

Um framework baseado em Realidade Aumentada como apoio a atividades de manutenção em campo

An Augmented Reality based framework that aids maintenance field activities

Un framework basado en Realidad Aumentada para apoyar las actividades de mantenimiento de campo

Recebido: 04/09/2022 | Revisado: 26/09/2022 | Aceitado: 28/09/2022 | Publicado: 06/10/2022

Giuliano Ferreira Dela Coleta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9698-2971>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: giuliano.coleta@ufu.br

Alexandre Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2023-9647>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: alexandre@ufu.br

Edgard Afonso Lamounier Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6293-9521>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: lamounier@ufu.br

Gérson Flávio Mendes de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4195-4030>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: gersonlima@ieee.org

Mateus Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2636-5871>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: mateus.fernandes@ufu.br

Resumo

Nos últimos anos, uma variedade enorme de aplicações baseadas em Realidade Aumentada (RA) foi desenvolvida para uso em dispositivos móveis. Esta tecnologia tem sido procurada também pelas empresas, que visam obter diminuição de custos em diversas atividades, como, por exemplo, tarefas de manutenção. Avaliando-se publicações e aplicações comerciais relacionadas a este tema em específico, percebem-se algumas iniciativas que integram tecnologias, sem explorar todos os seus benefícios. O objetivo deste trabalho é a construção de um framework baseado em Realidade Aumentada, dados georreferenciados e reconhecimento de imagens em dispositivos móveis, de forma a possibilitar que um usuário receba a identificação de um objeto desejado diretamente na tela de seu smartphone, bem como informações adicionais que auxiliem suas tarefas de interação com o objeto. Uma revisão sistemática foi executada, com o objetivo de confrontar abordagens já implementadas que pudessem contribuir para o desenvolvimento da solução. Também foram efetuados testes em uma aplicação comercial, e avaliados estudos de caso relacionados a este tema. O framework proposto foi então desenvolvido e validado por uma prova de conceito, aplicando o sistema em atividades de manutenção executadas por técnicos de campo de uma empresa de Telecomunicações. O reconhecimento de imagens funcionou de forma adequada, ocorrendo a correta identificação do objeto georreferenciado e exibindo a informação solicitada através de RA. Verificou-se, assim, que a aplicação proposta é válida para utilização em tarefas de manutenção em campo e pode trazer redução do tempo médio de manutenção e maior precisão das informações necessárias ao trabalho dos técnicos.

Palavras-chave: Realidade aumentada; Telecomunicações; Fibra óptica; Manutenção.

Abstract

In recent years, a huge variety of Augmented Reality (AR)-based applications have been developed for use on mobile devices. This technology has also been sought by companies, which have envisioned the possibility of obtaining cost savings in several activities, such as maintenance tasks. By evaluating publications and commercial applications related to this specific topic, some initiatives that integrate some technologies are perceived, without exploring all possible benefits. The objective of this work is the implementation of a new framework based on augmented reality, geographical data and image recognition on mobile devices, in order to allow a user to receive the identification of a desired object directly on the screen of his smartphone, as well as additional information to assist his tasks of interacting with an object. A systematic review was carried out to compare approaches already implemented that

could contribute to the development of the solution. Tests were also carried out in a commercial application, and case studies related to this theme were evaluated. The framework proposal was then developed and validated by a proof of concept, applying the system to maintenance activities performed by field technicians working for a Telecommunications company. The image recognition worked properly, with the correct identification of the georeferenced object and displaying the requested information through AR. It was verified, therefore, that the proposed application is valid for use in maintenance tasks in the field and can reduce the average maintenance time of each customer and provide greater accuracy of the information used by the technicians.

Keywords: Augmented reality; Telecommunications; Fiber optics; Maintenance.

Resumen

En los últimos años se han desarrollado una gran variedad de aplicaciones basadas en Realidad Aumentada (RA) para uso en dispositivos móviles. Esta tecnología también ha sido buscada por empresas, que pretenden obtener ahorro de costos en diversas actividades, como las tareas de mantenimiento. Evaluando publicaciones y aplicaciones comerciales relacionadas con este tema, se observan algunas iniciativas que integran algunas tecnologías, pero sin explorar todos los posibles beneficios. El objetivo de este trabajo es la implementación de un framework basado en realidad aumentada, datos georreferenciados y reconocimiento de imágenes en dispositivos móviles, para que un usuario reciba la identificación de un objeto deseado directamente en la pantalla de su smartphone, así como información adicional. que ayuden a tus tareas de interacción con el objeto. Se realizó una revisión sistemática, con el objetivo de comparar enfoques ya implementados que podrían contribuir al desarrollo de la solución. También se realizaron pruebas en una aplicación comercial y se evaluaron casos prácticos relacionados con este tema. El framework propuesto fue luego desarrollado y validado mediante una prueba de concepto, aplicando el sistema en actividades de mantenimiento realizadas por técnicos de campo de una empresa de Telecomunicaciones. El reconocimiento de imágenes funcionó correctamente, con la correcta identificación del objeto georreferenciado y mostrando la información solicitada a través de AR. Se verificó que la aplicación propuesta es válida para uso en tareas de mantenimiento de campo y puede traer una reducción en el tiempo promedio de mantenimiento y mayor precisión de las informaciones necesarias para los técnicos.

