em cascata, que possibilita identificar a presença do equipamento treinado ou não na cena. Em seguida, na etapa de reconhecimento, o equipamento é rotulado e, então são utilizados os dados de sensores para as etapas seguintes.

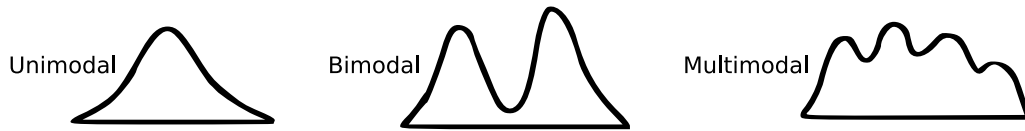
2.2.1 Técnicas de Realce

2.2.1.1 Equalização de histograma

O histograma de uma imagem é uma ferramenta muito importante para as técnicas de pré-processamento e possui diversos modelos, tais como unimodal, bimodal, trimodal e multimodal (Figura 11), servindo de base para algoritmos de segmentação (MENDES, 2010).

Nas imagens com histograma bimodal, os objetos a serem agrupados apresentam uma tonalidade bastante diferenciada do fundo da imagem e nesta categoria o valor de limiarização pode ser obtido com maior facilidade. No entanto, o mais comum é que existam regiões com superposição de informações entre o objeto e o fundo da imagem.

Figura 11 – Modelos de histogramas unimodal, bimodal e multimodal.



Fonte: Adaptado de (MENDES, 2010)

As imagens obtidas após o processo de equalização de histograma apresentam melhor contraste e possibilitam a melhoria na detecção de características da imagem, como pode ser observado na Figura 12.

Considerando uma imagem f como uma matriz de *pixels* de intensidades com valores de 0 a $L - 1$, sendo L geralmente 256 ou o número possível de valores em cada *pixel*, pode-se entender a equalização de histograma através da Equação 2.1 e Equação 2.2, a seguir, sendo p o histograma de cada possível intensidade.

$$p_n = \frac{N_{pn}}{N_{pt}}, n = 0, 1, 2, \dots, L - 1 \quad (2.1)$$

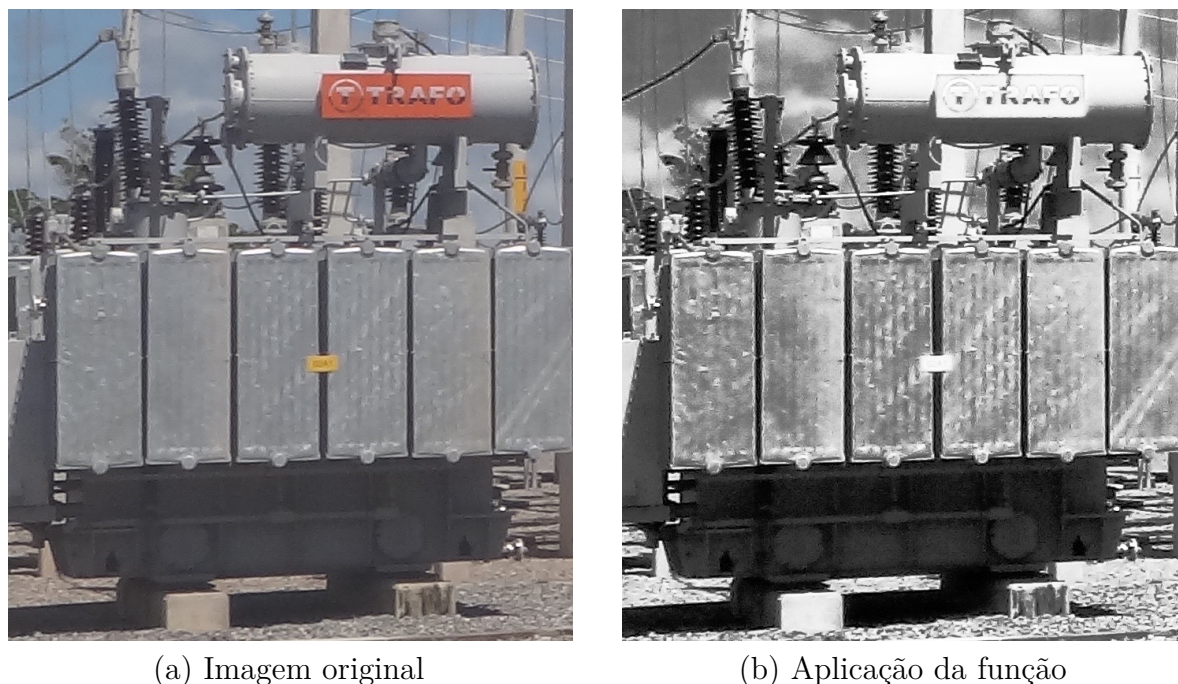
onde:

N_{pn} é o número total de pixels com intensidade n

N_{pt} é o número total de pixels

$$g_{i,j} = \left\lfloor (L - 1) \sum_{n=0}^{f_{i,j}} p_n \right\rfloor \quad (2.2)$$

Figura 12 – Equalização de histograma.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo g a imagem resultante do histograma equalizado, a equalização de histograma tem por finalidade tornar a distribuição mais uniforme, através do espalhamento de níveis de cinza ao longo da escala de resolução de contraste.

2.2.1.2 Filtragem homomórfica

O filtro homomórfico é uma técnica usada para solucionar problemas de iluminação e reflectância em processamento de imagens. O filtro analisa as informações de iluminação e reflectância, obtendo uma imagem com realce das altas frequências e atenuação das baixas frequências. A reflectância $r(x, y)$ é a quantidade de luz refletida pelos objetos da imagem e a iluminação $i(x, y)$ é a quantidade de luz na imagem (BURGISS Jr.; GOODRIDGE, 2001).

Essa técnica compreende diferentes operações sobre os componentes da imagem, de forma que os efeitos de iluminação fiquem associados às baixas frequências e os de reflectância às altas frequências. A ideia central dessa técnica é que a iluminação tipicamente varia pouco ao longo da imagem em relação à reflectância, que pode mudar abruptamente nas bordas dos objetos. Esta diferença é utilizada para separar as componentes de iluminação e reflectância.

De acordo com Melo, Vieira e Conci (2004 apud ALMEIDA, 2013) esta técnica tem como entrada para o filtro a função $f(x, y)$. Esta função representa a imagem de entrada em níveis de cinza. Em seguida os valores dos *pixels* são convertidos para o resultado do logaritmo representado na Equação 2.3, em que ocorre a separação dos componentes de iluminação e reflectância. Na imagem logarítmica é aplicado o filtro passa-baixa⁶ e o filtro passa-alta⁷. Os filtros passa-baixa e passa-alta resultam em $\log(i(x, y))$ e $\log(r(x, y))$, respectivamente, conforme representado no esquema da Figura 13 e apresentados na Figura 14 como resultado de aplicação do filtro homomórfico em uma imagem.

$$f(x, y) = \log(1 + f(x, y)) \quad (2.3)$$

Estas imagens resultantes da aplicação dos filtros são multiplicadas por valores parametrizados para os filtros passa-alta e passa-baixa. Dessa forma, o algoritmo diminui os limites amplos de intensidade em $\log(i(x, y))$ e aumenta o contraste local em $\log(r(x, y))$. Após o cálculo, é realizada a soma e normalização dos resultados.

Por fim, calcula-se o exponencial da imagem normalizada, seguida da normalização para os níveis de cinza (0-255), utilizados na imagem de entrada, e por fim, a equalização de histograma para melhoria do resultado. A utilização do filtro homomórfico visa minimizar a influência de iluminação no processamento de imagens, visto que a iluminação de uma mesma cena pode acarretar em diferenças de detecção.

2.2.2 Detecção de objetos

A detecção de objetos em uma imagem depende da escolha correta do modelo de representação (FORSYTH; PONCE, 2003). Existem diversas técnicas para detecção de objetos e cada tipo de objeto pode necessitar de mudanças na abordagem de detecção. Em alguns casos é necessário modificar todo o treinamento, mesmo que se utilize a mesma técnica de detecção. Nesta subseção serão apresentadas as técnicas e *features* utilizadas neste trabalho e citadas algumas técnicas que foram utilizadas para fins de testes.

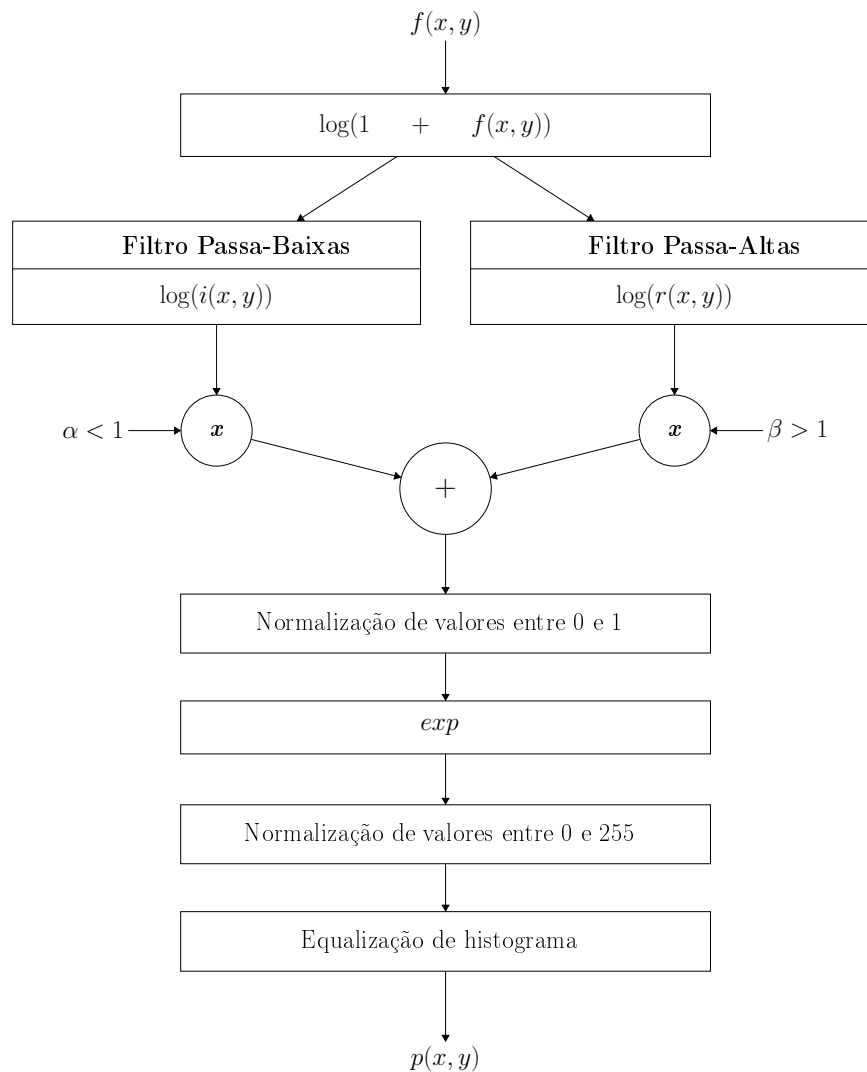
De acordo com (KHURANA; AWASTHI, 2013) as técnicas para o reconhecimento de objetos podem ser divididas em:

I. Reconhecimento de Padrões (*Template Matching*)

⁶ Filtro que permite a passagem das componentes de mais baixa frequência atenuando o contraste.

⁷ Filtro que permite a passagem das componentes de alta frequência com facilidade, porém reduz a amplitude das frequências abaixo da frequência de corte.

Figura 13 – Filtragem homomórfica.



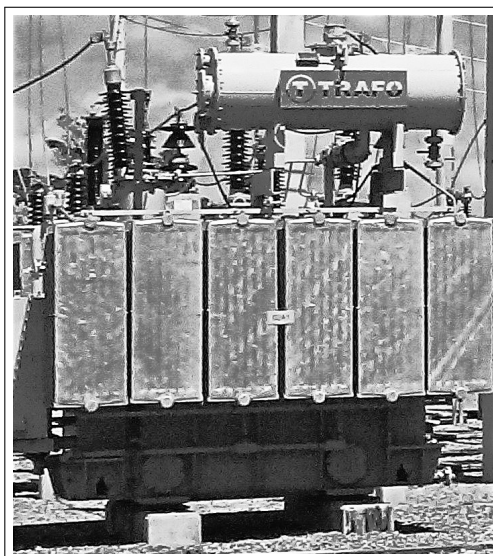
Fonte: Adaptado de (MELO; VIEIRA; CONCI, 2004).

II. Baseado em cores (*Color based*)

III. Modos Ativo e Passivo (*Active and Passive*)

- Modo passivo não utiliza amostras da imagem extraídas em etapas anteriores;
- Modo ativo (AOD) escaneia a imagem para detectar o objeto em múltiplas etapas. Em geral as 3 fases são:
 - Encontrar possíveis objetos na escala atual;
 - Refinar a posição de busca em uma escala mais refinada;
 - Verificar a presença do objeto na última posição de busca com um detector padrão.

Figura 14 – Filtro homomórfico aplicado à imagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

IV. Baseado em forma (*Shape based*)

V. Características locais e globais (*Local and global features*)

O processo de detecção de características (*feature detection*) consiste em encontrar pontos de interesse na imagem. Essas características podem ser encontradas nos processos de detecção a partir de elementos característicos das imagens como cantos, bordas, dentre outros. Com base nas características detectadas, é realizado o processo de extração de descritores da imagem, que são representações destas características encontradas em formatos compatíveis com o tipo de detector utilizado. São exemplos de descritores a orientação local da área de vizinhança do *keypoint* (ponto chave característico detectado) e a intensidade local da área deste *keypoint*.

Já os descritores de imagens podem ser definidos como um par composto por um vetor de características extraídas e uma função de distância. O vetor de características representa um conjunto de propriedades de uma determinada imagem (cor, textura, forma, etc.), enquanto a função de distância diz respeito às dissimilaridades entre duas imagens de acordo com as características dessas imagens. De outra forma, um descritor pode ser entendido como uma tupla (E, F) em que E é uma função que extrai um vetor de características V , que é utilizado para calcular a distância entre as imagens.

Existem vários tipos de detectores e descritores. Nesta pesquisa foram investigadas diversas técnicas para a detecção de características e extração de descritores com a

finalidade de testar a viabilidade das técnicas para solucionar o problema de detecção de equipamentos. As técnicas são enumeradas e descritas a seguir em ordem cronológica:

- SIFT (2003) – Abordagem clássica (original);
- FAST (2006) – Apenas detector de *keypoints* (não gera descritores da imagem);
- SURF (2008) – Proposta mais rápida que o método SIFT e mantém boa taxa de detecção de *keypoints*;
- BRIEF (2010) – Apenas descritor de *keypoints* da imagem baseado em strings binárias;
- ORB (2011) – Detecção que utiliza FAST otimizado e o BRIEF para geração de descritores com melhorias em relação à rotação;
- BRISK (2011) – Método mais recente também baseado no FAST.
- FREAK (2012) – Descritor de *keypoints* mais rápido e menor custo que SIFT, SURF e BRISK

Dentre as técnicas apresentadas (que são consideradas técnicas do estado-da-arte), este trabalho não utilizou para investigação apenas o FAST, pois a técnica denominada ORB - que foi utilizada na investigação - faz melhoria da implementação do método FAST. Dentre estas técnicas utilizadas, definiu-se o ORB para detecção e extração de características, utilizadas na solução da estimativa de pose, em etapa posterior à etapa de detecção de objetos.

2.2.2.1 *Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB)*

Segundo (RUBLEE et al., 2011), a utilização do SIFT mostrou-se um sucesso notável na última década com base na quantidade de aplicações desenvolvidas com a técnica nas áreas de reconhecimento de objetos, junção de imagens (panoramas), mapeamento visual, dentre outras.

No entanto, para aplicações de tempo real, a técnica apresenta-se ineficiente devido ao alto custo computacional, principalmente em dispositivos com pouco poder de processamento, como os dispositivos móveis, que geralmente têm recursos limitados.

A proposta do detector ORB é baseada na melhoria do detector FAST (ROSTEN; DRUMMOND, 2006), que é mais eficiente do ponto de vista do custo computacional, mas não possui suporte à rotação. Porém, juntamente com o descritor BRIEF (CALONDER et al., 2010), esta limitação é superada tornando o processo de detecção invariante à rotação.

A abordagem do ORB utiliza uma medida de orientação de cantos chamada intensidade do centróide. Essa intensidade assume que a intensidade está deslocada do centro e este vetor criado pode ser usado para orientação.

É construído, então, um vetor do centro do canto (O) ao centróide ($\overrightarrow{OC}$). O centro do canto é dado por $C = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right)$ e a orientação do *patch* (ou da área) é dada pela Equação 2.4.

$$\theta = \text{atan2}(m_{01}, m_{10}) \quad (2.4)$$

Estes ângulos calculados são consistentes, independentemente do tipo de canto. Além disso, é definido um raio r , no qual os valores de x e y são calculados de $[-r, r]$. Se $|C|$ se aproxima de zero, a medida se torna instável. Porém com os cantos detectados pelo método FAST observa-se que estas situações ocorrem raramente (RUBLEE et al., 2011).

Os centróides são comparados com duas medidas de gradientes: *BIN* e *MAX*. Em ambos os casos, os gradientes de X e Y são calculados em uma imagem suavizada. Dessa forma, *MAX* seleciona o maior gradiente da região (*patch*) de *keypoints* e *BIN* forma um histograma de gradientes com intervalos de 10 graus de direção e seleciona o maior *bin*.

A etapa de extração de descritores da imagem utiliza o algoritmo BRIEF, que de acordo com (CALONDER et al., 2010), o descritor de características cria uma descrição destes *patches* da imagem baseada em strings binárias (representações textuais com valores “0” e “1”), construídas a partir de um conjunto de testes de intensidade. A etapa de descrição possui poder de discriminação com testes simples de diferença de intensidade.

Em um *patch* de imagem suavizada p , um teste de intensidade τ é definido pela Equação 2.5, em que $p(x)$ é a intensidade de p no ponto x . A característica é definida como um vetor de n testes binários.

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1 : & p(x) < p(y) \\ 0 : & p(x) \geq p(y) \end{cases} \quad (2.5)$$

Ressalta-se ainda a importância de aplicar o filtro gaussiano para suavização da imagem antes da realização dos testes. Na implementação do ORB, a suavização é obtida com imagens integrais, em que cada ponto de teste é uma sub-janela de 5×5 de uma região de 31×31 *pixels*.

A similaridade pode ser avaliada através da distância de Hamming⁸, que é bastante eficiente do ponto de vista computacional. Basicamente, o BRIEF considera uma região ao redor de um *keypoint* detectado e as informações binárias de comparação utilizam valores em pares.

O ORB modifica a quantidade de *keypoints* encontrados, incluindo um limite máximo e descartando os piores *keypoints* identificados. Outro detalhe importante é que o algoritmo FAST não produz as características em multiescala, sendo incluída, na abordagem ORB, uma pirâmide de escalas da imagem e executando o algoritmo em cada nível desta pirâmide.

A comparação de tempo do ORB com SIFT e SURF, considerando a mesma quantidade de imagens e níveis de escala, mostra que o algoritmo ORB possui tempo de execução bem menor como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre tempo de execução do ORB, SURF e SIFT.

Detector	ORB	SURF	SIFT
Tempo por quadro (<i>ms</i>)	15.3	217.3	5228.7

Fonte: (RUBLEE et al., 2011)

Em (UFKES; FIALA, 2013) é mostrado um sistema de realidade aumentada com marcadores naturais baseado em ORB para apresentar a possibilidade de utilizar a técnica em aplicações de tempo real. Na abordagem é criado um mapa de características e descritores e suas coordenadas 3D correspondentes no mundo real. Dessa forma a utilização de detector de *keypoints* integrada a outras técnicas de processamento de imagens permite a construção de ambientes de realidade aumentada.

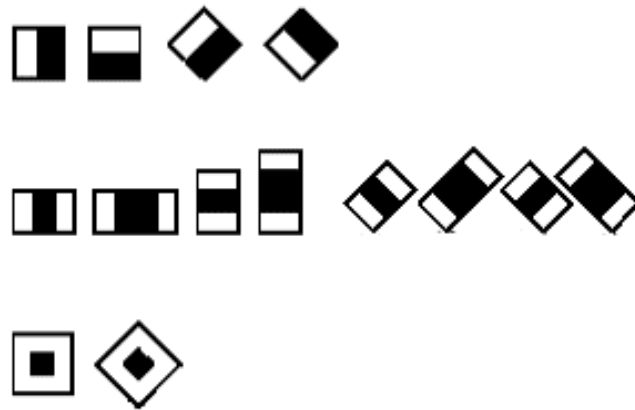
⁸ A distância de Hamming entre duas strings de mesmo comprimento é o número de posições nas quais elas diferem entre si, ou seja, corresponde ao menor número de substituições necessárias para transformar uma string na outra.

2.2.2.2 Haar-like features

Com a proposta de (VIOLA; JONES, 2001), obteve-se um *framework* robusto para a construção de detectores rápidos de objetos. A proposta descreve uma abordagem de máquina de aprendizado com altas taxas de detecção. Além disso, o trabalho introduz o termo de imagens integrais⁹, que permite um rápido processamento de características da imagem.

A imagem integral pode ser computada a partir de qualquer imagem usando poucas operações por *pixel*, criando as estruturas denominadas *Haar-like features* (Figura 15).

Figura 15 – Haar-like Features.



Fonte: Adaptado de (LIENHART; MAYDT, 2002)

O conceito de imagens integrais, que é utilizado também em outras técnicas de detecção como o SURF, propõe que características retangulares podem ser computadas rapidamente com utilização de representações intermediárias da imagem. A imagem integral em uma localização $pixel(x, y)$ contém o somatório dos valores dos *pixels* acima e à esquerda de $pixel(x, y)$, como descrito na Equação 2.6

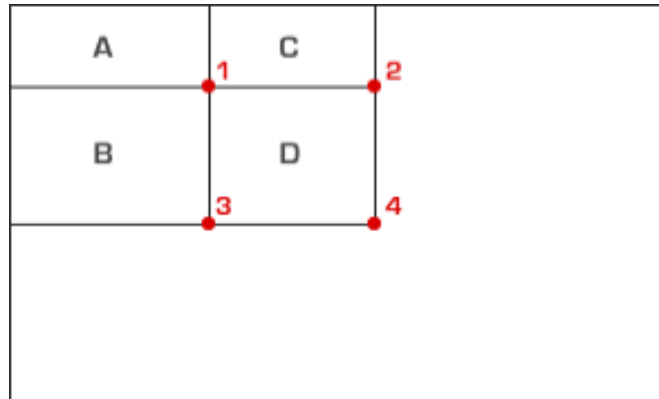
$$P(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} p(x', y') \quad (2.6)$$

Através do uso de imagens integrais, qualquer somatório retangular pode ser computado por quatro valores de referência em formato vetorial, como pode ser exemplificado

⁹ O cálculo rápido e eficiente de valores em um subconjunto retangular foi introduzido em 1984 intitulado como *Summed-area tables* (CROW, 1984). No entanto, apenas em (VIOLA; JONES, 2001), a técnica passa a ser difundida e conhecida pelo nome de imagens integrais, e a ser utilizada como técnica proeminente de visão computacional.

na Figura 16.

Figura 16 – Representação de valores de imagens integrais.



Fonte: Adaptado de (VIOLA; JONES, 2001)

O valor da imagem integral na localização 1 é a soma dos *pixels* no retângulo *A*, na posição 2 é o resultado de $A + C$, na posição 3 é o resultado de $A + B$. Dessa forma, o valor da área *D* pode ser computada como o resultado do cálculo dos valores das imagens integrais em $4 - 2 - 3 + 1$.

Com a criação dessas *Haar-like features*, o objetivo seguinte da técnica é a construção de um classificador, a partir de um número pequeno de *features* consideradas mais importantes, baseado na técnica Adaboost modificada para esta finalidade. A modificação faz com que o classificador mais simples, geralmente chamado de classificador fraco (*weak classifier*) retorne apenas uma característica. Através dessa modificação do procedimento, cada estágio do processo de *boosting* – e cada estágio seleciona um novo classificador simples em cadeia – é visto como um processo de seleção de características (Equação 2.7). Os erros de classificação no estágio anterior recebem pesos maiores e o esforço computacional é minimizar esses erros.

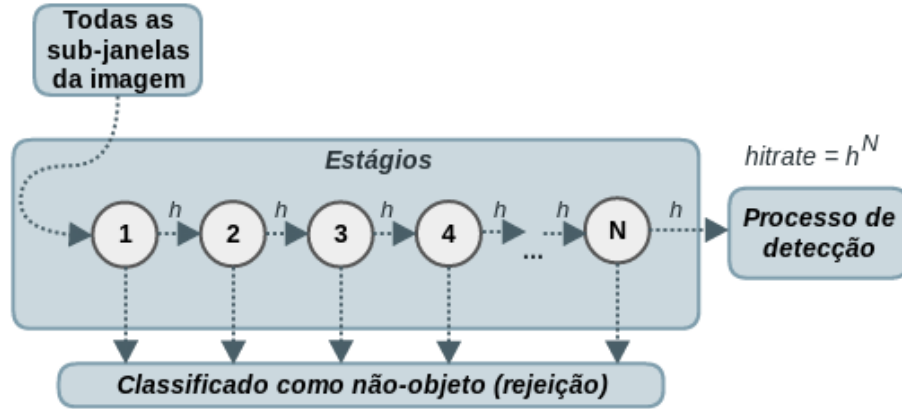
$$H(x) = \alpha_1 h_1(x) + \alpha_2 h_2(x) + \alpha_3 h_3(x) + \dots + \alpha_n h_n(x) \quad (2.7)$$

As *features* detectadas são utilizadas como entrada para o classificador. Os classificadores em cada estágio da cascata são construídos por uma série de classificadores mais simples e fazem uso de técnicas de seleção por peso (*weighted voting*). As técnicas Discrete Adaboost, Real Adaboost, Gentle Adaboost e Logiboost são suportadas.

O processo geral de detecção cria uma árvore de decisão (por esta razão a técnica é denominada *Haar-like Cascade Classifier*). É realizada uma avaliação sequencial na

qual cada sucesso em um estágio habilita o estágio seguinte (Figura 17). Um estado de falha em qualquer estágio leva à rejeição da detecção de *feature* em questão.

Figura 17 – Classificadores em cascata (Cascade of classifiers). O objetivo desses classificadores é eliminar os erros de detecção através de pouco processamento em cada estágio através de um parâmetro de *hit rate* para criar sequencialmente um classificador com detecção aceitável.



Fonte: Adaptado de (VIOLA; JONES, 2001) e (LIENHART; MAYDT, 2002).

Vale ressaltar que um classificador fraco $h(x, f, p, \theta)$ é composto por um conjunto de *features* f , um limiar θ , e uma polaridade p , que indica a direção da inequação, mostrada na Equação 2.8. Após o treinamento, o classificador pode ser aplicado a uma região de interesse da imagem. O classificador retorna “1” se a posição contém o objeto e “0” caso contrário. Para uma busca do objeto em uma imagem completa, a janela de busca é movida através de toda a imagem.

$$h(x, f, p, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{se } pf(x) \leq p\theta \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.8)$$

O exemplo clássico da detecção de faces com o classificador em cascata é um bom exemplo para entendimento do funcionamento durante o treinamento, pois a face humana pode se apresentar de diversas formas: cores diferentes, idades diferentes, emoções diferentes, e até características como a barba pode afetar a detecção. Por isso milhares de imagens são incluídas no processo de treinamento. A abordagem dessa classificação é baseada no conjunto de imagens positivas e negativas. Por essa razão, a qualidade da detecção depende diretamente da quantidade de imagens de treinamento.

2.2.3 Estimativa de pose

De acordo com (FORSMAN, 2016), as aplicações de realidade aumentada estão se tornando ferramentas comuns para diversas tarefas e esta tecnologia não será usada para fins profissionais até resolver o problema de estimativa de pose de forma precisa.

A pose pode ser definida como a estimativa de orientação e posicionamento de um determinado objeto. O processo de estimativa de pose de um objeto a partir de uma imagem bidimensional é essencial para a criação de aplicações de realidade aumentada.

Existem diversos algoritmos que tratam do problema de estimativa de pose (FISCHLER; BOLLES, 1981; DEMENTHON; DAVIS, 1995; QUAN; LAN, 1999). É possível afirmar que as soluções de estimativa de pose têm sido gradualmente melhoradas buscando atender as aplicações de tempo real, devido a essa restrição de processamento rápido em sistemas de realidade aumentada.

O presente trabalho propõe a utilização de câmera monocular para extrair informação da cena observada e, em seguida, alinhar com modelos de objetos conhecidos. Segundo (HULETSKI; KARTASHOV; KRINKIN, 2015), vários algoritmos que utilizam câmeras monoculares têm sido apresentados recentemente para resolver problemas de localização e mapeamento simultâneos (SLAM), principalmente na área de robótica. A ideia geral dessa abordagem é que o ambiente possui diversas *features*, que podem ser detectadas nos *frames* da câmera para diversas finalidades.

Os sistemas de realidade aumentada geralmente utilizam diversas técnicas como as mencionadas acima. Em (BILLINGHURST; CLARK; LEE, 2015) é mostrado que a realidade aumentada tem sido alvo de pesquisas por quase 50 anos e, apenas recentemente, começou a ser vista como um produto comercial. No entanto, ainda existem diversos obstáculos e desafios a serem explorados para atingir todo o potencial das aplicações de realidade aumentada.

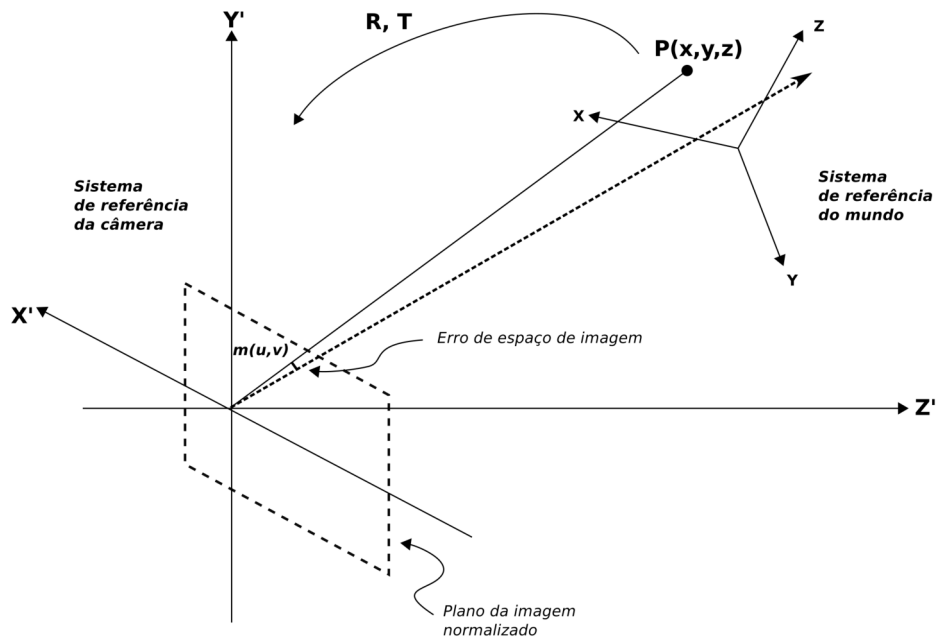
Nesse sentido, este trabalho apresenta uma abordagem que utiliza diferentes modelos construídos a partir de ORB *features*, usando diferentes perspectivas. A proposta é alinhar a metodologia apresentada para detecção de objetos em realidade aumentada com a estimativa de pose, ambas independentes do ponto de vista do usuário.

As soluções voltadas para estimativa de pose, em geral, lidam com problemas de ruídos nos *frames* do vídeo, mudanças de iluminação, dentre outros. De acordo com (COMPORT et al., 2006), a melhor alternativa é assumir que os dados obtidos são

corrompidos e utilizar uma solução estatística robusta para estimar a pose.

Uma solução geral utilizada é encontrar a pose através da projeção das coordenadas 3D da *feature* nas coordenadas 2D da imagem, buscando minimizar a distância entre essas *features* correspondentes (CARMIGNIANI et al., 2011). O alinhamento entre dois sistemas de coordenadas é ilustrado na Figura 18. Basicamente, o desafio é encontrar o relacionamento do sistema de coordenadas do mundo para a imagem (sistema de coordenadas 2D).

Figura 18 – Restrições para o problema de pose da câmera



Fonte: Adaptado de (ABABSA; MALLEM, 2008)

Os algoritmos de estimativa de pose geralmente utilizam pontos da imagem (q_i) para definir a pose. O desafio é associar esses pontos da imagem aos pontos do mundo (p_i). Assumindo que $p_i(x_i, y_i, z_i)^T$ e $q_i(x'_i, y'_i, z'_i)^T$ são, respectivamente, pontos de referência 3D não-colineares no *frame* do mundo e as coordenadas de espaço-câmera, então p_i e q_i são relacionados pela transformação apresentada na Equação 2.9

$$q_i = Rp_i + T \quad (2.9)$$

onde: $R = (r_1^t, r_2^t, r_3^t)^t$ e $T = (t_x, t_y, t_z)^t$ são, respectivamente a matriz de rotação e a matriz de translação.

Estes parâmetros são associados à estimativa de pose e este processo descreve a transformação do sistema de coordenadas do mundo para o sistema de coordenadas da câmera.

2.2.3.1 Cálculo de pose em tempo real

Este trabalho utiliza a combinação do método EPnP (LEPETIT; MORENO-NOGUER; FUA, 2008) juntamente com o algoritmo RANSAC (FISCHLER; BOLLES, 1981) para a solução do problema de estimativa de pose.

O problema *Perspective-n-Point* (PnP) possui como meta determinar a posição e orientação da câmera, de acordo com seus parâmetros intrínsecos e um conjunto de n correspondências entre pontos 3D e suas projeções 2D. O método EPnP é uma solução não iterativa ao problema PnP.

No método EPnP, cada ponto de referência n ($n \geq 4$) pode ser expressado como uma soma ponderada dos pontos de controle virtuais. Dessa forma, as coordenadas destes pontos de controle se tornam o principal problema e esses pontos são usados para a estimativa de pose (Equação 2.10).

$$\forall i, w_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_c \\ 0 & f_v & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde:

w_i são parâmetros projetivos escalares;

$[u_i, v_i]^T$ são coordenadas 2D das projeções u_i considerando coordenadas 3D específicas

$[x_j^c, y_j^c, z_j^c]$ de cada ponto de controle c_j^c ;

f_u, f_v são os coeficientes de distância focal; e

(u_c, v_c) é o ponto principal da matriz de calibração interna da câmera.

Existem métodos iterativos para o problema PnP, mas são fortemente dependentes dos parâmetros de inicialização; caso contrário, geralmente tendem a falhar. Outra razão para o uso da técnica EPnP é que a solução possui baixa complexidade computacional e boa acurácia.

Os pontos utilizados podem ser *keypoints* obtidos com diferentes técnicas de

processamento. Existem diversos algoritmos para detecção de *keypoints* em uma imagem. Dentre eles, a detecção de ORB *features* possui um tempo de processamento que favorece o uso em aplicações de tempo real.

Após a geração das correspondências imagem-mundo, há ainda a necessidade de filtrar ou remover correspondências incorretas, conhecidos como *outliers*. O método RANSAC é largamente utilizado para esta finalidade, sendo adequado para a detecção de *features* da imagem.

Uma vez definido o conjunto de correspondências do RANSAC (conhecidas como *inliers*), estes *inliers* são usados para o refinamento da pose. O processo é repetido enquanto novos *inliers* podem ser encontrados.

A etapa final é configurar os valores de rotação e translação estimados para a matriz de projeção. Esses valores são usados para configurar o correto posicionamento entre modelo e objeto real existente na imagem. Dessa forma, o foco geral do processo de estimativa de pose é a obtenção dos valores de R (rotação) e T (translação), que correspondem às transformações do modelo na imagem obtida.

2.3 Sistemas Elétricos de Potência

Os sistemas elétricos de potência são sistemas de energia constituídos por três entidades primárias: o sistema de geração de energia que é responsável pela produção de energia elétrica, sendo obtida de diferentes formas (eólica, hidrelétricas, usinas nucleares, dentre outras); o sistema de transmissão que transfere a eletricidade através de linhas de transmissão de alta voltagem para subestações regionais localizadas mais próximas da etapa de distribuição à população; e o sistema de distribuição que é responsável por distribuir a energia elétrica para os clientes locais (CROW; SHETTY, 2004).

O sistema de transmissão basicamente consiste em linhas de transmissão, subestações e transformadores. As subestações são um conjunto de aparatos na rede dos sistemas de potência para modificar características como frequência ou voltagem dos suprimentos de energia. Já os transformadores são dispositivos utilizados para converter a eletricidade de um nível de voltagem a outro, por exemplo, a conversão de altas voltagens alternadas para baixas voltagens e *vice-versa*.

As subestações também possuem uma variedade de equipamentos para proteção contra raios, curtos-circuitos e outras falhas que podem ocorrer na distribuição da

eletricidade aos clientes. Os clientes de um sistema elétrico de potência são compostos desde usuários domésticos e pequenas empresas até clientes comerciais e grandes clientes industriais. Cada tipo de cliente influencia a transmissão e distribuição da eletricidade de diferentes formas durante o dia e durante variações temporárias do sistema de potência.

A complexidade desses sistemas é causada devido às regras da composição de toda a rede e em como esta eletricidade é gerenciada e transmitida. As estações de geração de energia estão situadas em locais favoráveis para esta finalidade, geralmente lugares remotos geograficamente. O processo de geração de energia é responsável pela obtenção e transformação da energia oriunda de fontes primárias, sendo que cada usina é localizada em função das características de geração. Por exemplo, as usinas hidrelétricas que usam represamento de rios e lagos são localizadas, obviamente, próximo aos rios e lagos, considerados mais eficientes para produção com volume ideal de água. Outra forma de fonte primária são os ventos, e, dessa forma, os geradores eólicos são localizados próximos a pontos com maior volume de ventos.

Após o processo de geração, a energia é enfim distribuída aos usuários finais através de uma extensa rede de transmissão e distribuição de energia. Em alguns pontos dos sistemas de potência é necessário alterar características como, por exemplo, voltagem ou corrente. Um exemplo dessa alteração é a redução do nível de voltagem da transmissão para níveis de distribuição com o propósito de fornecê-la aos usuários domésticos. Esta conversão é realizada nas subestações de energia elétrica.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações responsáveis pela geração e transmissão de energia. É constituído por membros associados e membros participantes (constituídos por empresas de geração, transmissão, distribuição de energia e consumidores livres de grande porte) e dessa forma é responsável pela realização de estudos e medidas para manejo do estoque de energia a fim de garantir cada vez mais segurança da operação e garantir o suprimento contínuo em todo o país.

No Brasil, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica é formado predominantemente de usinas hidrelétricas com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida do país é encontrada fora do SIN, em pequenos sistemas isolados (ONS, 2014).

O Brasil é um país de grandes dimensões territoriais e, apesar da tecnologia ajudar no monitoramento das atividades da rede, existem diversos equipamentos interligados e centenas de variáveis a serem monitoradas, com níveis de complexidades específicos para cada tipo de visualização. Essas características tornam estes sistemas complexos e orientam a busca incessante de melhorias na área de visualização das informações.

2.3.1 Integração e utilização dos sistemas SAGE e OTS

No caso dos sistemas elétricos considerados neste trabalho, várias companhias no Brasil têm adotado o Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE). De acordo com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL, 2015), o SAGE pode ser utilizado em subestações e usinas de energia e suporta diversos hardwares, inclusive de diferentes fabricantes. As variáveis solicitadas nesta abordagem são AMP, MVAR, MW, KV (todas com valores primários e secundários).

O SAGE é constituído por módulos específicos para cada finalidade, sendo eles:

- *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA): ;
- *Energy Management System* (EMS);
- Gerenciamento da Base de Dados Históricos (GBH);
- Subsistema de Inteligência Artificial (SIA);
- Controle Automático de Geração (AGC);
- Subsistema de Treinamento e Simulação (SIM).

Além dos módulos do SAGE, é possível integrar outros sistemas auxiliares, como o *Operator Training Simulator* (OTS), para simulação dos sensores do sistema. O OTS é um sistema de computador que exige licença para uso, a qual é fornecida pela empresa norte-americana *Electric Power Research Institute* (EPRI, 2016). A CEPEL realiza a integração deste sistema ao SAGE, o que possibilita um ambiente de simulação com definição de cenários e treinamento simulado.

Em geral a integração entre sistemas diferentes geralmente é realizada através de Chamadas Remotas de Procedimentos (RPC). A solução com chamadas RPC viabiliza o

processamento através do modelo cliente-servidor, no qual o cliente solicita uma determinada informação ou um determinado processamento e aguarda o retorno da execução do procedimento remoto.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados trabalhos desenvolvidos em áreas correlatas com foco em visualização no cenário industrial, visualização de sistemas elétricos com realidade virtual e os desafios voltados ao desenvolvimento de realidade aumentada.

No Brasil diversos projetos de pesquisa em realidade virtual e aplicação desta tecnologia para empresas podem ser percebidos ao longo dos anos, como em (CARVALHO; TREVISAN; RAPOSO, 2012), (RUSSO et al., 2006) e anteriormente em (CORSEUIL et al., 2003), além de outros trabalhos na área aplicados na indústria.

3.1 Visualização em cenário industrial

A realidade virtual e realidade aumentada, assim como a Inteligência Artificial (IA), durante muitos anos, criaram grande expectativa nos usuários e profissionais da área desenvolvimento de *software*. É certo que muitos dispositivos e sistemas dessas categorias foram criados, mas o potencial de alcance e aplicação dos conceitos de realidade virtual e realidade aumentada abrange diversas áreas.

Na área de sistemas elétricos de potência, muitos trabalhos apontam para a questão da comunicação de dados e da questão arquitetural (LIN et al., 2011; LI et al., 2015; FARAG; EL-SAADANY, 2013). Essas questões são realmente importantes, mas com os recentes dispositivos disponíveis e as possibilidades de utilização de novas tecnologias, o presente trabalho tem em foco a busca por novas formas de visualização nos cenários de sistemas elétricos.

Além das propostas relacionadas à arquitetura, existem outros trabalhos que tratam a respeito da melhoria na visualização dos sistemas de potência (MIKKELSEN; JOHANSSON; COOPER, 2012). O trabalho mostra, com base em estudos de campo realizados, que os operadores dos centros de controle de energia precisam de visualizações do sistema para entender a situação real dos componentes do sistema. As novas técnicas de visualização podem auxiliar nesse sentido. Um exemplo na área é a visualização com contornos¹, que permite o mapeamento com forte padrão visual. Na visualização de contornos, mesmo que não exista número algum associado à visualização do sistema

¹ Visualização que mostra uma área em que cada *pixel* dentro desta área é calculado de acordo com a soma da distância dos pesos dos elementos do sistema de potência e geralmente mapeado em relação a uma escala de cores.

elétrico, a situação analisada é entendida de maneira mais fácil em comparação à análise de diversos dados tabulares. Esta afirmação converge com um trabalho anterior de (WIEGMANN et al., 2006), no qual é defendida a tese de utilização de visualizações baseadas em padrões de cores ao invés de números. Afirma-se ainda que o cérebro humano está adaptado para este cenário de reconhecimento de padrões e possui facilidade com ambientes tridimensionais.

Apesar da importância pela busca de novas visualizações, é feita uma crítica em (MIKKELSEN; JOHANSSON; COOPER, 2012), mostrando que nos últimos 20 anos, além das visualizações apresentadas em (MAHADEV; CHRISTIE, 1993; MAHADEV; CHRISTIE, 1994), (OVERBYE; WEBER, 2000a; OVERBYE; WEBER, 2000b) e (WEBER; OVERBYE, 2000), poucas ideias para a visualização de dados de sistemas elétricos foram abordadas. A análise feita conclui que as visualizações devem possuir a intenção substituir dados textuais ou informação numérica e devem ser explorados os padrões visuais para um mapeamento, de maneira mais natural possível, agregando significado dos dados à visualização. A informação deve ser entendida naturalmente e as cores devem ser usadas, mas com cuidado para não gerar incômodo aos operadores do sistema. Em nosso trabalho, permite-se a utilização de padrões de cores associadas às condições dos elementos presentes nas cenas de realidade virtual com panoramas associada a informações textuais.

Em (CÔTÉ et al., 2013a) é apresentada a utilização de panoramas aumentados através do uso de imagens estáticas (*offline*), que são ambientes de realidade virtual que dispensam o uso de marcadores fiduciais e possibilitam uso de técnicas de reconhecimento de padrões (já que as imagens são processadas em formato *offline*) e não possuem a limitação de tempo real. Vale ressaltar que essa abordagem traz, a partir do momento da captação das imagens, a desatualização do ambiente real, o que distancia o usuário da real visão do cenário. Por outro lado, é uma solução razoável em ambientes em que o cenário não sofre modificações com frequência, além de possibilitar a utilização para visualizações remotas. É possível ainda incluir câmeras panorâmicas aos panoramas aumentados, possibilitando ambientes de visualização em tempo real baseado em panoramas.

3.2 Visualização com realidade virtual

No contexto de ambientes industriais, sistemas de realidade virtual têm sido vastamente utilizados, inclusive na área de sistemas elétricos de potência, tal como em (ROMERO et al., 2008), que utiliza o sistema de realidade virtual para treinamento dos operadores de subestações de energia, permitindo a visualização de qualquer subestação dentro da rede e com a utilização de dispositivos de visualização e interação como HMDs e *mouse* 3D, sendo desta forma possível navegar pelo mundo virtual e interagir com elementos do sistema, que possui bastante similaridade com nossa abordagem, mas aplicada a panoramas aumentados. As situações de operação podem ser simuladas e este tipo de sistema permite que o operador visualize problemas e os comportamentos reais do sistema em determinadas situações de operação.

Uma área de uso bastante comum em visualização de sistemas elétricos é a área de simulação para treinamento. Isso ocorre pois no campo de sistemas elétricos existe uma lacuna grande entre o estudo teórico relacionado aos equipamentos e as funções de operação dos equipamentos no cenário real (BARATA; FILHO; NUNES, 2015). Apesar do trabalho abordar a área de simulação, a melhoria de aprendizado dos alunos através da visualização dos equipamentos em imagens reais do ambiente de operação permite maior compreensão da situação de operação.

Em (GAO et al., 2012) é apresentada uma visualização baseada em panoramas no cenário de sistemas elétricos. Na proposta, panoramas cilíndricos são usados para incluir informação sobre equipamentos, permitindo interação com o usuário. A aplicação pode ser considerada uma proposta para visualização e ajudar no processo de tomada de decisão, no entanto, possui baixo grau de imersividade funcionando a partir do *browser* do computador. Em relação aos panoramas utilizados nesta tese, utilizam-se tanto cilíndricos, devido à facilidade de aquisição deste tipo de panorama, quanto esféricos, visando garantir ao usuário maior grau de imersividade.

Metodologias para a construção de ambientes 3D com uso de panoramas são apresentadas em (GUARNACCIA et al., 2012), e (WU; FENG; HE, 2014). Essas metodologias foram aplicadas à área de turismo, e apenas em (GUARNACCIA et al., 2012) a visualização dos panoramas é imersiva. Nossa proposta, apesar do uso em ambientes de cenários industriais, pode ser adaptada para outros cenários.

Em (REIS et al., 2014) é apresentada uma proposta para visualização de informa-

ções de equipamentos em ambiente de realidade virtual utilizando panoramas aumentados, com uso de informações reais dos equipamentos e possibilitando um novo formato para visualização destes dados. O trabalho apresenta a utilização de panoramas planares, cilíndricos 180°, cilíndrico 360° e panoramas esféricos, mas apenas os panoramas cilíndricos foram utilizados em testes de autoria. Além disso, a marcação dos equipamentos para a construção das anotações é realizada manualmente, diferente desta nossa proposta.

Em (RIBEIRO et al., 2014) é proposto o uso de realidade virtual em sistemas elétricos utilizando a simulação das operações do estado do sistema, e possibilitando a interação com as variáveis de operação de equipamentos. O sistema mostra a integração do sistema de aquisição de dados e a visualização com uma visão geral da subestação através do ambiente virtual adicionando informações de maneira similar ao formato que esta tese apresenta como estudos de caso em realidade virtual e realidade aumentada.

3.3 Visualização com realidade aumentada: aplicações e desafios

Um dos desafios desta pesquisa está relacionado à dificuldade de utilização de técnicas de detecção de objetos para ambientes de realidade aumentada com o objetivo de incluir anotações nestes cenários em tempo real.

Segundo (KREVELEN; POELMAN, 2010), as demandas tecnológicas para construção de ambientes de realidade aumentada são muito maiores que para ambientes de realidade virtual. Os dispositivos de visualização, técnicas para rastreamento, o hardware e o *software* são parte fundamental para o sucesso desta categoria de aplicações. Outro problema é que as técnicas utilizadas de processamento precisam garantir um bom funcionamento em tempo real, afinal a adição de elementos virtuais à cena é realizada em tempo real.

A correta identificação da posição para incluir a informação virtual é, segundo (DAI; ZHANG, 2011), a chave para o sucesso de aplicações completas de realidade aumentada, que também é um dos problemas abordados nesta tese. O trabalho aborda a utilização da biblioteca OpenCV, biblioteca de visão computacional e aprendizado de máquina, *open source*² para fins acadêmicos e comerciais sob licença BSD (OPENCV, 2015a) para adicionar informações históricas aos visitantes de uma academia de artes

² *Open source* ou código aberto é uma modalidade de *software* que permite o código acessível aos desenvolvedores e usuários de *software*, possibilitando a auditoria do código e maior confiabilidade do sistema

marciais. Os autores defendem a realidade aumentada como um novo campo da CV que tem crescido devido ao melhoramento das tecnologias à disposição para esta finalidade.

Em (JIAN et al., 2015) afirma-se que a detecção de objetos é uma tarefa fundamental em ambientes *outdoor*. Os resultados de detecção podem ser usados em reconhecimento de objetos, rastreamento e construção de mapas do ambiente. O trabalho aplica a detecção para utilização em robôs de segurança da subestação com uso de algoritmo de detecção de objetos e processamento baseado em nuvem. Outra estratégia interessante apresentada é reduzir a área de comparação com algoritmos custosos como SURF e SIFT visando otimizar o processamento. Em nosso trabalho, com uso de técnicas mais modernas, não há necessidade da redução da área de comparação.

Em (SCHWEGMANN; KLEYNHANS; SALMON, 2014) é apresentada uma estratégia para detecção de navios na costa africana que utiliza classificadores em cascata baseados em *Haar-like features*. O trabalho mostra um sistema de detecção que geralmente utiliza o *transponder* da embarcação para monitoramento, mas em casos de sabotagem ou em que o *transponder* é desligado, a solução é detectá-lo com imagens de radar. Apesar de utilização para finalidades diferentes, observa-se a utilização de *Haar-like features* para fins de detecção de objetos.

De acordo com (PROCHAZKA et al., 2011), a utilização de técnicas como *template matching* mostra a abordagem de criação de ambientes de realidade aumentada baseada em processamento de imagens. Além disso, a adoção dos dispositivos móveis trouxe um grande avanço aos sistemas de realidade aumentada e, segundo os autores, geralmente na área de detecção de marcadores naturais utilizam-se técnicas similares ao SURF (*Speeded-Up Robust Features*³).

A utilização de aplicações em dispositivos móveis em tempo real tem crescido rapidamente e diversas aplicações para estes formatos de dispositivos têm sido desenvolvidas. Em (KIM; JUN, 2011), a utilização de técnicas simples de processamento de imagens é utilizada em *smartphones* para detecção de marcadores fiduciais e inclusão de elementos 3D em tempo real, mostrando a evolução do poder de processamento desses dispositivos nos últimos anos.

A utilização de visualizações, baseada em imagens para criação de ambientes de realidade aumentada, tem sido pouco utilizada. Em (GRASSET et al., 2012) é proposta uma solução para a organização das informações incluídas na cena (*labels*), já que estas

³ Técnica de detecção de características da imagem utilizada para detecção de objetos em uma cena

informações, mesmo quando a detecção de imagens é realizada, ficam sobrepostas aos objetos da cena e assim dificultam o entendimento dos usuários em sistemas de realidade aumentada. Dessa forma, a inclusão de informações através do processamento de imagens e de marcadores naturais possui diversos níveis de complexidade a serem solucionados para aplicação em sistemas reais, mesmo com a correta identificação dos objetos na cena.

A utilização de marcadores naturais proporciona a criação de ambientes de realidade aumentada que independam da adição na cena de marcadores fiduciais. Segundo (MAIDI; PREDA; LE, 2011), as texturas do objeto a ser detectado influenciam bastante na eficácia do algoritmo SURF, sendo que no trabalho apresentado, apesar do uso de imagens simples para detecção, como logotipos 2D, o percentual de identificação oscila de 52% a 95%, ou seja, em alguns casos são obtidos bons resultados e em outros não, provavelmente devido a fatores como proximidade ou ponto de vista do observador, por exemplo.

Como pode ser observado em vários trabalhos, a busca por novas técnicas de visualização faz-se necessária. Na área de realidade aumentada, avanços notáveis de hardware e dispositivos móveis nos últimos anos têm aumentado o potencial para uso em aplicações reais. Além disso, a utilização de novas tecnologias com a finalidade de melhorar o trabalho de operadores dos centros de controle, por exemplo, pode favorecer a operação de equipamentos e possibilitar monitoramento remoto dos ambientes de operação.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para anotação de objetos com a utilização de marcadores naturais através da detecção de equipamentos em ambientes de realidade virtual e realidade aumentada. Foram definidas as subestações de energia elétrica como o ambiente industrial para o processo de aquisição de imagens, tanto para treinamento das técnicas utilizadas quanto para testes nos ambientes no formato de estudos de caso.

A metodologia para utilização de marcadores naturais é comum tanto para a criação de ambientes de realidade virtual quanto de realidade aumentada. Dessa forma, a metodologia desmembra-se em marcadores naturais georreferenciados (proposta para ambientes de realidade aumentada em tempo real) e marcadores naturais associados à ferramenta de autoria em um modelo semiautomático de anotação (proposta para ambientes de realidade virtual com panoramas aumentados).

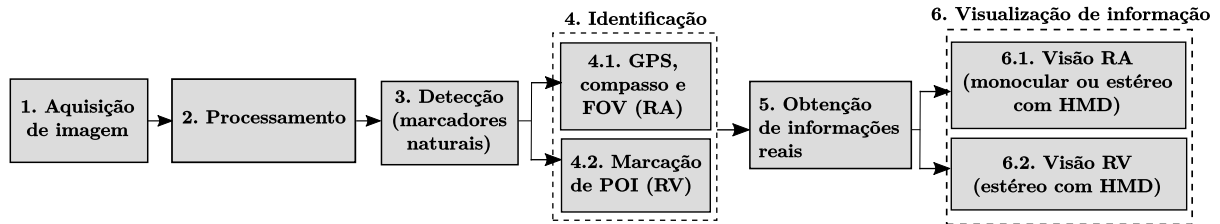
Neste capítulo especifica-se a fase de aquisição das imagens e os diferentes formatos possíveis; as técnicas utilizadas no processo de definição para a detecção de objetos; e, na sequência, são descritas as arquiteturas de *software* criadas com a metodologia baseada em marcadores naturais para ambientes de realidade aumentada e de realidade virtual.

Para viabilizar a exibição das informações dos equipamentos, com imagens obtidas dentro do ambiente real de operação, uma etapa crucial é a correta detecção do equipamento em uma imagem qualquer dentro da subestação. A partir dessa detecção (que aplica filtros de pré-processamento para melhoria da qualidade das imagens), é realizada a identificação do objeto detectado. Em realidade aumentada, essa identificação utiliza informações de sensores GPS e compasso. Em realidade virtual, por outro lado, a identificação é realizada através da adição de POIs, sendo realizada manualmente. De uma forma geral, a metodologia proposta nesta tese é constituída pelas etapas representadas na Figura 19.

O fluxo apresentado realiza-se de acordo com a sequência de processos descritos a seguir:

- I. Aquisição de imagem: Nesta etapa, são obtidas as imagens que são utilizadas nas etapas subsequentes;
 - Formato para realidade aumentada: *frames* obtidos a partir de dispositivo móvel em tempo real;

Figura 19 – Etapas gerais da metodologia proposta para anotação utilizando marcadores naturais em ambientes de realidade virtual e realidade aumentada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Formato para realidade virtual: imagem panorâmica previamente adquirida;
- II. Pré-processamento: Esta etapa é realizada aplicando o filtro homomórfico para viabilizar melhoria da qualidade da imagem adquirida, visando reduzir a influência da iluminação na cena no momento da aquisição;
- III. Detecção: A fase de detecção de objetos é realizada com o método de detecção e classificação *Haar Feature-based Cascade Classifier*. O método realiza um treinamento prévio com imagens do objeto a ser detectado (imagens positivas) e com imagens de objetos diferentes do que deseja ser detectado (imagens negativas);
- IV. Identificação: Esta etapa associa uma TAG de identificação ao equipamento, juntamente com as informações associadas;
- Para ambiente de realidade aumentada: Utiliza-se o conceito proposto em (GOMES JR. et al., 2017) para uso de marcadores naturais georreferenciados. Essa metodologia inclui a localização dos objetos, do observador e informação do sensor de compasso. Com estes dados, é possível delimitar qual dos objetos foi detectado pelo algoritmo.
 - Para ambiente de realidade virtual: Acrescenta-se manualmente as TAGs aos POIs nas imagens panorâmicas. Essa abordagem utiliza os objetos detectados na ferramenta de autoria como local para a anotação.
- V. Obtenção de informações reais: Esta etapa consiste basicamente na aquisição das informações que são consultadas com base nas TAGs definidas na etapa anterior. No cenário do setor elétrico, utiliza-se a consulta aos sistemas de aquisição de dados com informações referentes aos equipamentos de uma determinada subestação.

VI. Visualização da informação: Esta última etapa consiste em alterar a cena visualizada, incluindo as informações de acordo com os resultados das etapas anteriores. Esta etapa permite diversificar os formatos de visualização e depende do dispositivo para alteração da cena observada.

As seções seguintes descrevem com maior nível de detalhamento cada etapa da metodologia apresentada neste trabalho.

4.1 Aquisição de imagens

A metodologia utiliza imagens reais do ambiente de operação para criação de ambientes e foram obtidas em visitas técnicas durante o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para construção do sistema AGITO¹.

Foram utilizados dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets* para captura de imagens, em diferentes formatos. Os formatos de imagens utilizados na etapa de aquisição foram: JPEG/*raster* (Figura 20), panorâmicas cilíndricas 180° (Figura 21) e panorâmicas esféricas.

Figura 20 – Imagem do ambiente de operação (*raster*).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas imagens obtidas no ambiente de operação foram adquiridas com informações de metadados para validação do marcador natural georreferenciado. As imagens e

¹ O projeto AGITO é um projeto em parceria da CHESF e UFMA para criação de um sistema de realidade virtual para controle, operação e treinamento das subestações da CHESF. Neste sistema é possível visualizar dados de equipamentos e simular situações de risco para treinamento de operadores em ambiente virtual.

Figura 21 – Imagem com panorama cilíndrico de 180°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

vídeos obtidos foram utilizadas tanto para treinamento quanto para testes de detecção dos equipamentos.

4.2 Pré-processamento

Os cenários reais apresentam desafios naturais relacionados à abordagem baseada em processamento de imagem. Um desses problemas é a iluminação. Basicamente, nesta etapa, são aplicados os filtros de pré-processamento filtragem homomórfica e equalização de histograma (apresentadas anteriormente na seção 2.2.1).

A ideia de utilização desses filtros é reduzir a variabilidade na iluminação que pode resultar em problemas para as etapas seguintes. Estes problemas são associados tanto a imagens utilizadas para ambientes de realidade aumentada quanto para ambientes de realidade virtual. Vale ressaltar também que estas técnicas são aplicadas tanto para as imagens utilizadas no processo de treinamento da detecção quanto na aquisição de imagens para visualização, por exemplo, em imagens de tempo real no caso da aquisição de realidade aumentada.

4.3 Detecção: marcadores naturais 3D com *Haar-like features*

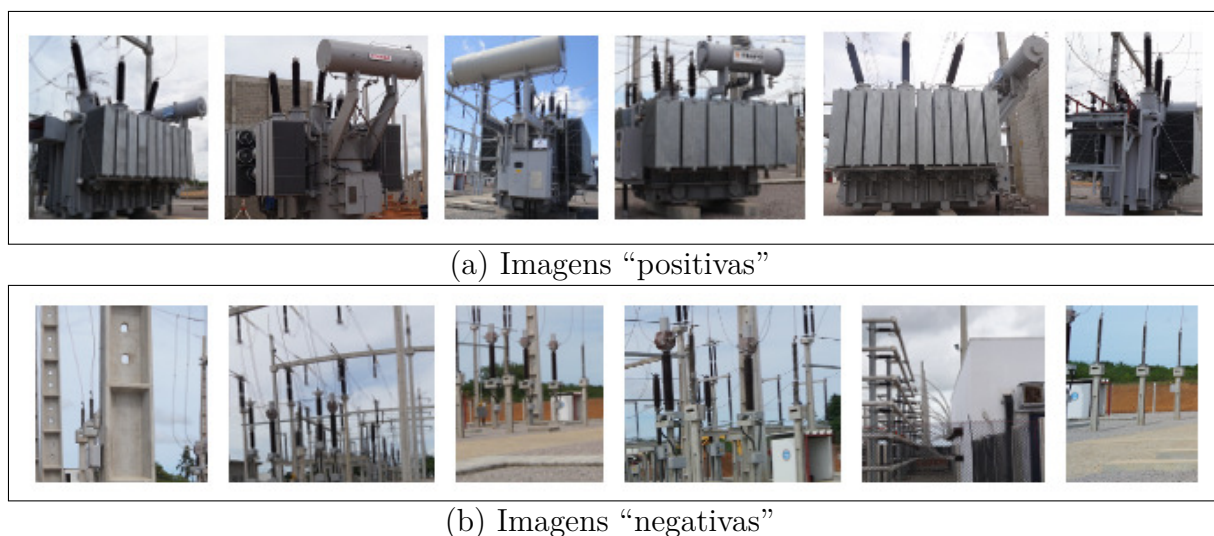
A etapa seguinte da metodologia está relacionada à detecção dos objetos na imagem adquirida, ou seja, detecção dos equipamentos da subestação. Como dito anteriormente, o desafio desta etapa é que a detecção possa ser feita de forma robusta e capaz de minimizar influências externas como a iluminação.

Além disso, a detecção deve ser realizada independente do ponto de vista do observador; por essa razão, denomina-se marcador natural 3D, pois realiza a detecção com diferentes pontos de vista do equipamento.

A técnica utilizada para detecção de objetos nesta metodologia é baseada em características locais da imagem, mais especificamente com aplicação do método baseado em *Haar-like features* para detecção em imagens.

A utilização de um classificador em cascata baseado em *Haar-like features* consiste em dois estágios principais: o treinamento e a detecção (OPENCV, 2015b). No estágio de treinamento, o classificador utiliza imagens do objeto a ser detectado. Estas imagens são chamadas de imagens “positivas” que são redimensionadas a um tamanho comum definido no treinamento. Além das imagens positivas, existem imagens arbitrárias que não contêm o objeto, denominadas de imagens “negativas” do processo de treinamento. Em nossa abordagem foram utilizados exemplos do restante do cenário industrial que não incluíam o equipamento a ser detectado (Figura 22).

Figura 22 – Exemplos de imagens usadas no treinamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o equipamento a ser detectado possui diferentes características dependendo do ponto de vista do observador, é necessário utilizar no treinamento o maior número possível de imagens dos lados do objeto. Dessa forma, este trabalho cria um marcador natural baseado em *Haar-like features* com todos os pontos de vista do objeto usados no treinamento.

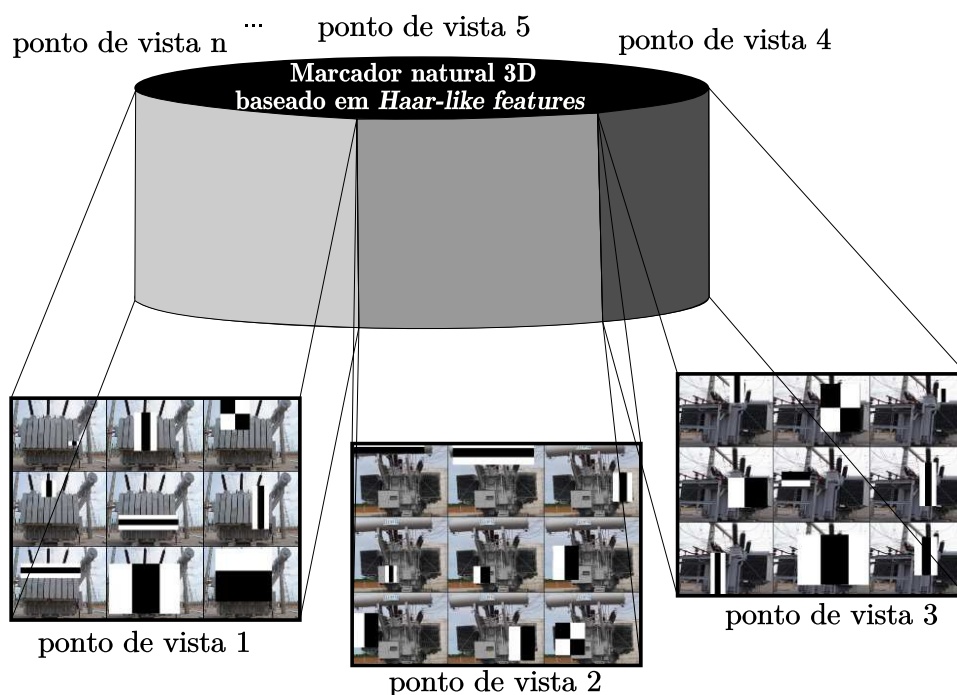
Este trabalho realiza a construção de detectores de transformadores de potência, usando imagens e vídeos com condições reais de iluminação de subestações de energia. A replicação do método de detecção para outros equipamentos requer apenas a aquisição de imagens para treinamento (positivas e negativas) e o treinamento de novos classificadores.

Vale ressaltar que a multidetecção é um desafio nestes casos, pois nos casos em que vários equipamentos precisam ser detectados, cada *frame* deverá ser submetido a cada classificador específico.

Para o marcador de realidade aumentada proposto, baseado em *Haar-like features*, a detecção de objetos é realizada de forma independente do ponto de vista do observador. Esta característica permite o desenvolvimento de ambientes de realidade aumentada com marcadores naturais. É importante ressaltar que o marcador natural deve corresponder a um objeto já presente na cena, sem necessidade de modificação da cena.

O marcador natural 3D proposto utiliza, no treinamento do método de detecção, imagens de diferentes pontos de vista do equipamento. Cada grupo de imagens utilizado corresponde a uma determinada face do equipamento conforme ilustrado na (Figura 23).

Figura 23 – Ilustração conceitual do marcador natural 3D baseado em *Haar-like features*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, cria-se um marcador natural tridimensional, no qual a detecção de objetos é realizada de forma rápida (restrição para aplicações de tempo real na área de realidade aumentada) e independente do ponto em vista. A independência do ponto de vista vale tanto para os ambientes de realidade aumentada, em que o usuário está presente na área de operação da subestação, quanto para os ambientes de realidade virtual, nos quais a disposição do equipamento na imagem panorâmica obtida também depende do

local em que essa imagem foi adquirida.

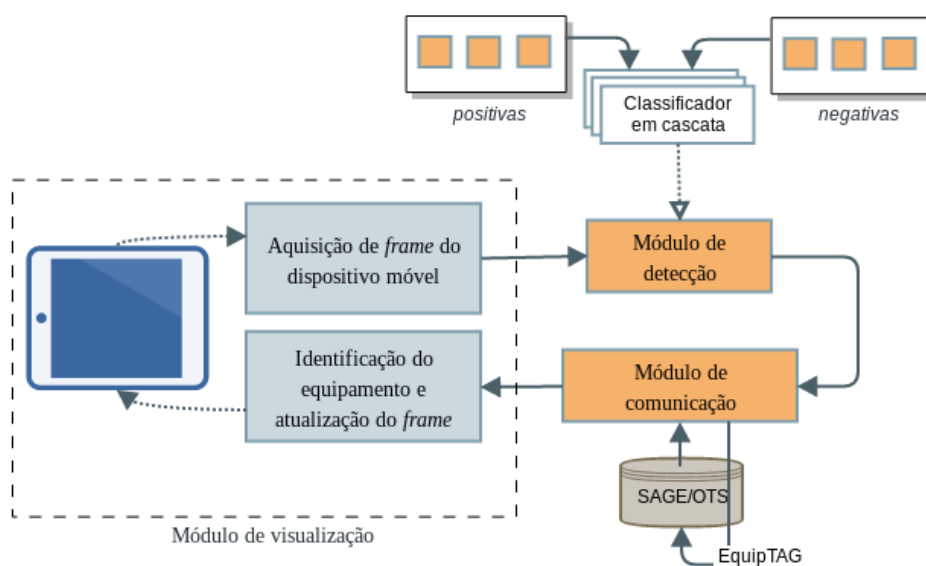
Esta metodologia de uso dos marcadores naturais baseados em *Haar-like features* é aplicada nesta tese em duas arquiteturas distintas; uma baseada em realidade aumentada e outra em realidade virtual. A aplicação dos conceitos de marcadores naturais nestes ambientes possibilita a detecção de objetos nestes cenários.

4.3.1 Marcadores naturais com detecção em tempo real (RA)

Os marcadores naturais com detecção em tempo real podem ser aplicados em visualizações voltadas para a criação de ambientes de realidade aumentada. Nesta abordagem, os equipamentos são usados como marcadores naturais e a detecção é projetada para uso em ambientes *outdoor*.

Através dessa abordagem, espera-se contribuir com o uso do potencial de realidade aumentada ao cenário industrial. Uma visão completa dos módulos e do fluxo desde a aquisição da imagem até a visualização da anotação com uso de marcadores naturais em realidade aumentada é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Módulos e fluxo de informação na visualização em dispositivos móveis para realidade aumentada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A criação de ambientes de realidade aumentada consiste na habilidade do sistema reconhecer objetos que estão presentes na cena. Com base na utilização dos marcado-

res naturais apresentados nesta metodologia, a proposta de visualização com realidade aumentada consiste em três módulos principais, que são descritos nas subseções seguintes.

4.3.1.1 Módulo de visualização

Este módulo é adaptado para utilização em dispositivos móveis (como *tablets* e *smartphones*) e visualização de dados dos equipamentos. O módulo de visualização é tanto a etapa inicial do processo quanto a etapa final. É possível adaptar os formatos de visualização como visão estéreo para óculos de realidade aumentada apenas com modificações no módulo de visualização nesta arquitetura de realidade aumentada.

Inicialmente são realizados ajustes relacionados à configuração da posição da câmera para aquisição das imagens. O módulo de visualização é responsável pelo envio do *frame* obtido pela câmera do dispositivo móvel para o processo de detecção de objetos.

A restrição principal desta etapa de visualização é quanto ao tempo de resposta de processamento de cada *frame*. Nesta arquitetura voltada para aplicações de realidade aumentada, a detecção com *Haar-like features* integrada a dispositivos móveis foi realizada tanto em visão monocular (*tablets*) quanto em visão estereoscópica (*smartphones*) para uso com dispositivos vestíveis, mais especificamente com HMD (Figura 25).

Figura 25 – Óculos de realidade virtual com abertura para visão de realidade aumentada utilizado: VR Box.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A possibilidade de incluir uma ferramenta móvel para os operadores possibilita que o usuário possa realizar a aquisição de informações no campo de operação, sem a

necessidade de retornar ao centro de operação para acessar um determinado sistema que contém a informação desejada. E com o uso auxiliar da realidade aumentada é possível acrescentar, por exemplo, informações sobre o equipamento de uma determinada tarefa a ser executada durante a operação.

4.3.1.2 Módulo de detecção

Este pode ser considerado o módulo principal desta arquitetura de visualização para ambientes de realidade aumentada, visto que concentra o método de processamento de imagem descrito previamente na fundamentação (Seção 2.2.2.2).

No fluxo de processamento, após receber a imagem da câmera, cada *frame* é tratado pelo módulo para detecção de equipamentos na cena. O módulo de detecção é responsável por carregar o resultado do treinamento do classificador e aplicar o filtro homomórfico. Este filtro é importante devido à dinâmica de iluminação de ambientes *outdoor*. Após este processo de aplicação do filtro, a imagem resultante é usada como entrada no algoritmo de detecção para encontrar os equipamentos existentes na cena.

Em casos em que o resultado do processo de detecção é computado e algum equipamento é encontrado, o retorno do módulo é a posição do objeto detectado no *frame*, sendo esta posição usada posteriormente para incluir a informação como sobreposição à cena. Para obtenção das informações referentes aos equipamentos é realizada uma consulta no módulo de comunicação.

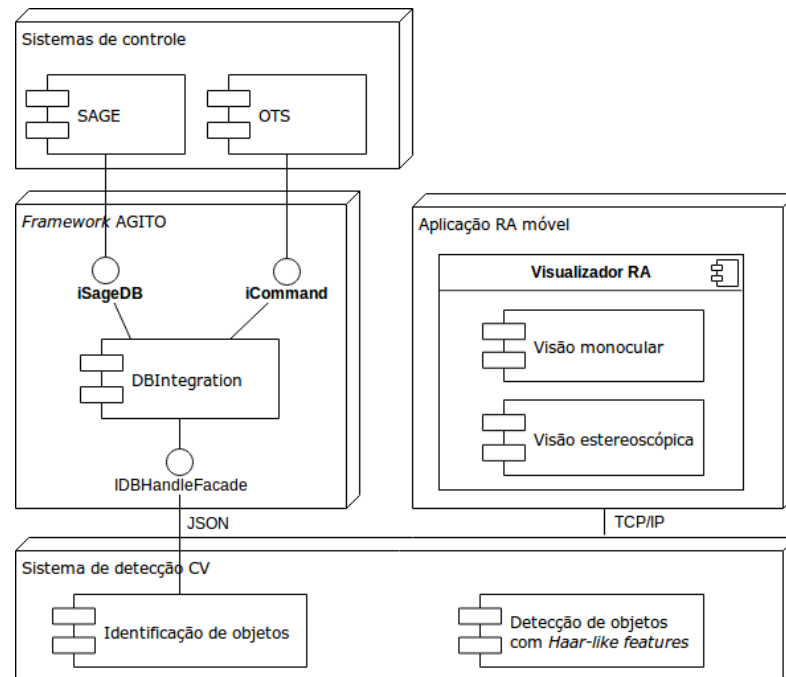
4.3.1.3 Módulo de comunicação

Após a etapa de detecção, o módulo de comunicação realiza a aquisição das informações dos equipamentos. Essa infraestrutura de comunicação é comum tanto para arquitetura de realidade virtual quanto de realidade aumentada. A parte comum às duas arquiteturas, bem como exemplo do arquivo de comunicação é mais bem detalhada na Seção 4.4.

Em realidade aumentada, basicamente o módulo utiliza a TAG de identificação para realizar o mapeamento da informação a respeito do equipamento. Como foi dito anteriormente, a TAG do equipamento o identifica no sistema SCADA/EMS, e através deste identificador, a informação desejada é requisitada e recebida.

O módulo de comunicação para realidade aumentada deste trabalho é baseado no *framework* AGITO, no qual os sistemas de controle são acessados através de interfaces via chamadas remotas RPC e disponibilizadas pelos sistemas SAGE e OTS. A integração com a base de dados disponibiliza acesso e controle para modificação de dados via protocolo TCP/IP disponível no formato de *sockets*. É possível, dessa forma, enviar e receber mensagens com os dados do sistema elétrico no formato de dados JSON (Figura 26).

Figura 26 – Arquitetura de aquisição de dados integrada ao SAGE/OTS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1.4 Estimativa de pose com múltiplos modelos baseados em *features*

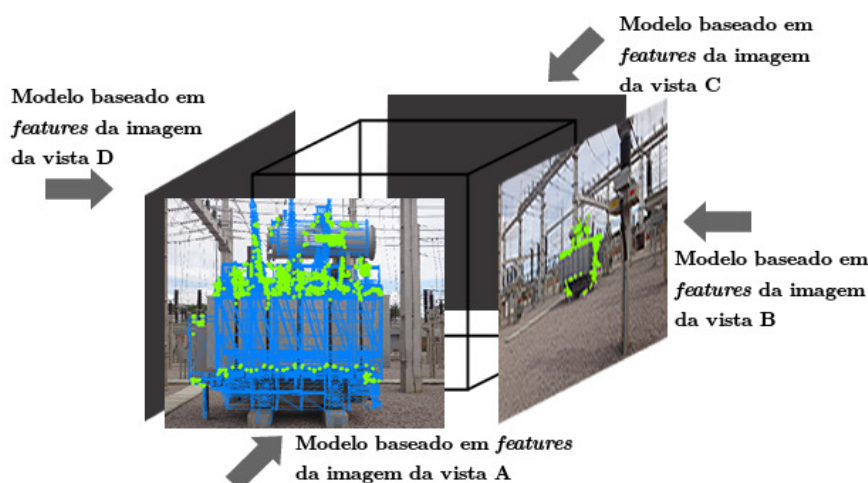
Na arquitetura voltada para construção de ambientes de realidade aumentada existe ainda a etapa referente à estimativa de pose. Nesta etapa, utiliza-se os métodos EPnP e RANSAC, além do uso de múltiplos modelos baseados em *features*. A utilização de múltiplos modelos é necessária para garantir uma solução de estimativa de pose independente do ponto de vista do observador (assim como é realizada a detecção), pois no cenário real, a aquisição de imagens pode ser obtida de várias vistas de um mesmo objeto.

Na estimativa de pose, é necessário obter as *features* do objeto e armazená-las em um modelo de *features* 3D (diferente do modelo utilizado na classificação com *Haar-like*

features). Nessa fase utiliza-se o ORB *features* para detecção de *keypoints* e extração de características da imagem. A grande razão da utilização de ORB *features* é que o processo de *feature-matching* é fundamental para o problema de estimativa de pose com o método EPnP e é computacionalmente custoso. Dessa forma, a utilização dessas *features* é apresentada como um método auxiliar para detecção quando necessário, permitindo a escolha de uso de anotações para realidade aumentada em 2D (*Haar-like features*) ou 3D (detecção com estimativa de pose).

Geralmente, os métodos baseados em *features* de imagem, criam estratégias para apenas uma determinada vista do objeto para o processo de *feature-matching*. Por essa razão, na etapa de estimativa de pose, as soluções permanecem utilizando apenas uma vista do objeto observado. Nesta metodologia, a proposta para estimativa de pose consiste na criação de um modelo 3D baseado em *features*. Este modelo 3D ilustrado na Figura 27 é criado com múltiplas vistas do objeto.

Figura 27 – Modelo 3D baseado em *features* de múltiplas vistas.



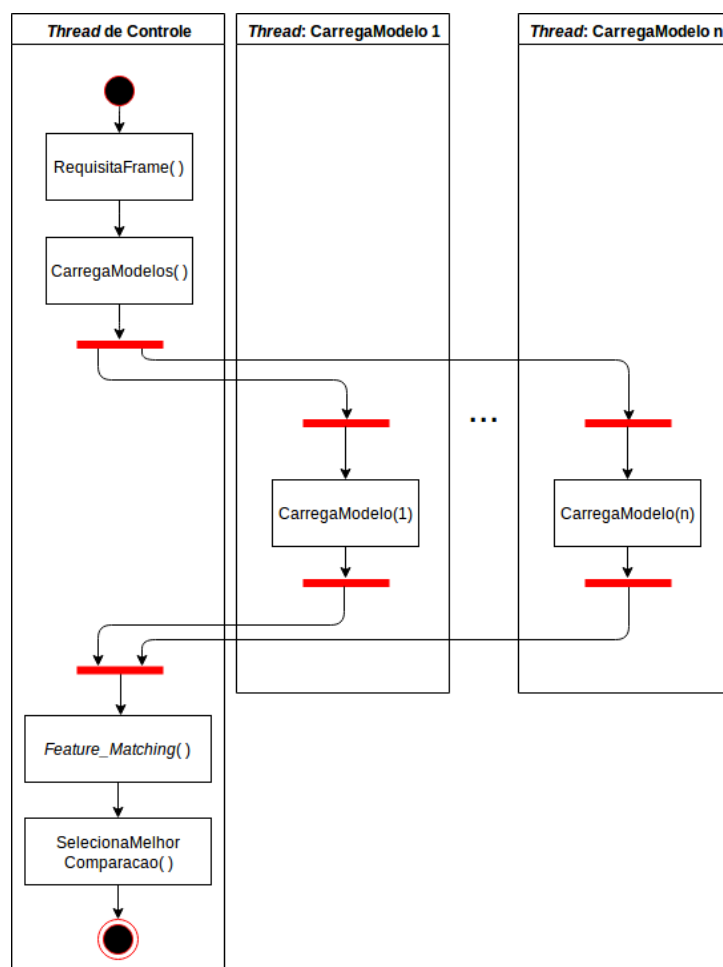
Fonte: Elaborado pelo autor.

A estimativa de pose para objetos 3D necessita, então, apenas de *features* dessas vistas distintas. Cada vista produz um modelo específico e cada modelo é usado para especificar a vista utilizada pelo observador.

Esta estratégia pode ser usada com programação multi-thread para carregar os modelos diferentes e possibilitar o cálculo dos *keypoints* e o processo de *matching* da imagem (Figura 28).

O processo de detecção permite selecionar mais de uma vista possível associada ao modelo de *features* carregado. Nesses casos, o resultado do processo de *feature-matching*

Figura 28 – Diagrama de atividade para carregamento de modelos de diferentes perspectivas



Fonte: Elaborado pelo autor.

define qual vista possui o melhor resultado geral. Esse resultado é então selecionado para o processo de estimativa de pose. Essa seleção providencia as melhores correspondências usadas na estimativa.

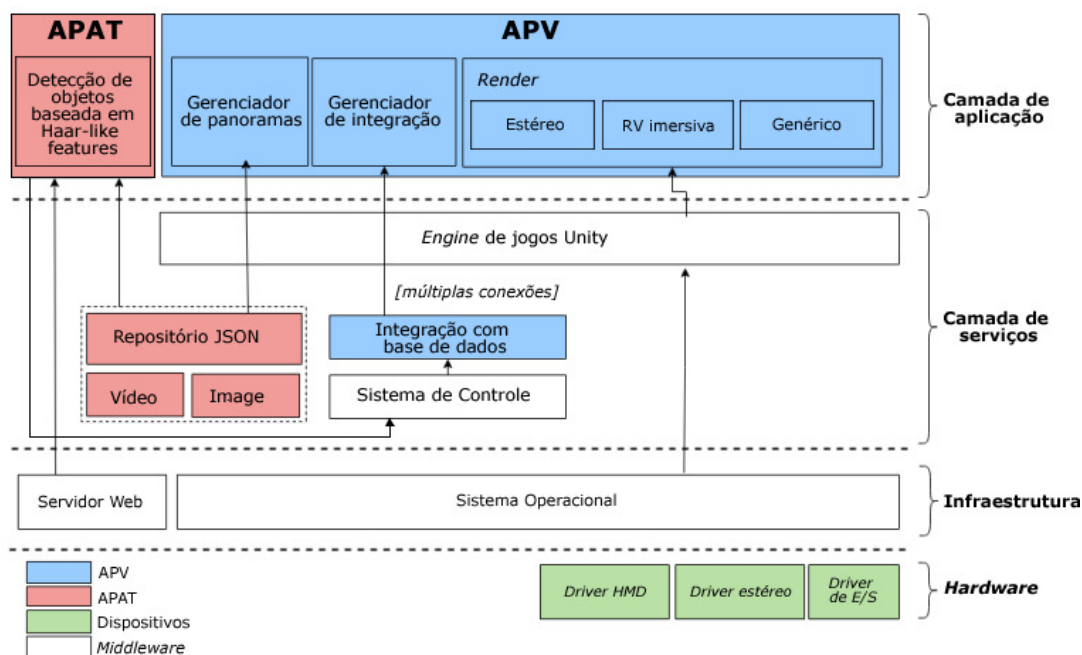
4.3.2 Marcadores naturais com detecção para autoria de panoramas aumentados (RV)

Além da aplicação do conceito de marcadores naturais em realidade aumentada, esta tese propõe uma arquitetura semiautomática baseada no uso dos marcadores naturais para criação de ambientes de realidade virtual baseados em panoramas aumentados. A detecção, nestes casos, é aplicada durante a fase de criação dos ambientes através de ferramenta de autoria.

A adaptação apresentada à criação de ambientes baseados em panoramas é uma

evolução da arquitetura apresentada em (REIS et al., 2014), através da extensão do módulo de autoria visando facilitar a construção de ambientes baseados em panoramas aumentados, além da inclusão dos panoramas esféricos no ambiente de visualização. A arquitetura geral pode ser visualizada na Figura 29. Esta arquitetura possui quatro camadas principais: *hardware*, infraestrutura, serviços e aplicação.

Figura 29 – Diagrama de blocos da arquitetura com extensão do módulo APAT



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, o usuário possui acesso apenas à camada de aplicação, em que a ferramenta de autoria e de visualização estão inseridas. Toda a infraestrutura e comunicação de dados é similar à metodologia apresentada para criação de ambientes de realidade aumentada, porém nesta abordagem, o foco é a construção de ambientes de realidade virtual, aplicando os métodos de detecção apresentados. Dessa forma, a etapa de criação dos ambientes baseados em panoramas se torna mais simples.

Ainda que este estudo utilize ambientes com panoramas aumentados com imagens *offline*, ou seja, com imagens reais obtidas do ambiente de operação, a arquitetura apresentada pode ser adaptada para uso integrado com câmeras panorâmicas de vídeo, possibilitando a criação de ambientes de realidade aumentada com visualização em tempo real.

Do ponto de vista funcional, a arquitetura apresenta dois blocos principais: a

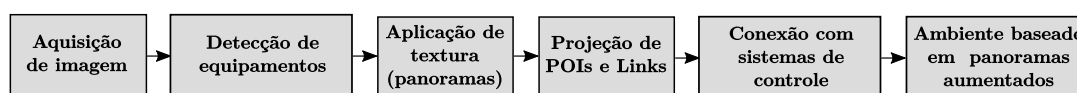
ferramenta de autoria para panoramas aumentados (APAT) e o visualizador de panoramas aumentados (APV). A metodologia voltada para detecção de objetos está presente no módulo APAT.

4.3.2.1 Evolução do módulo APAT para detecção de objetos

Um dos benefícios de trabalhar com panoramas aumentados nesta etapa de autoria é que não há a necessidade de inclusão de modelos 3D. Essa característica reduz ainda mais o tempo de construção do ambiente de visualização.

As etapas do processo de criação de ambientes baseados em panoramas aumentados são apresentadas na Figura 30. A aquisição de imagens também é um processo importante tanto para o treinamento do detector quanto para a geração do panorama.

Figura 30 – Etapas para o processo de visualização dos panoramas aumentados



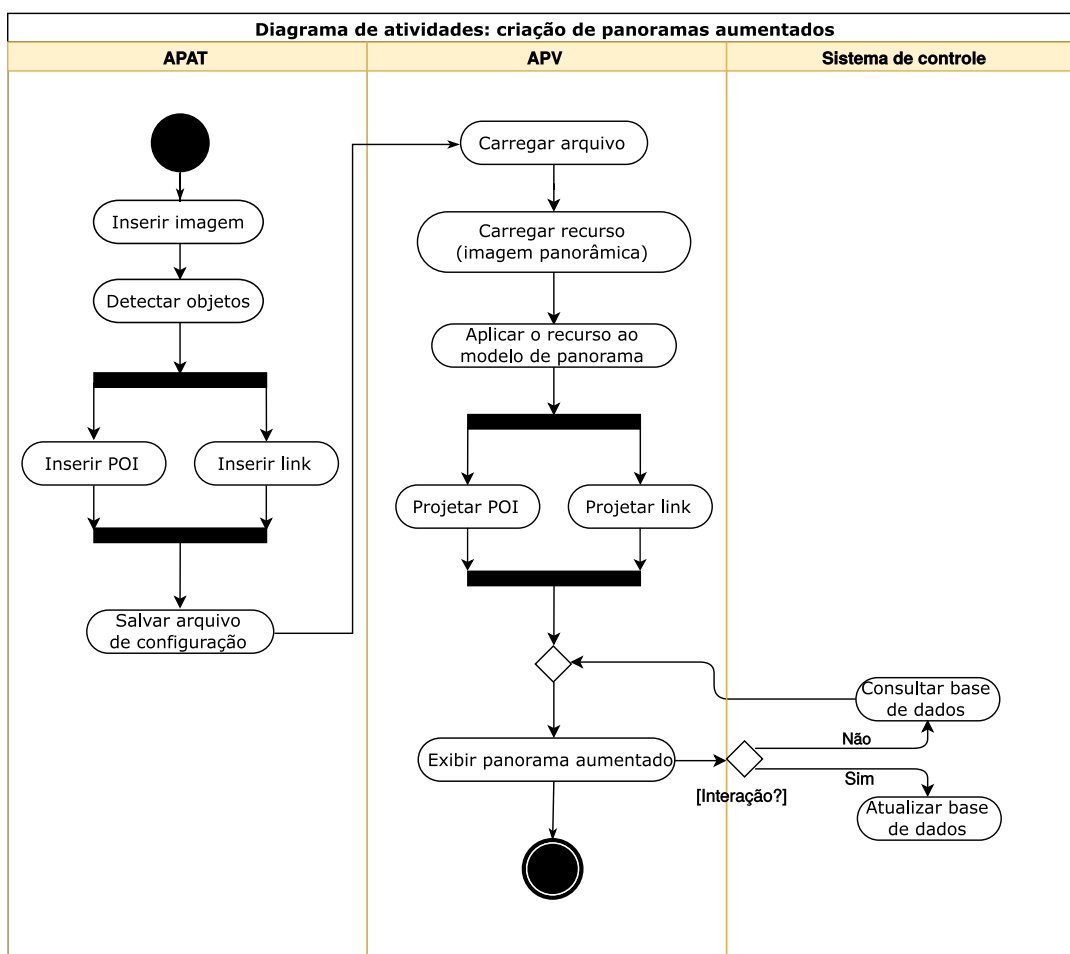
Fonte: Elaborado pelo autor

As texturas são aplicadas às geometrias respectivas de cada tipo de panorama. O módulo APAT possui a inclusão dos POIs e *links* adicionados na construção do ambiente. Nessa etapa, a detecção dos equipamentos é utilizada para auxiliar o usuário na inclusão dos POIs, reduzindo o tempo total na construção da aplicação.

As etapas apresentadas possuem como tarefas importantes a aquisição de imagens reais; anotações dos POIs nos panoramas; armazenamento de informação dos panoramas; e visualização de cada tipo de panorama aumentado. O processo geral de integração entre os módulos APAT, APV e os sistemas de controle são apresentados no diagrama de atividades da Figura 31.

No módulo APAT, após a inserção da imagem panorâmica, é realizada a detecção dos equipamentos presentes na imagem. Os modelos de panoramas citados anteriormente (Figura 31) são relacionados a cada tipo de panorama utilizado. Este conceito difere-se do conceito tradicional de modelos 3D geralmente usados em ambientes de realidade virtual. Ao invés disso, o modelo mencionado apenas carrega a imagem panorâmica para cada cenário estabelecido. A inclusão de modelos 3D não é realizada nesta abordagem, nem é alvo da arquitetura apresentada para panoramas aumentados. Essa decisão justifica-se

Figura 31 – Diagrama de atividades para a criação e visualização dos ambientes aumentados



Fonte: Elaborado pelo autor

pelo fato que o uso de modelos 3D tende a aumentar o tempo e o custo de desenvolvimento dos ambientes baseados em panoramas aumentados.

O uso de marcadores naturais para ambientes baseados em panoramas aumentados, como mecanismo para inclusão de POIs, proporciona uma solução semiautomática para construção dos panoramas aumentados.

4.4 Identificação do objeto detectado

Após a etapa de detecção dos marcadores naturais é necessário identificar o equipamento que foi detectado para então possibilitar a anotação do equipamento. Esta é uma função necessária para permitir a consulta dos dados do equipamento. Para o uso em realidade aumentada, essa metodologia propõe a utilização de mais de um tipo de sensor, além do cálculo do ângulo do campo de visão do observador. Os sensores de

GPS e compasso auxiliam a identificação dos marcadores naturais 3D. Já para o uso em realidade virtual, após a detecção do equipamento na imagem panorâmica, a inclusão da TAG do equipamento na ferramenta de autoria é realizada manualmente pelo usuário.

4.4.1 Identificação em realidade aumentada: cálculo do campo de visão do observador com uso de dados georreferenciados

A maioria dos dispositivos móveis como *smartphones* e câmeras digitais possuem sensores auxiliares para geolocalização e orientação. Para aplicações que não necessitam de grande precisão, apenas com o uso dos dados do sensor GPS é possível resolver o problema de localização. O sistema de GPS tem sido utilizado geralmente para situações de localização em mapas.

Em ambientes *outdoor*, como a detecção dos equipamentos dentro de uma área industrial, o uso exclusivo de dados GPS não se apresenta como uma solução razoável, devido ao erro inerente da localização do sistema GPS (de até 7.8 metros com 95% de confiança). No entanto, este erro pode apresentar variações dependendo de condições atmosféricas, qualidade de recepção do sinal e até de condições das nuvens para um céu limpo (GPS, 2014). É importante ressaltar que esta abordagem considera a detecção como uma camada auxiliar aos dados GPS e, em situações que dificultem a obtenção correta das informações de localização, a detecção pode funcionar independente da abordagem automatizada com GPS.

Existem *frameworks* para construção de ambientes de realidade aumentada que usam apenas dados GPS como fonte principal de informação. Estes *frameworks* conseguem adicionar informação virtual ao mundo real, porém as situações de erro mencionadas referentes ao sistema GPS e condições ambientais ocasionam geralmente anotações fora do lugar apropriado na aplicação real.

Com a baixa precisão dos aparelhos de GPS disponíveis no mercado, propõe-se utilizar além dos dados georreferenciados, os dados dos sensores de compasso (presentes na maioria dos dispositivos móveis) como etapa posterior à detecção do objeto.

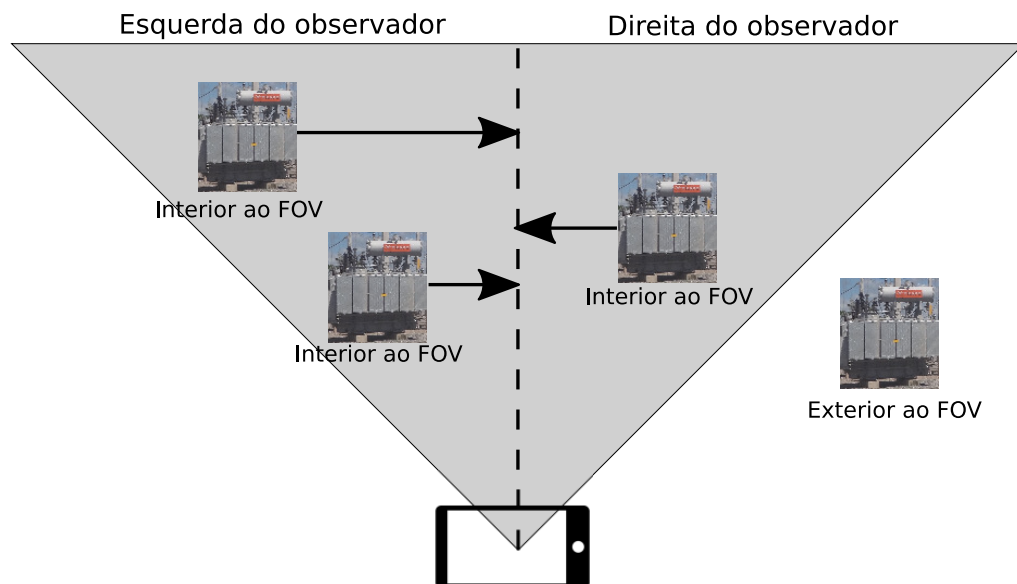
Dessa forma, após a detecção do transformador na imagem, são consideradas três variáveis principais: a localização do operador no instante da aquisição da imagem, as localizações georreferenciadas dos transformadores presentes na subestação e a orientação do sensor de compasso para o cálculo do FOV deste observador. O FOV é calculado com

base nos parâmetros intrínsecos da câmera, descrito na Equação 4.1. O ângulo α é a metade da abertura do FOV e usado para identificar quais equipamentos da subestação estão inseridos na imagem obtida.

$$\alpha = \arctan \frac{s}{2f} \quad \begin{array}{l} s = \text{Sensor dimension} \\ f = \text{Focal length} \end{array} \quad (4.1)$$

Além disso são utilizadas informações da câmera, como o tamanho do sensor e distância focal para calcular o ângulo de abertura e, assim, verificar os objetos inseridos dentro do ângulo de visão do *frame* (Figura 32).

Figura 32 – Identificação de objetos dentro do campo de visão do observador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a obtenção do FOV, a posição dos objetos é analisada em relação à linha central do campo de visão e às linhas limites (direita e esquerda), em relação ao campo de visão. Com estas informações é possível identificar quais equipamentos foram detectados na imagem, calculando sua distância à linha central e calculando se o objeto detectado está à direita ou à esquerda do observador. Essa abordagem permite ainda identificar mais de um objeto detectado na mesma imagem.

Com essas informações calculadas, associa-se, com base no campo de visão do observador 2 distâncias para identificação do equipamento:

- Distância do equipamento à linha central do campo de visão: considera quais equipamentos estão à esquerda, direita ou sobre a linha central. É calculada a

distância entre ponto e reta para esta medida;

- Distância entre observador x transformador: cálculo da distância euclidiana para identificar qual equipamento está mais próximo do observador.

Após a delimitação dos equipamentos, cálculo da linha central e do campo de visão, é possível estabelecer uma relação entre equipamento mapeado e equipamento detectado na imagem da cena.

Essa proposta pode ser utilizada em ambientes *outdoor*, devido ao maior grau de confiabilidade dos dados GPS em sensores de baixo custo, que se comportam melhor nestes cenários ao ar livre e, dessa forma, com a união da estratégia de marcadores naturais 3D associados aos dados georreferenciados é possível minimizar o erro de utilização apenas dos dados GPS. Essa estratégia funciona como uma camada auxiliar de informação, contendo os dados da detecção do objeto desejado, dentro do sistema de realidade aumentada.

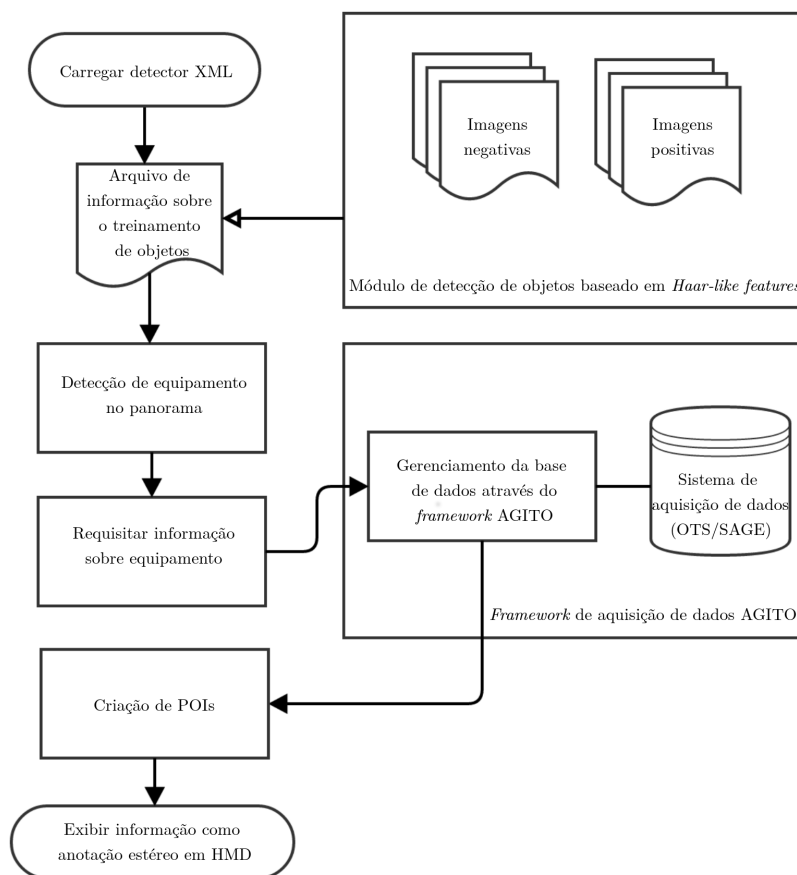
Em ambiente *indoor*, o erro de posicionamento do GPS aumenta e o comportamento se tornaria inviável. Além disso, é possível que em determinadas condições do ambiente que causem interferência ao sinal GPS, os dados de georreferenciamento sejam apresentados de forma incorreta. Nessas situações, essa arquitetura permite ainda que o operador possa alternar para o modo de atuação manual da aplicação de realidade aumentada, contendo basicamente a detecção do equipamento. Nessa abordagem a identificação seria realizada manualmente pelo operador, com base em uma lista de equipamentos disponíveis.

4.4.2 Identificação em realidade virtual: inclusão de POIs

A identificação em realidade virtual é realizada com o auxílio de ferramenta de autoria no processo de construção do ambiente. Após a etapa de detecção de objetos que é utilizada para auxiliar a anotação dos equipamentos, é necessário mapear cada equipamento a uma TAG de identificação. Cada TAG identifica o equipamento correspondente na base de dados, através do formato de POIs. O fluxo desde a detecção até a visualização é apresentado na Figura 33. Além da possibilidade de utilizar diferentes tipos de panoramas, a ferramenta de autoria permite o controle da anotação de dados, e modificações no ambiente de realidade virtual.

A etapa de detecção de POIs na imagem panorâmica é realizado através da metodologia de marcadores naturais ou ainda pode ser realizada manualmente pelo

Figura 33 – Fluxo de informação do processo de inclusão de anotações na ferramenta de autoria



Fonte: Elaborado pelo autor

usuário, através da anotação de uma região da imagem e identificação com a TAG do equipamento. Toda a configuração de POIs fica armazenada em arquivo de configuração para ser carregada posteriormente pelo visualizador de panoramas.

4.5 Obtenção de informações reais de equipamentos

No caso específico da arquitetura voltada para construção de ambientes de realidade virtual, visto que estes ambientes não possuem dados de georreferenciamento, após o processo de detecção, a configuração da TAG de identificação do equipamento é informada manualmente pelo operador na ferramenta de autoria.

A TAG é utilizada para obtenção dos dados do equipamento com a mesma infraestrutura de comunicação tanto para realidade virtual quanto para realidade aumentada. Cada equipamento possui este código único dentro do SAGE (CEPEL, 2015) e através deste código é obtida a informação do equipamento. Foi utilizado o *framework* definido

em (RIBEIRO et al., 2014) para a comunicação com os dados do sistema elétrico.

Após a realização das etapas de detecção e identificação do equipamento, cabe ao sistema de comunicação com dados SCADA/EMS realizar o mapeamento das informações do equipamento com base na TAG identificada do equipamento.

Para a troca de mensagens de solicitação, esta metodologia utiliza o formato JSON para recebimento das informações dos equipamentos. Um exemplo de código de recebimento de dados pode ser visualizado na Código-fonte 4.1.

Código-fonte 4.1 – Código com informações de equipamentos no formato JSON

```

1  {"Equipamentos":{
2    "SUT:04T201":{
3      "AMP:S":"AMP:S:263",
4      "MVAR:P":"MVAR:P:7",
5      "MW:S":"MW:S:-31",
6      "MVAR:S":"MVAR:S:-5",
7      "MW:P":"MW:P:31",
8      "KV:P":"KV:P:231",
9      "AMP:P":"AMP:P:80",
10     "TAP":"TAP:19"
11   },
12   "SUT:04T101":{
13     "MVAR:P":"MVAR:P:-4.0",
14     "MW:S":"MW:S:-31",
15     "MW:P":"MW:P:31",
16     "MVAR:S":"MVAR:S:4.2",
17     "KV:S":"KV:S:70",
18     "KV:P":"KV:P:231",
19     "AMP:P":"AMP:P:49",
20     "AMP:S":"AMP:S:161.1",
21     "TAP":"TAP:19"
22   }
23 }
24 }
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Com essa abordagem é possível construir sistemas de realidade virtual e realidade aumentada, incluindo informações reais que possam auxiliar os operadores do sistema no processo de controle e identificação de problemas da subestação de energia.

Além disso, as informações críticas podem ser especificadas, mostrando apenas estados de alerta com base nos alarmes definidos no sistema, diminuindo a quantidade de dados observados pelo operador.

É possível ainda, nos casos de aplicação em cenários de realidade virtual, utilizar essa comunicação para criação de ambientes de treinamento com situações específicas e maior grau de imersividade dos usuários com o ambiente de aprendizagem.

4.6 Visualização com diferentes formatos

Como tratado até aqui, a metodologia apresentada propõe utilização dos marcadores naturais em diferentes formatos de utilização e visualização. Tanto em realidade virtual quanto em realidade aumentada, são utilizados dispositivos móveis, que possibilitam, além do uso de diferentes formatos, o benefício da mobilidade do usuário. Nesta metodologia, a utilização dos marcadores naturais é subdividida em duas propostas de visualização, diferentes nos aspectos de tecnologia e de formato de tela.

As propostas de visualização fazem parte da metodologia, pois apresentam conceitos diferentes de visualização e, dessa maneira, propõem soluções para a forma de criação dos marcadores naturais. A utilização destes marcadores aplicados em sistemas avançados de visualização de informação possibilita um formato inovador de arquiteturas para criação de sistemas.

Na primeira proposta de visualização, são aplicados aos sistemas de realidade aumentada, diferentes formatos de tela: com visão monocular (único *display*) usando *tablets* ou com visão estereoscópica através do uso de HMD para realidade aumentada. Na segunda proposta de visualização, com o uso do conceito de panoramas aumentados, são criados ambientes de realidade virtual utilizando imagens panorâmicas como texturas e aplicando-as aos diferentes tipos de panoramas. Nas duas propostas de visualização, são utilizados os marcadores naturais baseados em *Haar-like features*.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para as etapas de detecção de equipamentos do ambiente de operação. As imagens utilizadas neste trabalho são de ambientes reais de operação das subestações de SUAPE II e III (em Recife-PE), e Extremoz (Natal-RN), todas da CHESF.

Todas as imagens utilizadas foram adquiridas com autorização da equipe técnica das empresas e através do projeto AGITO para criação de uma interface inovadora para centros de controle.

Para aplicação dos métodos apresentados neste trabalho foram utilizadas imagens obtidas com câmeras de diferentes resoluções, com informações de geolocalização, além dos resultados de detecção em tempo real com utilização de dispositivos móveis.

5.1 Material utilizado

Com o intuito de aplicar a metodologia através de soluções realidade virtual e realidade aumentada, utilizou-se a linguagem de programação multiparadigma C++ tanto nos treinamentos do classificador quanto na estratégia de estimativa de pose, além de diversos testes realizados. A escolha dessa linguagem nestes cenários é devido à sua portabilidade para diversos sistemas operacionais.

Foram utilizadas as bibliotecas OpenCV (OPENCV, 2015a) e OpenLayers (OPENLAYERS, 2015). O OpenCV é uma biblioteca de *software* livre destinada à solução de problemas de visão computacional e aprendizado de máquina. Já a biblioteca OpenLayers visa a criação de mapas e testes dos dados georreferenciados dos equipamentos presentes na subestação.

Além dessas bibliotecas, para possibilitar a criação de aplicações para dispositivos móveis, foi utilizada a plataforma Unity (UNITY, 2015). Os algoritmos de detecção, localização e acesso às bases de dados foram reescritos da linguagem C++ para a linguagem C#, que está disponível na plataforma.

O computador utilizado para a implementação e testes possui as seguintes características básicas: processador Intel Core i5-2.5 GHz, 8 GB de memória RAM e 500 GB de armazenamento. As câmeras utilizadas para aquisição das imagens foram uma SonyR Cyber-shot 8.1 megapixels e um iPad 8 megapixels com suporte a panorama, giroscópio

de três eixos e acelerômetro.

Para a etapa de testes de aplicação em dispositivos móveis com utilização das anotações com marcadores naturais foram utilizados dois dispositivos: um *smartphone* Motorola Moto-X (2ª geração, Android 5.1, processador de 1.4 GHz, câmera de 8.0 megapixels e memória de armazenamento de 32GB) e um tablet Positivo (7 polegadas *multitouch*, Android 4.0, processador de 1 GHz, câmera de 16 GB de memória de armazenamento). A versão da aplicação em *tablet* utiliza a visão monocular, enquanto a versão da aplicação em *smartphone* utiliza a visão estereoscópica.

5.2 Aquisição de Imagens

O processo de aquisição de imagens apresenta as mesmas dificuldades conhecidas de um ambiente de operação industrial. Na verdade, exatamente devido às questões de segurança em áreas operacionais é que este trabalho sugere o uso de marcadores naturais, visto que o acesso às áreas são restritas por razões de segurança e mesmo com as visitas técnicas realizadas não foi possível obter imagens com todos os ângulos e graus de proximidade desejados.

Entretanto, com as imagens e vídeos do cenário de operação, foi possível aplicar a metodologia para construção de visualizações que utilizam os conceitos apresentados. Os transformadores foram os equipamentos usados para a realização dos testes de validação desta pesquisa, visto que este equipamento faz parte do sistema de proteção elétrico da subestação.

O processo de aquisição de imagens realizado obteve um total de 5.083 imagens dos ambientes de operação das subestações da CHESF. Dentre as imagens foram obtidas imagens de transformadores e dos demais equipamentos do sistema como reatores, disjuntores, chaves, dentre outros.

Especificamente em relação aos transformadores, foram obtidas 144 imagens e 4 vídeos. Com a utilização dos vídeos, obtidos dos transformadores, foi possível ampliar para um total de 419 o número de imagens positivas utilizadas no treinamento e 274 imagens negativas. Para a realização dos testes de verificação da detecção, foram separadas 43 imagens positivas e 93 negativas.

Foram realizados testes de aquisição de imagens panorâmicas esféricas contendo transformadores, disjuntores e chaves para inclusão da detecção no processo de criação de

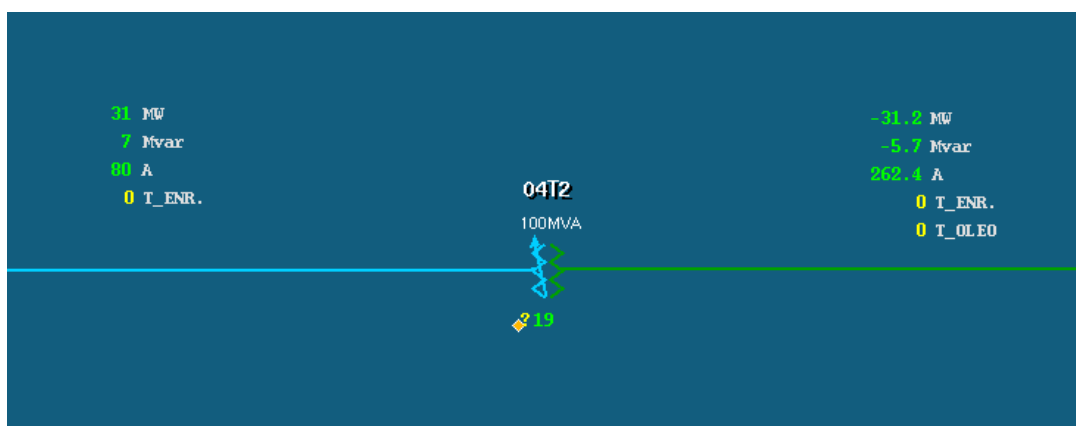
ambientes de realidade virtual com panoramas aumentados.

5.3 Integração com dados SCADA/EMS (SAGE)

Com a integração dos sistemas SAGE/OTS é possível realizar consultas aos dados dos equipamentos em tempo real, como valores de grandezas elétricas do equipamento, estado de operação (chaves abertas ou fechadas), dentre outros.

Além de consultas, esta comunicação permite ainda a interação com os equipamentos, modificando valores no ambiente OTS, como mostrado na alteração de parâmetro através da comunicação com o servidor de dados, passando a mensagem de alteração de dados “3#SUT:04T201;TAP;2” que passa o identificador do equipamento e o atributo que deve ser alterado, além do novo valor (Figura 34, Figura 35 e Figura 36). Essa solução permite através de modelo de troca de mensagens efetuar as solicitações de informações desejadas dos equipamentos para adicionar à visualização após detecção.

Figura 34 – Transformador 04T2 antes da operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

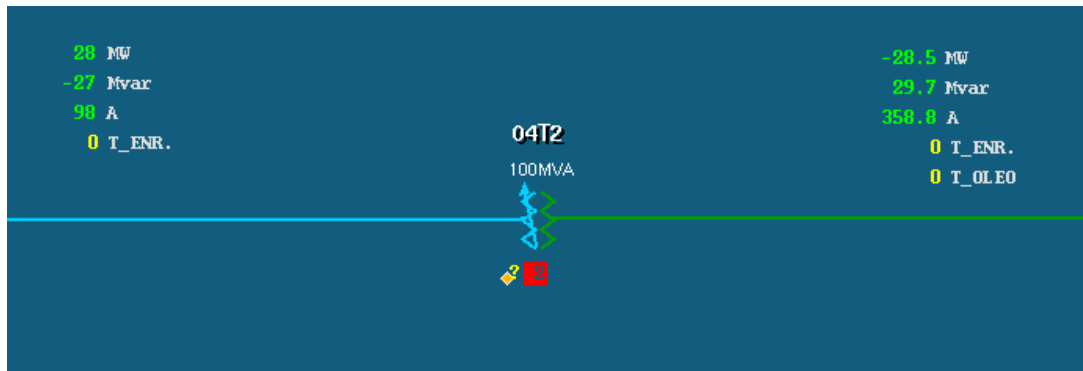
Figura 35 – Visualização no OTS após passagem da mensagem de solicitação “3#SUT:04T201;TAP;2” que altera o valor do TAP para 2

Resource count: 2			Station: SUT			Context:			
Company	Station	Transformer	Nominal...	Actual KV	MW	MVAR	Minimu...	Tap	Maximu.
CH	SUT	SUT:04T101	230.0	230.8	31.6	45.8	1	19	33
CH	SUT	SUT:04T201	230.0	231.2	28.5	-27.3	1	2	33

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ambiente de treinamento OTS é similar ao ambiente real, apenas com os dados simulados do estado de operação dos sistemas e escolhido dessa forma, obviamente por

Figura 36 – Transformador 04T2 após a operação e alarme indicando a mudança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

razões de segurança do sistema elétrico e para possibilitar testes da aplicação de consulta aos dados.

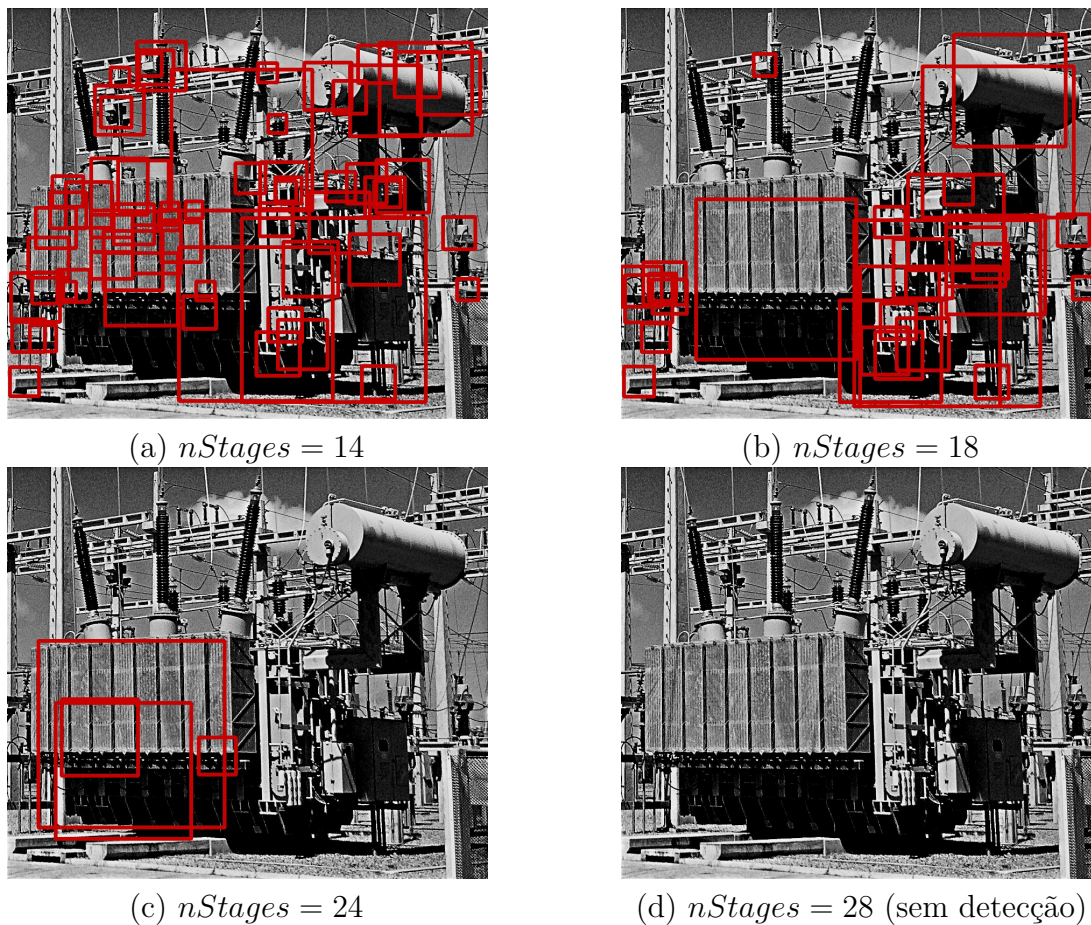
5.4 Detecção de objetos com *Haar-like features*

Conforme apresentado na metodologia, a abordagem utilizada para a detecção dos transformadores utiliza o classificador em cascata baseado em *Haar-like features*. Os resultados obtidos utilizaram uma base de imagens positivas e imagens negativas, que incluem, respectivamente, imagens que contêm os equipamentos e as áreas operacionais da própria subestação que não contém o equipamento.

Os parâmetros de treinamento basicamente são delimitados pela quantidade de imagens positivas e negativas. O parâmetro *nStages*, que define a quantidade de estágios utilizados no treinamento do classificador, é definido empiricamente de acordo com essa quantidade de imagens utilizadas. A lógica que envolve a definição dessa variável mostra que quanto maior a quantidade de estágios, teoricamente melhor é o detector. A Figura 37 e Figura 38 mostram resultados de detecção do classificador com variação no parâmetro *nStages*, sendo possível verificar que o aumento demasiado do número de estágios torna o classificador bastante crítico e ocasiona situações de falha na detecção. Nesses casos, é preciso fazer uma avaliação entre detecções corretas e incorretas para selecionar qual o melhor valor do parâmetro *nStages* para uma possível aplicação.

O parâmetro *nStages* é utilizado durante a etapa treinamento e define a quantidade de estágios do classificador. É possível afirmar que os resultados de detecção melhoram à medida que esse parâmetro aumenta. No entanto, o aumento desse parâmetro depende da quantidade de imagens utilizadas no treinamento.

Figura 37 – Resultados de detecção de transformador com vista frontal do equipamento e variações do parâmetro de treinamento $nStages$

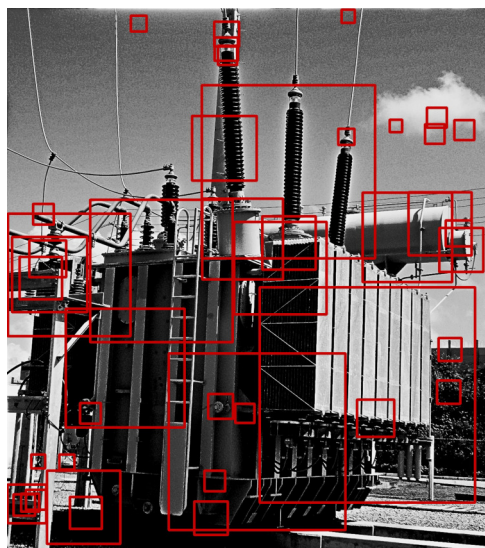


Fonte: Elaborado pelo autor

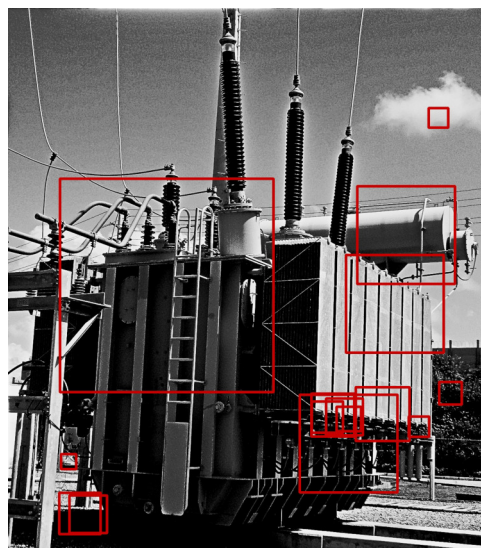
Foram realizados testes e verificações, com variações na quantidade de estágios utilizados. O resultado mostra a diminuição de detecções incorretas de *features* à medida que se aumenta o parâmetro $nStages$. O resultado dos testes de detecção pode ser observado na Tabela 3.

O método utilizado necessita do aumento da base de imagens e essa afirmação é válida tanto para imagens positivas quanto negativas para eliminação de falsos positivos e melhoria do classificador de maneira geral.

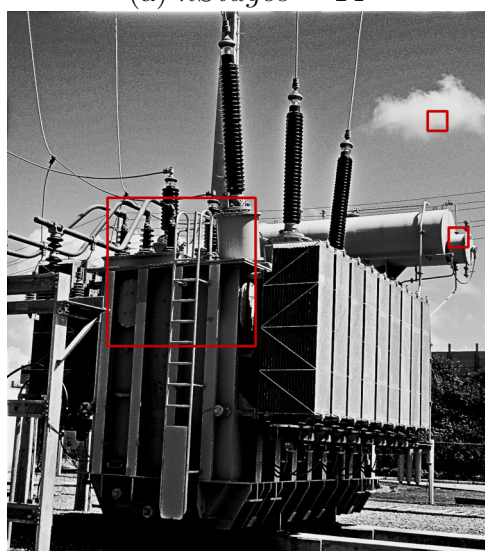
Figura 38 – Resultados de detecção de transformador com vista lateral do equipamento e variações do parâmetro de treinamento $nStages$



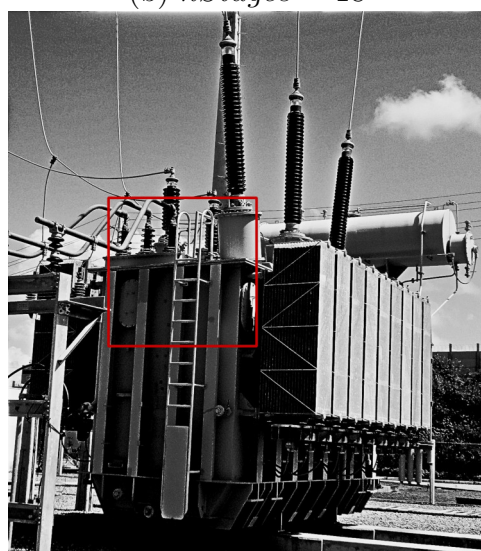
(a) $nStages = 14$



(b) $nStages = 18$



(c) $nStages = 24$



(d) $nStages = 28$

Fonte: Elaborado pelo autor

5.5 Estudos de caso para anotação com uso de marcadores naturais

5.5.1 Estudo de caso baseado em RA: marcadores naturais georreferenciados com detecção em tempo real

O primeiro estudo de caso faz uso da metodologia desenvolvida para criação de aplicação de realidade aumentada, sendo que a detecção de objetos é realizada através dos marcadores naturais em tempo real. A etapa de detecção com marcadores naturais basicamente faz a leitura do arquivo resultante do processo de treinamento do classificador.

Tabela 3 – Resultados de detecção com variação do parâmetro $nStages$ de 14 a 28

$nStages$	VP	VN	FP	FN	Sensibilidade	Especificidade	Acurácia
14	43	1	92	0	1.0	0.011	0.324
15	43	2	91	0	1.0	0.022	0.331
16	43	3	90	0	1.0	0.032	0.338
17	43	8	85	0	1.0	0.086	0.375
18	43	11	82	0	1.0	0.118	0.397
19	43	13	80	0	1.0	0.140	0.412
20	43	13	80	0	1.0	0.140	0.412
21	43	18	75	0	1.0	0.194	0.449
22	43	27	66	0	1.0	0.290	0.515
23	42	38	55	1	0.977	0.409	0.588
24	41	49	44	2	0.953	0.527	0.662
25	36	62	31	7	0.837	0.667	0.721
26	33	74	19	10	0.767	0.796	0.787
27	27	82	11	16	0.628	0.882	0.801
28	21	88	5	22	0.488	0.946	0.801

VP = Verdadeiro positivo; FP = Falso positivo; VN = Verdadeiro negativo; FN = Falso negativo;

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a realização da etapa de treinamento dos classificadores, a etapa de detecção possibilita utilizar os equipamentos como marcadores naturais. Dessa forma, descarta-se a necessidade do uso de marcadores fiduciais e da alteração do ambiente de operação. Em relação ao processo de recuperação de dados dos sensores de localização, como mencionado anteriormente, são utilizados os dados do sensor de compasso, geolocalização e os parâmetros da câmera para cálculo do campo de visão do observador.

Nos testes, a informação do metadado da imagem *imgDirection*, neste caso, remete ao compasso do dispositivo que foi usado na captura das imagens. Este parâmetro foi utilizado como o retorno do compasso para cálculo do ângulo de observação (Figura 39). Dessa forma, obtemos a informação de direção do usuário observador juntamente com os dados de localização GPS. Vale ressaltar que em testes realizados em ambientes *indoor*, a precisão do GPS é prejudicada, sendo utilizada neste trabalho apenas em ambientes outdoor (aberto) que possibilitam menor erro de precisão dos dados deste sensor.

O cálculo do FOV é realizado com base nas informações de localização obtidas a partir da posição do observador, como pode ser visto na Figura 40 e Figura 41. Os círculos brancos correspondem à posição do usuário e dos equipamentos presentes na subestação. A linha central do FOV corresponde à linha central do dispositivo móvel com relação ao

Figura 39 – Visualização de informações de metadados de localização geográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor

sensor de compasso.

Figura 40 – O método proposto para identificação de equipamentos com integração de dados GPS, sensor de compasso, localização do usuário, localização dos equipamentos e a imagem obtida da câmera



(a) Imagem real da subestação



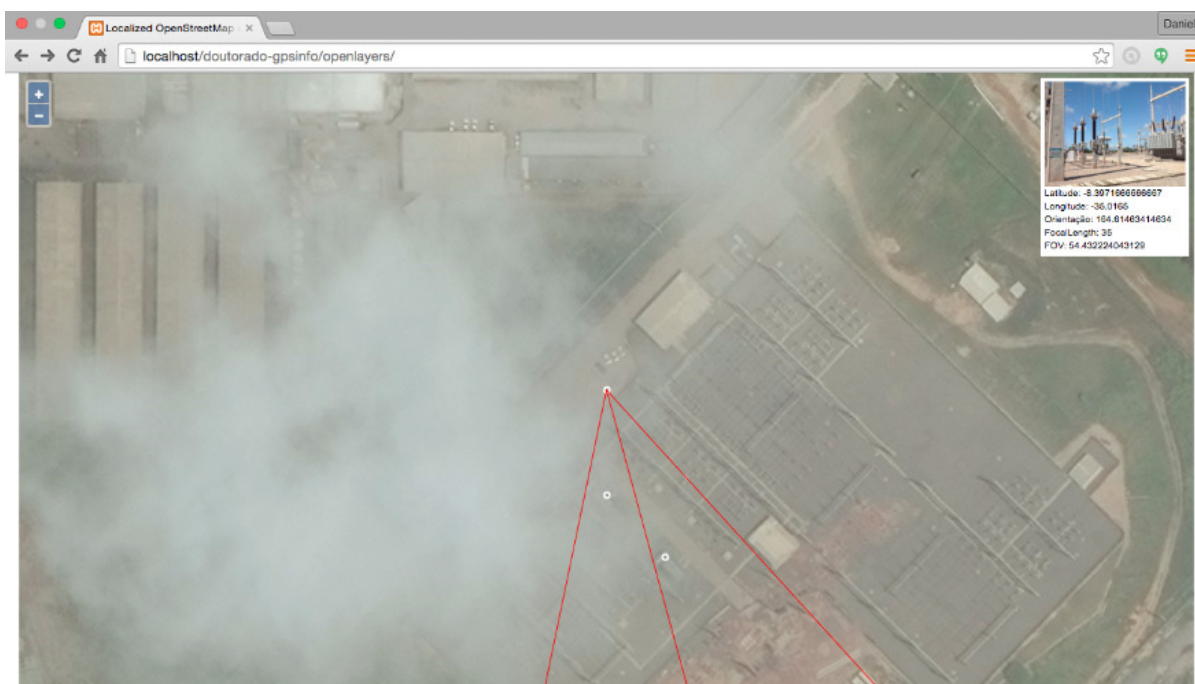
(b) FOV calculado com equipamentos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a delimitação dos equipamentos, o cálculo da linha central e do FOV, é possível incluir a informação desejada no *frame* em tempo real no processo de visualização dos dados.

Foram geradas aplicações em versão de desenvolvimento para dispositivos móveis com sistema operacional Android. Esses aplicativos foram instalados em versões *tablet* (visão monocular) e *smartphone* (visão estereoscópica para uso em óculos de realidade aumentada), como pode ser visto na Figura 42 e Figura 43, respectivamente. Além disso,

Figura 41 – Mudança de posicionamento da câmera, modificando o ângulo do campo de visão. A linha central irá auxiliar a etapa de identificação dos transformadores detectados na imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

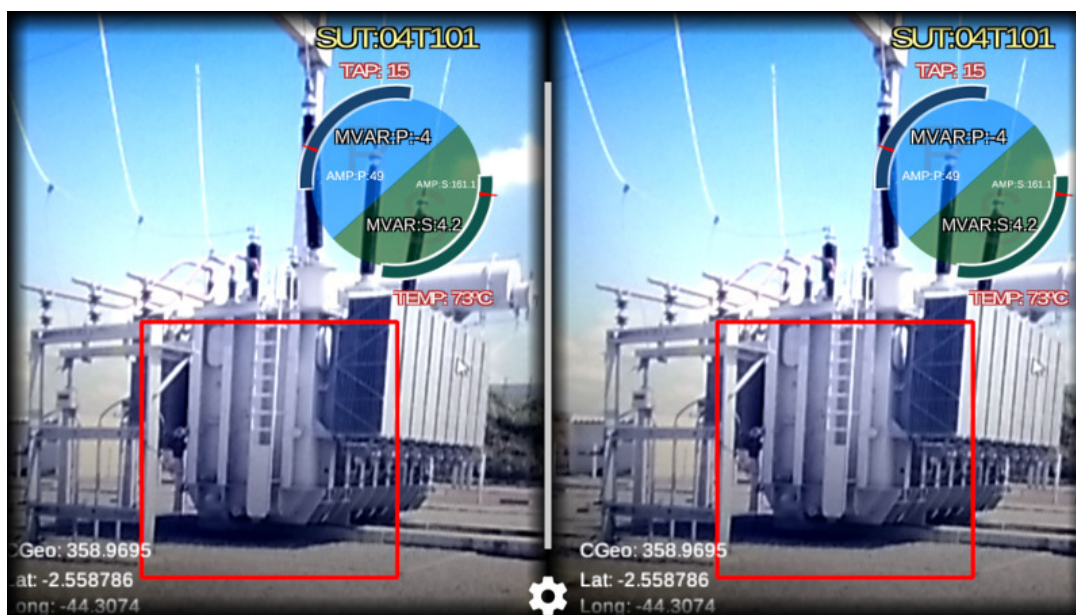
um vídeo da detecção em tempo real do ambiente de operação pode ser visualizado no endereço da web <https://youtu.be/tWR0_gbc1S0>.

Figura 42 – Visualização da aplicação em *tablet* (*single view*).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Visualização estereoscópica em tempo real integrada com dados OTS



Fonte: Elaborado pelo autor

A divisão da imagem da câmera (olho esquerdo e direito) é realizada para possibilitar a utilização dos HMDs para visão de realidade aumentada. A visão estereoscópica é configurada e gerada pela plataforma Unity e após a etapa de detecção, os retângulos que contêm os equipamentos detectados aparecem nas vistas tanto do olho esquerdo quanto do olho direito, com os deslocamentos necessários. Com isso, é possível visualizar diretamente no dispositivo móvel, acoplado à cabeça do usuário, as informações do equipamento detectado (Figura 44).

Foram realizados testes em ambientes de operação através da aquisição de vídeos e imagens para validação da ferramenta de realidade aumentada. Essa abordagem permite que um dispositivo possa ser levado à área de operação para visualização de informação de equipamentos do sistema, em um formato de visualização útil tanto para situações de treinamento de operadores, quanto para auxílio na operação do sistema, sendo um formato moderno para visualização de dados do sistema elétrico.

5.5.1.1 Estimativa de pose

Por fim, a etapa de estimativa de pose e inclusão de elementos 3D na cena, utiliza modelos baseados em ORB *features*. Esta pesquisa utilizou quatro diferentes modelos criados a partir de quatro vistas do transformador. Entretanto, a arquitetura voltada para realidade aumentada não é limitada a este número. Porém, à medida que o número de

Figura 44 – Visualização do usuário em realidade aumentada das informações em dispositivo vestível.

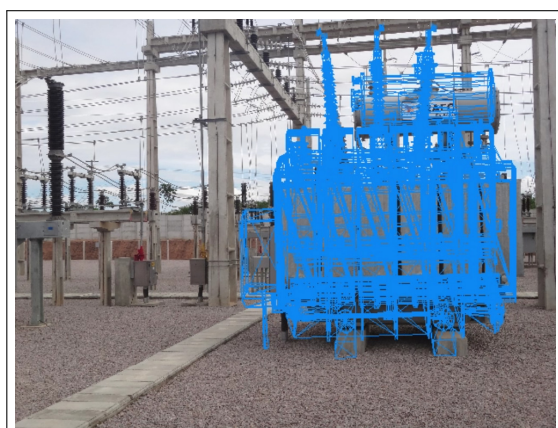


Fonte: Elaborado pelo autor

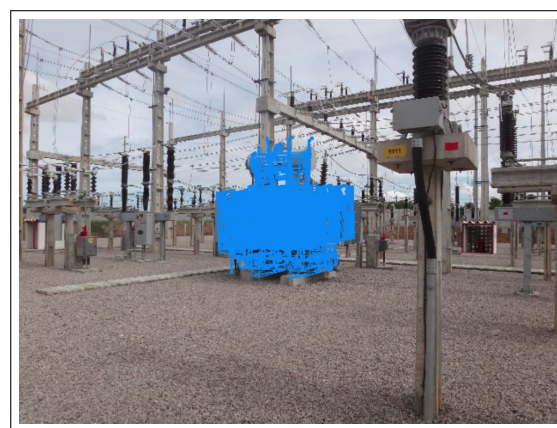
vistas aumenta (consequentemente o número de modelos), o custo computacional também aumenta, pois é necessário realizar o processo de comparação das *features* para realização da estimativa de pose.

A abordagem apresentada utilizou um modelo tridimensional de um transformador, que é utilizado para a estimativa de pose. A Figura 45 mostra o resultado dessa estimativa de pose e inclusão do modelo do equipamento sobreposto à cena visualizada.

Figura 45 – Processo de estimativa de pose usando diferentes vistas dos modelos baseados em *features*



(a) Estimativa de pose usando Modelo A



(b) Estimativa de pose usando Modelo B

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante mencionar que o método possibilita a criação de uma solução

completa para aplicações de realidade aumentada, desde a detecção até a estimativa de pose dos objetos. No entanto, essa etapa de estimativa de pose possui um alto consumo de processamento, devido ao esforço computacional para a solução com múltiplas vistas do objeto em um determinado *frame* da aquisição de imagens em tempo real. Dessa forma, com uso de equipamentos com maior poder de processamento, é possível ampliar este número de vistas e modelos 3D.

A Tabela 4 mostra informações sobre a vista do objeto, a estratégia de implementação utilizada, e o tempo de processamento. Todos os testes utilizaram modelos de *features* de diferentes perspectivas do objeto, com aproximadamente 12000 *keypoints* detectados.

Tabela 4 – Resultados das abordagens para estimativa de pose (com quatro modelos)

Vista do objeto	Multiprocessamento	Tempo total para estimativa de pose
A	Não	2564 ms
A	Sim	2532 ms
B	Não	2492 ms
B	Sim	2466 ms
C	Não	2504 ms
C	Sim	2461 ms
D	Não	2510 ms
D	Sim	2478 ms

Os resultados mostram que é possível incluir informação virtual em tempo real, inclusive de modelos 3D, resolvendo o problema de estimativa de pose independente da vista do observador. Apesar disso, o tempo de processamento continua sendo uma restrição desafiadora e, em algumas situações, podem ser geradas situações de não correspondência. No endereço da web <https://youtu.be/xBOJ_6HM8iI> é disponibilizado um vídeo do processo de estimativa de pose em tempo real utilizando EPnP, RANSAC e múltiplos modelos.

A solução combinada dos métodos EPnP e RANSAC pode ser usada para a criação de soluções de estimativa de pose sem uso de marcadores fiduciais. Obviamente, com o crescimento do número de equipamentos, aumenta também a necessidade de processamento para correta estimativa de pose.

5.5.1.2 Discussão

O estudo de caso apresentado mostra a utilização da arquitetura para construção de ambientes de realidade aumentada baseados em marcadores naturais georreferenciados com estimativa de pose e anotação dos equipamentos.

Além da metodologia, a construção de um ambiente de realidade aumentada depende das tecnologias disponíveis. Em alguns casos, novas técnicas são apresentadas e possibilitam a melhoria do tempo e detecção, por exemplo. É o caso da proposta apresentada em (LIMA et al., 2010), que possui semelhança em relação à solução para estimativa de pose. Porém, no trabalho mencionado, são utilizadas as técnicas disponíveis à época (SIFT e SURF), visto que fora apresentado no ano de 2010 e a técnica utilizada em nossa abordagem (ORB *features*) foi apresentada no ano seguinte, em 2011. Além dessa diferença, o trabalho mencionado não associa os marcadores naturais aos dados georreferenciados, que também é um diferencial desta tese.

A Tabela 5 mostra uma tabela comparativa entre trabalhos similares a esta tese e *frameworks* amplamente utilizados para construção de ambientes de realidade aumentada.

Tabela 5 – Comparação com diferentes metodologias *markerless* para construção de ambientes de realidade aumentada

Trabalho	GPS	Métodos de detecção baseado em <i>features</i>	Vistas detectáveis	Multi-thread
Wikitude <i>framework</i>	Sim	Proprietário	1 vista	Não
Vuforia <i>framework</i>	Sim	Proprietário	1 vista	Não
(LIMA et al., 2010)	Não	(SIFT & SURF) com estimativa de pose	3 vistas	Não
(UFKES; FIALA, 2013)	Não	ORB com estimativa de pose	1 vista	Não
Trabalho proposto	Sim	ORB com estimativa de pose	n vistas	Sim

Como pode ser visualizado, a proposta de arquitetura para construção de ambientes de realidade aumentada com base na metodologia de marcadores naturais une as características disponíveis em *frameworks* de desenvolvimento para ambientes de realidade aumentada e de trabalhos com detecção de objetos baseados em *features* de imagem. Essa união das metodologias para inclusão da informação fornece camadas de soluções para anotação da informação virtual.

A solução utilizada nesta tese para uso de ORB *features* em sistemas de realidade aumentada foi apresentada de maneira similar em (UFKES; FIALA, 2013). A principal

diferença é que nesta tese são propostas as melhorias do uso de diferentes modelos de *features* do mesmo objeto usando n vistas, além de uma abordagem *multi-thread*, visando habilitar uma estimativa de pose independente do ponto de vista do observador.

No cenário industrial, essa estratégia de inclusão de elementos 3D pode ainda ser utilizada para fins de treinamento e simulação, além da inclusão de alertas em um determinado equipamento.

5.5.2 Estudo de caso baseado em realidade virtual: metodologia semiautomática para desenvolvimento de panoramas aumentados

Além da criação de ambientes de realidade aumentada, é possível utilizar a metodologia dos marcadores naturais para a criação de ambientes baseados em panoramas aumentados. Este estudo de caso propõe a utilização da detecção apresentada como método semiautomático para anotação de equipamentos nestes panoramas. Além disso, a integração da infraestrutura de comunicação do ambiente industrial apresenta um novo formato de visualização com uso de panoramas aumentados.

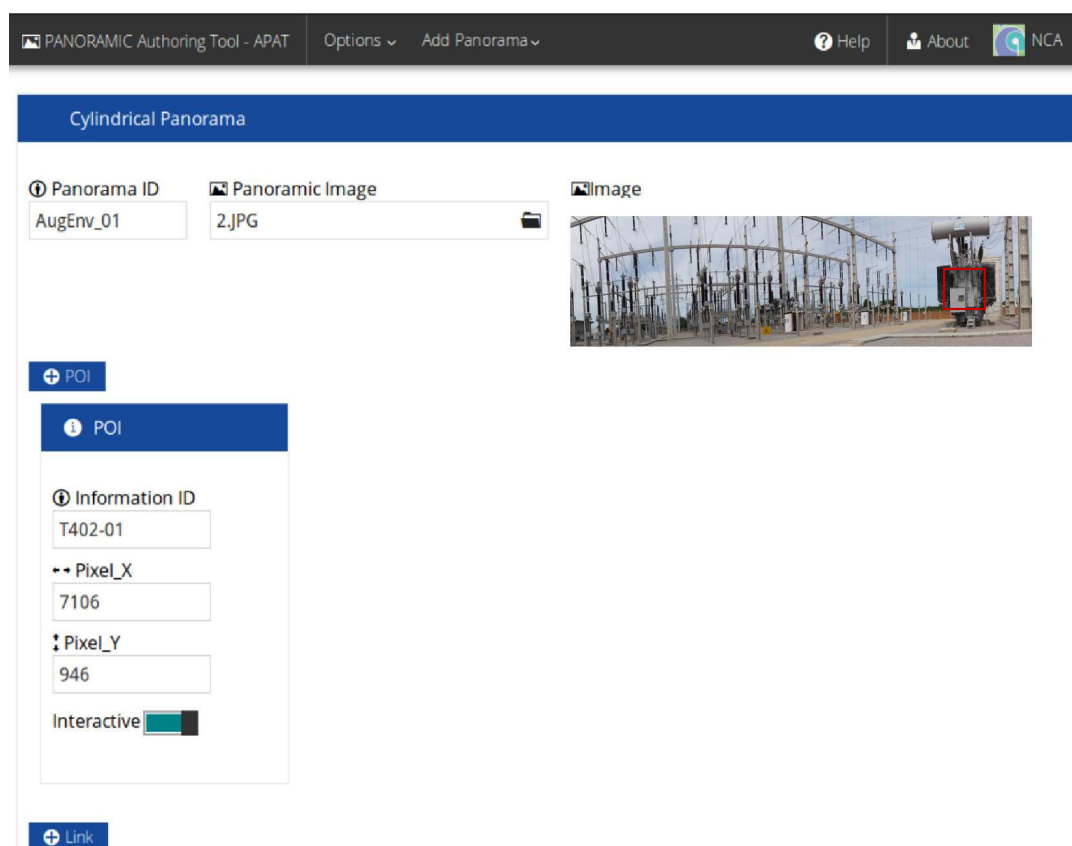
Para a etapa de visualização dos panoramas criados foi utilizada a visualização em dispositivos vestíveis, mais especificamente com HMD. O ambiente de visualização criado foi baseado na aplicação de imagens reais da subestação da CHESF em panoramas aumentados. Vale mencionar que a abordagem baseada em vídeos panorâmicos não foi testada neste trabalho, embora seja possível com a utilização dos vídeos panorâmicos aplicados como texturas aos modelos de cada tipo de panorama mencionado.

O processo de renderização da visualização em realidade virtual é implementado de tal forma que habilita o uso em diferentes dispositivos, incluindo HMD. Para a utilização da visão estereoscópica é necessário realizar a divisão das imagens para cada olho, aplicando a distorção de projeção para o tipo de óculos e lentes utilizados. Além da anotação dos objetos, os panoramas aumentados podem conter *links* de navegação entre cenários diferentes.

A ferramenta de autoria facilita a criação dos ambientes baseados em panoramas aumentados. A Figura 46 mostra a ferramenta desenvolvida, que permite a detecção dos equipamentos da imagem. O método permite a detecção de múltiplos objetos na imagem, e após a detecção, os POIs são adicionados aos objetos detectados, sendo permitido ao usuário aceitar ou alterar manualmente o posicionamento do POI para definição da TAG

do equipamento

Figura 46 – Visualização do usuário na ferramenta de autoria para criação de ambientes baseados em panoramas aumentados com detecção de transformador



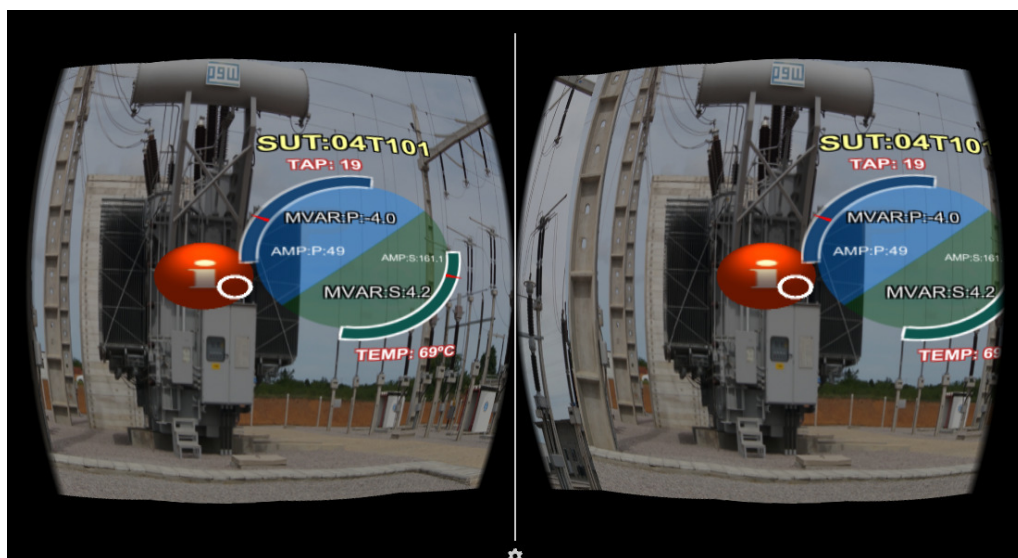
Fonte: Elaborado pelo autor

A visão estereoscópica em HMD pode ser visualizada na Figura 47. As imagens *offline* utilizadas representam o cenário real e, em casos de alterações no ambiente de operação, é necessário realizar nova aquisição de imagens panorâmicas.

Com uso de HMD, foram testados diferentes formatos de interação com objetos da cena. Os testes de interação foram motivados pelo fato de que dispositivos tradicionais de entrada como *mouse* e teclado não são adequados para navegação imersiva. Dessa forma, a interação com os objetos foi definida de acordo com o centro de visão do usuário. A Figura 48 mostra a interação do usuário e a visualização de informação sobre um disjuntor marcado manualmente na ferramenta de autoria.

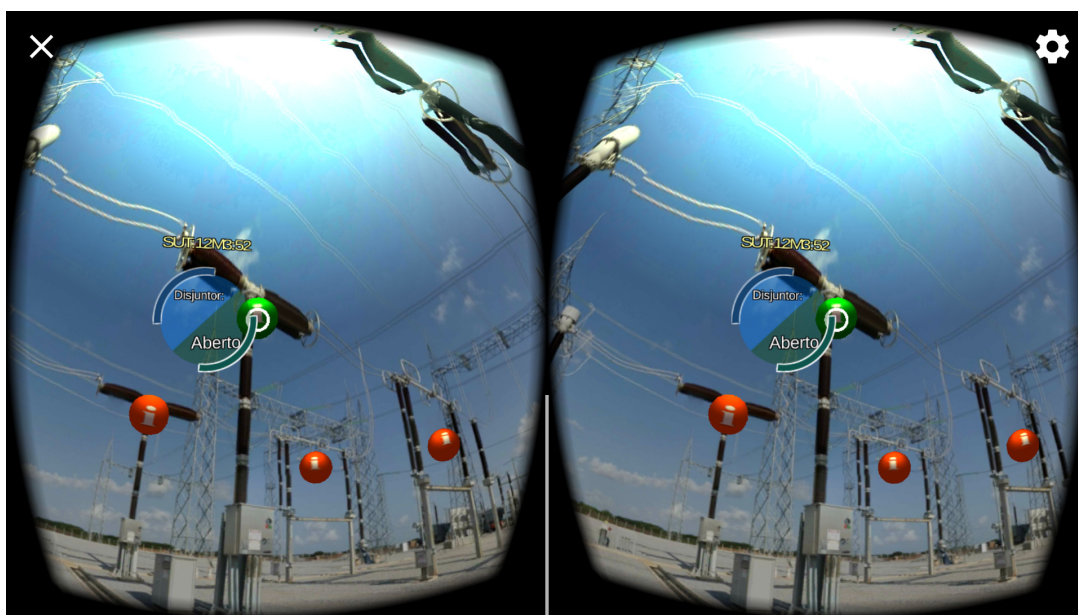
A Tabela 6 mostra os resultados de comparação entre o estudo de caso apresentado e outros trabalhos na área de realidade virtual e panoramas aumentados. De acordo com esses dados, pode-se observar que a arquitetura, juntamente com a aplicação, possuem as seguintes características: suportam o uso de realidade aumentada para monitoramento de

Figura 47 – Visualização baseada em panorama cilíndrico exibindo informação real do sistema OTS/SAGE



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 48 – Visualização de panorama esférico com interação do usuário e informação de disjuntor



Fonte: Elaborado pelo autor

eventos dinâmicos; simplificam o processo de criação de ambientes baseados em panoramas aumentados; não necessitam do uso de modelos 3D para criação dos ambientes, acelerando o processo de desenvolvimento; utilizam o conceito de marcadores naturais para auxiliar o processo inclusão de POIs; e utilizam visualização imersiva e estereoscópica.

Na sequência, aplicou-se o questionário de avaliação de usabilidade de sistemas (*Post-Study System Usability Questionnaire* - PSSUQ), para fins de validação da ferramenta

Tabela 6 – Comparação entre a arquitetura apresentada e outros trabalhos relacionados

Trabalho	RA	Ferramenta de autoria	Uso de modelo 3D	Imersividade completa	Uso de detecção para anotação
(CÔTÉ et al., 2013a)	-	-	X	X	-
(CÔTÉ et al., 2013b)	X	-	X	X	-
(CÔTÉ et al., 2013c)	X	-	X	X	-
(GAO et al., 2012)	-	-	-	-	-
(GIMENO et al., 2013a)	X	X	-	X	-
(GIMENO et al., 2013b)	X	X	-	X	-
(GUARNACCIA et al., 2012)	-	-	-	-	X
(LANGLOTZ et al., 2012)	X	-	-	X	X
(MIMAROĞLU, 2014)	X	-	-	X	-
(WU; FENG; HE, 2014)	-	-	-	-	-
Trabalho proposto	X	X	-	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor.

desenvolvida e do ambiente de visualização implementado. De acordo com (SAURO; LEWIS, 2012), o PSSUQ foi desenvolvido originalmente na IBM, e passou por algumas atualizações para incluir um número maior de itens na avaliação da reação dos usuários ao sistema utilizado.

A Tabela 7 mostra o resultado das avaliações obtidas. O questionário PSSUQ foi aplicado a 71 usuários acadêmicos (entre estudantes de graduação, mestrado e doutorado, além de pesquisadores da área de engenharia elétrica) e 6 operadores da CHESF (apresentados nas linhas sombreadas da tabela), totalizando 77 indivíduos que utilizaram a aplicação desenvolvida.

A aplicação utilizada antes do preenchimento do questionário consistia basicamente na visualização de um panorama cilíndrico e um esférico. Nestes panoramas, os usuários tinham transformadores e disjuntores com informações do sistema OTS, além da possibilidade de navegação entre os panoramas. Cada panorama representava uma subestação diferente da CHESF. Vale ressaltar que nenhuma informação de como deveria ser operada a visualização foi informada aos participantes.

Apesar do estudo de caso envolvendo os cenários de sistemas elétricos, esta proposta pode ser aplicada a cenários diferentes. É uma solução completa tanto em metodologia quanto em aplicação inovadora para criação de visualizações baseadas no conceito de panoramas aumentados.

Tabela 7 – Resultados do questionário PSSUQ administrado a 71 usuários acadêmicos (linhas brancas) e 6 operadores do sistema elétrico da CHESF (linhas sombreadas)

Questão	<i>Concordo totalmente 1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>Discordo totalmente 7</i>
1 Em geral, estou satisfeito com a facilidade de uso deste sistema	46.5%	25.4%	8.5%	7.0%	4.2%	5.6%	2.8%
	66.7%	16.7%	16.7%	0%	0%	0%	0%
2 Foi simples utilizar este sistema	70.4%	11.3%	4.2%	2.8%	1.4%	5.6%	4.2%
	50.0%	33.3%	16.7%	0%	0%	0%	0%
3 Consegui completar as tarefas e cenários rapidamente	42.3%	33.8%	8.5%	5.6%	4.2%	2.8%	2.8%
	50.0%	33.3%	16.7%	0%	0%	0%	0%
4 Eu me senti confortável ao utilizar este sistema	36.6%	25.4%	16.9%	8.5%	8.5%	2.8%	1.4%
	50.0%	16.7%	16.7%	0%	0%	0%	16.7%
5 Foi fácil aprender a usar este sistema	66.2%	15.5%	2.8%	4.2%	4.2%	4.2%	2.8%
	66.7%	16.7%	0%	0%	0%	0%	16.7%
6 Eu poderia ser mais produtivo usando um sistema deste tipo	45.1%	26.8%	11.3%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%
	83.3%	0%	0%	0%	0%	0%	16.7%
7 O sistema apresenta ajuda clara para resolver os problemas	25.4%	26.8%	23.9%	15.5%	2.8%	0%	5.6%
	33.3%	33.3%	16.7%	0%	0%	16.7%	0%
8 Quando errei no uso do sistema, pude recuperar a situação rapidamente	36.6%	29.6%	12.7%	11.3%	4.2%	4.2%	1.4%
	50.0%	16.7%	16.7%	0%	0%	16.7%	0%
9 A informação e mensagens fornecidas no sistema estavam claras	29.6%	31.0%	15.5%	11.3%	5.6%	1.4%	5.6%
	16.7%	33.3%	16.7%	16.7%	16.7%	0%	0%
10 Foi fácil encontrar a informação que eu precisava	46.5%	22.5%	7.0%	9.9%	2.8%	5.6%	5.6%
	50.0%	50.0%	0%	0%	0%	0%	0%
11 A informação foi eficaz para auxiliar a execução das tarefas e cenários	32.4%	32.4%	8.5%	15.5%	5.6%	2.8%	2.8%
	66.7%	16.7%	0%	16.7%	0%	0%	0%
12 A organização de informações na tela do sistema estavam claras	43.7%	29.6%	12.7%	2.8%	4.2%	4.2%	2.8%
	33.3%	33.3%	33.3%	0%	0%	0%	0%
13 A interface do sistema é agradável	42.3%	25.4%	15.5%	8.5%	1.4%	7.0%	0%
	50.0%	33.3%	16.7%	0%	0%	0%	0%
14 Eu gostei de usar a interface do sistema	46.5%	31.0%	5.6%	7.0%	1.4%	7.0%	1.4%
	66.7%	33.3%	0%	0%	0%	0%	0%
15 Este sistema possui as funcionalidades que eu esperava encontrar	38.0%	23.9%	16.9%	12.7%	2.8%	4.2%	1.4%
	66.7%	33.3%	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.2.1 Discussão

O estudo de caso desenvolvido com realidade virtual mostra a utilização da metodologia de marcadores naturais aplicada às ferramentas de autoria para construção de ambientes baseado em panoramas aumentados.

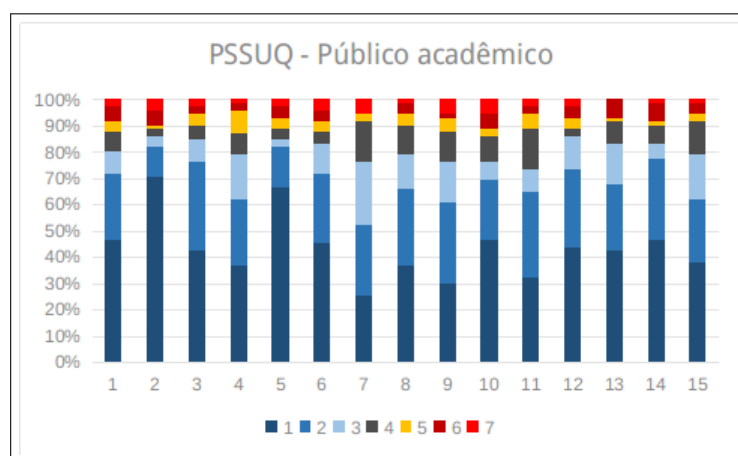
É possível salientar que em relação às arquiteturas voltadas para a construção de ambientes de realidade virtual, este trabalho apresenta uma abordagem moderna, visto que nos últimos anos é crescente a busca por uso de detecção para inclusão de anotações

e o uso de panoramas aumentados.

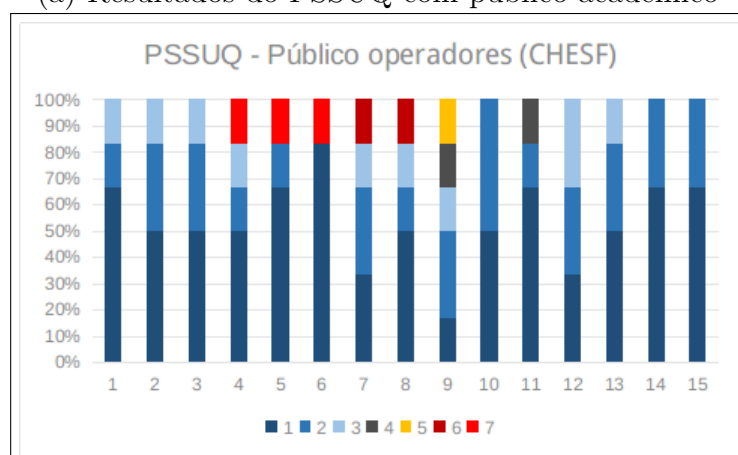
Apesar dos aspectos de melhorias em relação aos trabalhos apresentados na Tabela 6, é possível inferir, a partir dos resultados do questionário, que o sistema construído baseado em panoramas aumentados mostrou-se natural para a maioria dos usuários. Além disso, este tipo de aplicação pode ser adaptado para a visualização remota de dados de equipamentos ou ainda em simulações para treinamento de operadores.

A Figura 49 mostra uma análise gráfica dos dados da Tabela 7, de acordo com o nível de aceitação dos usuários (níveis de 1 a 7) obtido no questionário. Os resultados apontam maior concentração de respostas positivas tanto para estudantes quanto para operadores.

Figura 49 – Resultados de aplicação dos questionários



(a) Resultados do PSSUQ com público acadêmico



(b) Resultados do PSSUQ com operadores da CHESF

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se sugerir que os operadores tiveram maior facilidade no uso da aplicação em relação ao público acadêmico. Essa análise mostra que os operadores foram favorecidos

por conhecerem melhor o cenário. Por outro lado, é possível inferir que este tipo de visualização possibilita ao público acadêmico, principalmente aos estudantes de graduação, um formato de maior interatividade e um meio de visualização do cenário real de operação na área de engenharia elétrica. Dessa forma, a solução pode ser adaptada para diferentes situações e utilizada para fins de ensino.

Ademais, o tempo de desenvolvimento fica reduzido ao processo de aquisição das imagens e anotação dos equipamentos, que é mais simples comparado ao tempo de desenvolvimento envolvendo modelagem 3D, necessária para criação de ambientes tradicionais de realidade virtual.

6 CONCLUSÃO

Esta tese apresenta duas contribuições principais: a primeira, e podemos considerar a principal delas, é uma metodologia para uso de marcadores naturais para anotação em ambientes de realidade virtual e realidade aumentada. São utilizadas técnicas de processamento de imagem para detecção para anotação de equipamentos em cenários industriais. Apesar de aplicar a metodologia ao cenário de subestações de energia, esta contribuição tem aplicabilidade em outros cenários *outdoor*.

A outra contribuição é o desenvolvimento de arquiteturas para a criação de ambientes de visualização. Essas arquiteturas são usadas para criação de aplicações como estudos de caso tanto para realidade virtual como para realidade aumentada. Dessa forma, criam-se aplicações para visualização dentro do ambiente de operação das subestações de energia elétrica. As visualizações propostas nas duas abordagens integram dados de simulação dos sistemas SAGE e OTS para a adição de informações aos equipamentos.

Na abordagem específica de realidade aumentada, é proposto o conceito de marcadores naturais georreferenciados. Essa proposta de realidade aumentada utiliza informações de sensores em dispositivos móveis, proporcionando a identificação dos objetos detectados em ambientes *outdoor*. Apesar de utilizar um método de detecção clássico, o uso de *Haar-like features* com o filtro homomórfico, dados georreferenciados e sensor de compasso constitui uma solução que objetiva a melhoria no aspecto de visualização de dados nos centros de controle.

Em comparação com os trabalhos na área de estimativa de pose, que é a fase final para a inclusão de dados 3D, pode ser observado ainda que os sistemas apresentados geralmente utilizam detecção em ambientes *indoor*, que em geral são ambientes controlados e não apresentam problemas relacionados à iluminação.

Tanto na abordagem de realidade aumentada quanto de realidade virtual são apresentadas soluções inovadoras para construção de sistemas de realidade aumentada e realidade virtual com ambientes de computação móvel. No caso específico do uso de realidade virtual com imagens *offline*, a proposta possui a desvantagem da necessidade de treinamento do classificador para mudanças no ambiente. Porém, vale ressaltar que, em cenários industriais (como os sistemas elétricos), não é comum a ocorrência de mudanças no ambiente de operação. Dessa forma, após realizar o treinamento dos objetos desejados,

provavelmente não haverá necessidade de treinar o classificador novamente.

Além disso, as propostas de visualização apresentam possibilidades de inovação em diferentes aspectos. Podem-se enumerar situações de treinamento em que o operador do sistema elétrico possa visualizar dados do sistema SCADA/EMS e executar ações de manutenção ou ainda, visualizar se um determinado equipamento está desligado ou não. É possível também utilizar, no caso de realidade virtual, como solução para visualização remota de uma subestação ou ainda configurar simulações e cenários de treinamento de operadores.

Através desta pesquisa é possível afirmar que a utilização de marcadores naturais é a abordagem mais avançada na área de ambientes de realidade aumentada e produz sistemas dessa modalidade sem a necessidade de inclusão de marcadores fiduciais. Em ambientes como o cenário de subestações de energia, a solução de realidade aumentada tradicional com inclusão de marcadores fiduciais se torna inviável. As causas dessa afirmação são tanto o próprio desgaste dos marcadores fiduciais quanto a dificuldade de acesso em áreas operacionais para aplicação destes marcadores fiduciais. Dessa forma, a detecção sem uso de marcadores naturais 3D fica restrita ao lado visível do marcador fiducial, a contrário desta proposta, em que a detecção é realizada independente do ponto de vista do observador.

A abordagem de realidade aumentada apresenta ainda a aplicação da metodologia em visão estereoscópica com óculos de realidade aumentada, que possibilita através de uma interface vestível que o operador use óculos na área de operação para adicionar as informações virtuais (como os dados de um equipamento) sobrepostos ao ambiente real.

Com base nos resultados obtidos pela aplicação do questionário PSSUQ, especificamente relacionados à utilização de realidade virtual, um aspecto interessante das respostas é relacionado ao aumento de produtividade. No item “Eu poderia ser mais produtivo usando um sistema deste tipo” (questão 6 do questionário), item que possui maior relevância quando aplicado ao público dos operadores, o resultado é que apenas um dos operadores que utilizou a aplicação afirma que este tipo de sistema não aumentaria a produtividade, enquanto os outros cinco operadores concordam que a utilização de realidade virtual aumentaria a produtividade. Esse resultado nos permite inferir que a maioria dos operadores deseja utilizar as novas tecnologias disponíveis para visualização e facilitação do dia a dia do operador.

Em trabalhos futuros voltados para a área de realidade virtual, pretende-se realizar

a portabilidade da abordagem *offline* para uso de câmeras 360° e, dessa forma, testar a metodologia apresentada para realidade virtual em formato de panoramas aumentados com visualização em tempo real.

Pretende-se, também, em trabalhos voltados para a área de realidade aumentada, pretende-se aplicar a metodologia para o cenário real de uma subestação de energia, utilizando o SAGE para conexão com os dados reais dos equipamentos, além de portar a arquitetura para construção de outros ambientes industriais com utilização de realidade aumentada.

Pesquisas decorrentes desta tese envolvem diferentes aspectos utilizados nas áreas de panoramas aumentados e estimativa de pose. Em relação aos panoramas aumentados, existem abordagens baseadas em vídeos panorâmicos, como a junção de diferentes panoramas estáticos aumentados e, dessa forma, criar túneis panorâmicos para possibilitar uma navegação e interação natural do usuário com o ambiente panorâmico. Por outro lado, em relação à área de estimativa de pose, é possível buscar novas abordagens do casamento de características (*feature-matching*) para melhoria do tempo de processamento, que é crítico em aplicações de realidade aumentada.

REFERÊNCIAS

- ABABSA, F.; MALLEM, M. Robust camera pose estimation combining 2d/3d points and lines tracking. In: **2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. Brisbane, Australia: [s.n.], 2008. p. 774–779. ISSN 2163-5137.
- ALMEIDA, J. D. S. **Metodologia Computacional para Detecção e Diagnóstico Automáticos e Planejamento Cirúrgico do Estrabismo**. Tese (Doutorado) — UFMA, 2013.
- AUKSTAKALNIS, S.; BLATNER, D. **Silicon Mirage; The Art and Science of Virtual Reality**. Berkeley, CA, USA: Peachpit Press, 1992. ISBN 0938151827.
- AZEVEDO, E.; CONCI, A. **Computação gráfica: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators and virtual environments**, MIT Press, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997.
- BARATA, P. N. A.; FILHO, M. R.; NUNES, M. V. A. Consolidating learning in power systems: Virtual reality applied to the study of the operation of electric power transformers. **IEEE Transactions on Education**, IEEE, v. 58, n. 4, p. 255–261, 2015.
- BAY, H.; ESS, A.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V. Speeded-up robust features (surf). **Computer Vision and Image Understanding**, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 110, n. 3, p. 346–359, jun. 2008. ISSN 1077-3142. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>>.
- BILLINGHURST, M.; CLARK, A.; LEE, G. A survey of augmented reality. **Found. Trends Hum.-Comput. Interact.**, Now Publishers Inc., Hanover, MA, USA, v. 8, n. 2-3, p. 73–272, mar. 2015. ISSN 1551-3955. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1561/11000000049>>.
- BOWMAN, D. A.; KRUIJFF, E.; LAVIOLA, J. J.; POUPYREV, I. **3D User Interfaces: Theory and Practice**. Redwood City, CA, USA: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2004. ISBN 0201758679.
- BROWN, M.; LOWE, D. G. Automatic panoramic image stitching using invariant features. **International Journal of Computer Vision**, v. 74, n. 1, p. 59–73, 2007. ISSN 1573-1405. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11263-006-0002-3>>.
- BURGISS Jr., S. G.; GOODRIDGE, S. G. Multiframe averaging and homomorphic filtering for clarification of dark and shadowed video scenes. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Enabling Technologies for Law Enforcement**. Boston, MA, 2001. v. 4232, p. 480–488.
- CALONDER, M.; LEPETIT, V.; STRECHA, C.; FUA, P. Brief: Binary robust independent elementary features. In: _____. **Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision: Part IV**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. p. 778–792. ISBN 978-3-642-15561-1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-15561-1_56>.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. INPE-10506-RPQ/249.

CARDOSO, A.; KIRNER, C.; JÚNIOR, E. L.; KELNER, J. Tecnologias e ferramentas para o desenvolvimento de sistemas de realidade virtual e aumentada. **Editora Universitária UFPE**, p. 1–19, 2007.

CARMIGNIANI, J.; FURHT, B.; ANISETTI, M.; CERAVOLO, P.; DAMIANI, E.; IVKOVIC, M. Augmented reality technologies, systems and applications. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 51, n. 1, p. 341–377, 2011.

CARUFEL, J.-L. D.; LAGANIERE, R. Matching cylindrical panorama sequences using planar reprojections. In: **IEEE. Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on**. Barcelona, Spain, 2011. p. 320–327.

CARVALHO, F. G.; TREVISAN, D. G.; RAPOSO, A. Toward the design of transitional interfaces: an exploratory study on a semi-immersive hybrid user interface. **Virtual Reality**, v. 16, n. 4, p. 271–288, 2012. ISSN 1434-9957. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10055-011-0205-y>>.

CEPEL, E. **Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia - SAGE**. 2015. Disponível em: <<http://sage.cepel.br>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

COMPORT, A.; MARCHAND, E.; PRESSIGOUT, M.; CHAUMETTE, F. Real-time markerless tracking for augmented reality: the virtual visual servoing framework. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 12, n. 4, p. 615–628, 2006. Disponível em: <<https://hal.inria.fr/inria-00161250>>.

CORSEUIL, E. T. L.; RAPOSO, A. B.; SANTOS, I. H. F.; GATTASS, M.; PINTO, M. H. G. Buscando o uso operacional de realidade virtual em grandes modelos de engenharia. In: **VI Symposium on Virtual Reality (SVR)**. Ribeirão Preto, SP: [s.n.], 2003. p. 187–198.

CÔTÉ, S.; BARNARD, J.; SNYDER, R.; GERVAIS, R. Offline spatial panoramic video augmentation for visual communication in the aec industry. In: **Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, London**. London, UK: [s.n.], 2013. p. 82–89.

CÔTÉ, S.; TRUDEL, P.; DESBIENS, M.; GIGUÈRE, M.; SNYDER, R. Live mobile panoramic high accuracy augmented reality for engineering and construction. **Proceedings of the Construction Applications of Virtual Reality (CONVR), London, England**, 2013.

CÔTÉ, S.; TRUDEL, P.; SNYDER, R.; GERVAIS, R. An augmented reality tool for facilitating on-site interpretation of 2d construction drawings. In: **Proceedings of the Construction Applications of Virtual Reality (CONVR) conference, London, England**. London, UK: [s.n.], 2013. p. 316–323.

CRAIG, A. **Understanding Augmented Reality: Concepts and Applications**. 1st. ed. USA: Elsevier Science, 2013. ISBN 9780240824109.

CROW, F. C. Summed-area tables for texture mapping. In: **Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques**. New York, NY, USA: ACM, 1984. (SIGGRAPH '84), p. 207–212. ISBN 0-89791-138-5. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/800031.808600>>.

CROW, M. L.; SHETTY, N. **Electric Power Measurements and Variables**. Missouri, USA: Elsevier Academic Press, 2004. v. 2. 245–254 p. (Encyclopedia of Energy, v. 2). ISBN 9780121764845.

DAI, J.; ZHANG, L. F. Registered localization method-based on opencv for augmented reality. In: **2011 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR)**. Dalian, China: [s.n.], 2011. p. 492–495.

DAQRI. **DAQRI SMART HELMET**. 2016. Disponível em: <<http://hardware.daqri.com/>>. Acesso em: 08 jan. 2016.

DEMENTHON, D. F.; DAVIS, L. S. Model-based object pose in 25 lines of code. **International Journal of Computer Vision**, v. 15, n. 1, p. 123–141, 1995. ISSN 1573-1405. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01450852>>.

ENGELKE, T.; KEIL, J.; ROJTBERG, P.; WIENTAPPER, F.; SCHMITT, M.; BOCKHOLT, U. Content first: a concept for industrial augmented reality maintenance applications using mobile devices. In: ACM. **Proceedings of the 6th ACM Multimedia Systems Conference**. Adelaide, SA, Australia, 2015. p. 105–111.

EPRI. **Eletric Power Research Institute**. 2016. Disponível em: <<https://www.epri.com>>. Acesso em: 02 jun. 2014.

FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E. F. A novel cooperative protocol for distributed voltage control in active distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 28, n. 2, p. 1645–1656, 2013.

FIORENTINO, M.; UVA, A. E.; GATTULLO, M.; DEBERNARDIS, S.; MONNO, G. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. **Computers in Industry**, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 270–278, 2014.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, ACM, New York, NY, USA, v. 24, n. 6, p. 381–395, jun. 1981. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/358669.358692>>.

FORSMAN, M. **Applying Augmented Reality to Outdoors Industrial Use**. Dissertação (Mestrado) — University of Turku, April 2016.

FORSYTH, D. A.; PONCE, J. **Computer Vision: A Modern Approach**. Upper Saddle River (New Jersey): Pearson Education, 2003.

GAO, S.; CHEN, Z.; FAN, H.; PAN, J.; LIU, W.; GENG, J. Research and application of 3d panoramic technology on equipment visualization. In: IEEE. **Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on**. Hangzhou, China, 2012. v. 1, p. 562–565.

GHEISARI, M.; SABZEVAR, M. F.; CHEN, P.; IRIZARRY, J. An augmented panoramic environment to access building information on a construction site. In: ASC. **52nd Associated Schools of Construction (ASC) Annual International Conference**. Provo, UT, 2016.

GHEISARI, M.; SABZEVAR, M. F.; CHEN, P.; IRIZZARY, J. Integrating bim and panorama to create a semi-augmented-reality experience of a construction site. **International Journal of Construction Education and Research**, Taylor & Francis, v. 12, n. 4, p. 303–316, 2016.

GIMENO, J.; MORILLO, P.; ORDUÑA, J. M.; FERNÁNDEZ, M. An easy-to-use ar authoring tool for industrial applications. In: **Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Application**. [S.l.]: Springer, 2013. p. 17–32.

_____. A new ar authoring tool using depth maps for industrial procedures. **Computers in Industry**, Elsevier, v. 64, n. 9, p. 1263–1271, 2013.

GOMES JR., D.; REIS, P.; PAIVA, A.; SILVA, A.; BRAZ JR., G.; GATTASS, M.; ARAÚJO, A. An approach for construction of augmented reality systems using natural markers and mobile sensors in industrial fields. **International Journal of Computers Communications & Control**, v. 12, n. 4, p. 507–518, 2017. ISSN 1841-9836. Disponível em: <<http://www.univagora.ro/jour/index.php/ijccc/article/view/2658>>.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. 3. ed. USA: Pearson/Prentice Hall, 2008.

GPS. **GPS Accuracy - Official U.S. Government information about the Global Positioning System**. 2014. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

GRASSET, R.; LANGLLOTZ, T.; KALKOFEN, D.; TATZGERN, M.; SCHMALSTIEG, D. Image-driven view management for augmented reality browsers. In: **2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)**. Atlanta, GA, USA: [s.n.], 2012. p. 177–186.

GUARNACCIA, M.; GAMBINO, O.; PIRRONE, R.; ARDIZZONE, E. An explorable immersive panorama. In: IEEE. **2012 Sixth International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)**. Palermo, Italy, 2012. p. 130–134.

GURRIERI, L. E.; DUBOIS, E. Acquisition of omnidirectional stereoscopic images and videos of dynamic scenes: a review. **Journal of Electronic Imaging**, International Society for Optics and Photonics, v. 22, n. 3, p. 030902–030902, 2013.

HAN, S. C.; HAN, Y. H.; KIM, H. S. Characteristics and perspectives of wearable smart devices and industrial ecosystem. In: **2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)**. Hsinchu, Taiwan: [s.n.], 2014. p. 911–914. ISSN 1521-9097.

HARBOR, D. **Geology - GIS & Remote Sensing**. 2015. Disponível em: <<http://geology.wlu.edu/harbor/geol260/>>. Acesso em: 23 maio 2015.

HTC. **HTC VIVE**. 2016. Disponível em: <<http://www.htcvt.com/>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

HULETSKI, A.; KARTASHOV, D.; KRINKIN, K. Evaluation of the modern visual slam methods. In: **2015 Artificial Intelligence and Natural Language and Information Extraction, Social Media and Web Search FRUCT Conference (AINL-ISMW FRUCT)**. St. Petersburg, Russia: [s.n.], 2015. p. 19–25.

- JAFRI, R.; ALI, S. A. Exploring the potential of eyewear-based wearable display devices for use by the visually impaired. In: **2014 3rd International Conference on User Science and Engineering (i-USer)**. Shah Alam, Malaysia: [s.n.], 2014. p. 119–124.
- JIAN, Y.; XIN, W.; XUE, Z.; ZHENYOU, D. Cloud computing and visual attention based object detection for power substation surveillance robots. In: IEEE. **Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2015 IEEE 28th Canadian Conference on**. Halifax, NS, Canada, 2015. p. 337–342.
- JIANG, H.; CHEN, X.; ZHANG, S.; ZHANG, X.; KONG, W.; ZHANG, T. Software for wearable devices: Challenges and opportunities. In: **2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference**. Taichung, Taiwan: [s.n.], 2015. v. 3, p. 592–597.
- KHURANA, K.; AWASTHI, R. Techniques for object recognition in images and multi-object detection. **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)**, v. 2, 2013.
- KIM, J.; JUN, H. Implementation of image processing and augmented reality programs for smart mobile device. In: IEEE. **Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST)**. Harbin, Heilongjiang, Harbin, 2011. v. 2, p. 1070–1073.
- KREVELEN, D. W. F. van; POELMAN, R. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. **The International Journal of Virtual Reality**, v. 9, n. 2, p. 1–20, jun. 2010.
- LANGLOTZ, T.; WAGNER, D.; MULLONI, A.; SCHMALSTIEG, D. Online creation of panoramic augmented reality annotations on mobile phones. **IEEE Pervasive Computing**, v. 11, n. 2, p. 56–63, Feb 2012. ISSN 1536-1268.
- LENG, X.; LI, S.; YANG, J. Research on spherical panorama mosaic technology. **COMPREHENSIVE EVALUATION SYSTEM OF COLLEGE FOREIGN LANGUAGE CLOUD**, v. 2, n. 4, p. 227, 2014.
- LEPETIT, V.; MORENO-NOGUER, F.; FUA, P. Epnp: An accurate $O(n)$ solution to the pnp problem. **International Journal of Computer Vision**, v. 81, n. 2, p. 155, 2008. ISSN 1573-1405. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11263-008-0152-6>>.
- LI, Z.; WANG, J.; SUN, H.; GUO, Q. Transmission contingency analysis based on integrated transmission and distribution power flow in smart grid. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 6, p. 3356–3367, Nov 2015. ISSN 0885-8950.
- LIANG, M.; MIN, H.; LUO, R.; ZHU, J. Simultaneous recognition and modeling for learning 3-d object models from everyday scenes. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 45, n. 10, p. 2237–2248, Oct 2015. ISSN 2168-2267.
- LIENHART, R.; MAYDT, J. An extended set of haar-like features for rapid object detection. In: IEEE. **Proceedings. International Conference on Image Processing**. Rochester, NY, USA, 2002. v. 1, p. I–900–I–903.
- LIMA, J. P.; SIMÕES, F.; FIGUEIREDO, L.; KELNER, J. Model based markerless 3d tracking applied to augmented reality. **Journal on 3D Interactive Systems**, v. 1, 2010.

LIN, H.; SAMBAMOORTHY, S.; SHUKLA, S.; THORP, J.; MILI, L. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**. Anaheim, CA, USA, 2011. p. 1–6.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004. ISSN 1573-1405. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>>.

MAHADEV, P. M.; CHRISTIE, R. D. Envisioning power system data: concepts and a prototype system state representation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 3, p. 1084–1090, Aug 1993. ISSN 0885-8950.

_____. Envisioning power system data: vulnerability and severity representations for static security assessment. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 4, p. 1915–1920, Nov 1994. ISSN 0885-8950.

MAIDI, M.; PREDA, M.; LE, V. H. Markerless tracking for mobile augmented reality. In: **2011 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)**. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2011. p. 301–306.

MEKNI, M.; LEMIEUX, A. Augmented reality: Applications, challenges and future trends. In: **Applied Computational Science—Proceedings of the 13th International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science (ACACOS '14)**. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2014. p. 205–214.

MELO, R. H. C.; VIEIRA, E. A.; CONCI, A. A system to enhance details on partially shadowed images. In: **International workshop on systems, signals & image processing**. Chalkida Greece: [s.n.], 2004. p. 307–310.

MENDES, V. B. **Reconhecimento e detecção de posição angular de alvos em imagens digitalizadas a partir de uma única vista**. Tese (Doutorado) — Niterói (RJ): UFF, 2010.

MENG-MENG, C.; XIAO-WU, C.; YI-LI, L. Integration of 3d registration methods based on multiple natural features. In: **IEEE. 2010 International Conference on Audio Language and Image Processing (ICALIP)**. Shanghai, China, 2010. p. 1279–1283.

MICROSOFT. **Microsoft HoloLens**. 2016. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

_____. **Xbox One Kinect**. 2016. Disponível em: <<http://www.xbox.com/en-US/xbox-one/accessories/kinect>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

MIKKELSEN, C.; JOHANSSON, J.; COOPER, M. Visualization of power system data on situation overview displays. In: **IEEE. 2012 16th International Conference on Information Visualisation**. Montpellier, France, 2012. p. 188–197.

MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Transactions on Information Systems**, E77-D, n. 12, dez. 1994. Disponível em: <http://vered.rose.utoronto.ca/people/paul_dir/IEICE94/ieice.html>.

MIMAROĞLU, O. **Collaborative Augmented Reality**. Dissertação (Mestrado) — National University of Ireland, Maynooth, 2014. Disponível em: <<http://eprints.maynoothuniversity.ie/5344/1/Mimaroglu%20Onur.pdf>>.

NEE, A.; ONG, S.; CHRYSSOLOURIS, G.; MOURTZIS, D. Augmented reality applications in design and manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, Elsevier, v. 61, n. 2, p. 657–679, 2012.

NIGAM, S.; DEB, K.; KHARE, A. Moment invariants based object recognition for different pose and appearances in real scenes. In: **2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)**. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2013. p. 1–5.

NIVEDHA, S.; HEMALATHA, S. A survey on augmented reality. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 87–96, 2015.

NORMAND, J.-M.; MOREAU, G. Dof-based classification of augmented reality applications. In: **IEEE ISMAR workshop “Classifying the AR presentation space**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 2014. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 23 fev. 2014.

OPENCV. **Open Source Computer Vision Library**. 2015. Disponível em: <<http://opencv.org/>>. Acesso em: 13 jun. 2015.

_____. **OpenCV Cascade Classification**. 2015. Disponível em: <http://docs.opencv.org/2.4/modules/objdetect/doc/cascade_classification.html>. Acesso em: 13 jul. 2015.

OPENLAYERS. **OpenLayers Library**. 2015. Disponível em: <<https://openlayers.org/>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

OSHIRO, S. H.; GOLDSCHMIDT, R. R. **Processamento de Imagens**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2008.

OSSWALD, S.; WEISS, A.; TSCHELIGI, M. Designing wearable devices for the factory: Rapid contextual experience prototyping. In: **2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)**. San Diego, CA, USA: [s.n.], 2013. p. 517–521.

OVERBYE, T. J.; WEBER, J. D. New methods for the visualization of electric power system information. In: **IEEE Symposium on Information Visualization 2000. INFOVIS 2000. Proceedings**. Salt Lake City, UT, USA: [s.n.], 2000. p. 131–16c. ISSN 1522-404X.

_____. Visualization of power system data. In: IEEE. **Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences**. [S.l.], 2000. p. 7–pp.

PELEG, S.; BEN-EZRA, M. Stereo panorama with a single camera. In: IEEE. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. Fort Collins, CO, USA, 1999. v. 1, p. 401.

PROCHAZKA, D.; STENCL, M.; POPELKA, O.; STASTNY, J. Mobile augmented reality applications. **Proceedings of Mendel 2011: 17th International Conference on Soft Computing**, abs/1106.5571, p. 469–476, 2011. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1106.5571>>.

QUAN, L.; LAN, Z. Linear n-point camera pose determination. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 21, n. 8, p. 774–780, Aug 1999. ISSN 0162-8828.

REIS, P. R. J. dos; GOMES JR., D. L.; ARAÚJO, A. S.; BRAZ JR., G.; SILVA, A. C.; PAIVA, A. C. Visualization of power systems based on panoramic augmented environments. In: _____. **Augmented and Virtual Reality: First International Conference, AVR 2014, Lecce, Italy, September 17-20, 2014, Revised Selected Papers**. Cham: Springer International Publishing, 2014. (Lecture Notes in Computer Science, v. 8853), cap. Augmented & Mixed Reality, p. 175–184. ISBN 978-3-319-13969-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13969-2_14>.

RIBEIRO, T. R.; REIS, P. R. J. dos; JR, G. B.; PAIVA, A. C. de; SILVA, A. C.; MAIA, I. M. O.; ARAÚJO, A. S. Agito: Virtual reality environment for power systems substations operators training. In: _____. **Augmented and Virtual Reality: First International Conference, AVR 2014, Lecce, Italy, September 17-20, 2014, Revised Selected Papers**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 113–123. ISBN 978-3-319-13969-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-13969-2_9>.

ROMERO, G.; MAROTO, J.; FÉLEZ, J.; CABANELLAS, J.; MARTÍNEZ, M.; CARRETERO, A. Virtual reality applied to a full simulator of electrical sub-stations. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 3, p. 409 – 417, 2008. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960700065X>>.

ROSTEN, E.; DRUMMOND, T. Machine learning for high-speed corner detection. In: _____. **Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision - Volume Part I**. Graz, Austria: Springer Berlin Heidelberg, 2006. (ECCV'06), p. 430–443. ISBN 978-3-540-33833-8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/11744023_34>.

RUBIO, M.; QUIRÓS, R.; PULIDO, E.; FABREGAT, G.; HUERTA, J. Annotation of features in outdoor augmented reality environments. In: **7th Conference on Geographic Information Science**. Heraklion, Greece: [s.n.], 2004. p. 243–250.

RUBLEE, E.; RABAUD, V.; KONOLIGE, K.; BRADSKI, G. Orb: An efficient alternative to sift or surf. In: **Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision**. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2011. (ICCV '11), p. 2564–2571. ISBN 978-1-4577-1101-5. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>>.

RUSSO, E. E. R.; RAPOSO, A. B.; FERNANDO, T.; GATTASS, M. **Emergency Environments for the Oil & Gas Exploration and Production Industry**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SAMSUNG. **Gear VR**. 2015. Disponível em: <<http://www.samsung.com/global/galaxy/gear-vr/>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

SAURO, J.; LEWIS, J. R. Quantifying the user experience: Practical statistics for user research. In: _____. USA: Elsevier, 2012. p. 192–198.

SCHWEGMANN, C. P.; KLEYNHANS, W.; SALMON, B. P. Ship detection in south african oceans using sar, cfar and a haar-like feature classifier. In: **2014 IEEE**

Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC, Canada: [s.n.], 2014. p. 557–560. ISSN 2153-6996.

SHUM, H.-Y.; SZELISKI, R. Systems and experiment paper: Construction of panoramic image mosaics with global and local alignment. **International Journal of Computer Vision**, Springer, v. 36, n. 2, p. 101–130, 2000.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 1. ed. London: Springer, 2011.

SZELISKI, R.; SHUM, H.-Y. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. In: ACM PRESS/ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO. **Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques**. New York, NY, 1997. p. 251–258.

UFKES, A.; FIALA, M. A markerless augmented reality system for mobile devices. In: **2013 International Conference on Computer and Robot Vision**. Regina, SK, Canada: [s.n.], 2013. p. 226–233.

UNITY. **Unity3D**. 2015. Disponível em: <<http://unity3d.com>>. Acesso em: 13 mar. 2014.

USP-LDSV. **Laboratório de Dinâmica e Simulação Veicular**. 2016. Disponível em: <http://www.usp.br/ldsv/?page_id=92>. Acesso em: 07 jan. 2016.

VIOLA, P.; JONES, M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In: IEEE. **Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)**. Kauai, HI, USA, 2001. v. 1, p. I–511.

WANG, X.; KIM, M. J.; LOVE, P. E.; KANG, S.-C. Augmented reality in built environment: Classification and implications for future research. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 32, p. 1–13, 2013.

WEBER, J. D.; OVERBYE, T. J. Voltage contours for power system visualization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 1, p. 404–409, Feb 2000. ISSN 0885-8950.

WIEGMANN, D. A.; OVERBYE, T. J.; HOPPE, S. M.; ESSENBERG, G. R.; SUN, Y. Human factors aspects of three-dimensional visualization of power system information. In: IEEE. **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. Montreal, Que., Canada, 2006. p. 7.

WIKITUDE. **Wikitude Osmino**. 2015. Disponível em: <<https://www.wikitude.com/>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

WITHER, J.; DIVERDI, S.; HÖLLERER, T. Annotation in outdoor augmented reality. **Computers & Graphics**, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 679–689, 2009.

WU, L.-h.; FENG, J.-P.; HE, S.-q. Construction and implementation of the three-dimensional virtual panoramic roaming system of hainan ecotourism. In: **Ecosystem Assessment and Fuzzy Systems Management**. [S.l.]: Springer, 2014. p. 339–351.

XU, Y.; ZHOU, Q.; GONG, L.; ZHU, M.; DING, X.; TENG, R. K. High-speed simultaneous image distortion correction transformations for a multicamera cylindrical panorama real-time video system using fpga. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, IEEE, v. 24, n. 6, p. 1061–1069, June 2014. ISSN 1051-8215.

YUAN, M.; ONG, S.-K.; NEE, A. Y. Registration using natural features for augmented reality systems. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, IEEE, v. 12, n. 4, p. 569–580, 2006.