Palabras clave: Realidad aumentada; Telecomunicaciones; Fibra óptica; Mantenimiento.

1. Introdução

Aplicações baseadas em Realidade Aumentada (RA) vêm ganhando cada vez mais espaço e popularidade no mercado. Existem grandes possibilidades de atendimento a necessidades por meio de aplicativos baseados em Realidade Aumentada. A rápida proliferação dos smartphones provê uma possibilidade de atendimento a milhões de usuários. Nos últimos anos, as aplicações de Realidade Aumentada expandiram-se a inúmeros campos de aplicação (Gallala et al., 2019). Além da popularização dos smartphones, outro responsável por este efeito é a facilidade de desenvolvimento de aplicativos para os dispositivos móveis (Bottani et al., 2019).

Um exemplo de benefício desta abordagem é observado em atividades de treinamento, em que os alunos atingem melhores resultados e demonstram maiores níveis de motivação, atenção e confiança em aprender se for utilizada tecnologia de Realidade Aumentada (Chiang et al., 2014). Além disso, verifica-se que o uso da RA permite maior velocidade na transferência de conhecimento (Ramirez et al., 2013). Pela Realidade Aumentada, os educadores obtêm acesso a uma poderosa ferramenta para (1) engajar, estimular e motivar os alunos a explorar os assuntos da aula de diferentes perspectivas (Kerawalla et al. 2006), (2) facilitar o ensino de assuntos aos quais os estudantes provavelmente não terão acesso no mundo real (por exemplo, astronomia, geografia, história) (Shelton & Hedley, 2002), (3) melhorar a colaboração entre professor e aluno (Billinghurst, 2002), (4) ajudar a alavancar a imaginação e criatividade (Klopfer & Yoon, 2004) e (5) permitir aos estudantes controlar o ritmo e direção de seu aprendizado (Hamilton & Olenewa, 2011).

Avaliando de forma mais específica uma modalidade de ensino que é o treinamento corporativo, verifica-se que em diversas aplicações o auxílio de um aplicativo aumenta a efetividade e diminui o risco inerente a algumas atividades de ensino e manutenção que seriam feitas em campo (Alavikia et al., 2019). Os smartphones oferecem ao trabalhador de campo possibilidades de criar, acessar, processar, armazenar e comunicar informações sem restrições relacionadas a um determinado local físico (Aleksy et al., 2014).

Com relação às atividades de instalação e manutenção, distintos estudos demonstram benefícios em se utilizar a Realidade Aumentada como auxílio para o técnico em campo, seja no campo de engenharia de telecomunicações (Ogushi, 2013), atividades de manutenção de uma concessionária de energia elétrica (Cordonnier et al., 2017; Alavikia et al., 2019) ou na construção civil (Olbrich et al., 2013; Lamberti et al., 2014) e sugerem continuidade do desenvolvimento de facilidades adicionais para aumentar a eficiência dos trabalhos realizados, e diminuir a incidência de erros.

As atividades industriais assistidas por Realidade Aumentada podem trazer ganho geral de performance, reduzindo erros e o tempo necessário para as tarefas (Quint et al., 2017), como por exemplo em um estudo que demonstrou redução de 30% do tempo necessário para a fabricação de uma estrutura de asa de avião, quando os trabalhadores estavam equipados com tablets (Ceruti et al., 2019). Além do ganho de tempo e performance, outros benefícios da utilização da RA nas atividades industriais envolvem: reduzir a probabilidade de falhas, atualizar o trabalhador sobre condições do ambiente, diminuir a utilização de papéis e aumentar o nível de segurança (Martinetti et al., 2017).

É fundamental, no entanto, considerar aspectos de percepção do usuário, ergonomia e usabilidade das aplicações (Del Amo et al., 2018). Um ponto de atenção especial diz respeito à visualização da informação, ou seja, a forma como as informações serão apresentadas ao usuário, de forma a maximizar a cognição (Cardoso, 2019). Outros desafios incluem dificuldades do usuário por falta de concentração ou fadiga, baixa velocidade de transmissão de dados, ou custo das aplicações (Masood & Egger, 2019).

Analisando-se as aplicações de Realidade Aumentada na indústria, diversas opções são apresentadas (Alavikia & Shabro, 2019):

a) Transferência de conhecimento: A RA pode ser usada para registrar observações e formas de trabalho de empregados mais experientes, de tal modo que os registros podem ser posteriormente acessados por trabalhadores mais jovens e sem experiência;

b) Treinamento: O aprendizado pode ser facilitado através de aplicações de RA, que trazem informações adicionais sobre o equipamento objeto de estudo;

c) Logística: A RA pode auxiliar os trabalhadores a gerenciar o inventário, trazendo informações de procedimentos corretos para armazenagem e retirada de itens do estoque;

d) Inspeção de ativos: Considerada uma das aplicações mais práticas de RA na indústria, por permitir redução do tempo necessário para cada inspeção;

e) Assistência remota: Através da RA, um técnico em campo que está, por exemplo, realizando atividades de manutenção em um equipamento, pode tirar suas dúvidas com um especialista remoto. Este tipo de apoio é mais efetivo do que uma chamada de voz tradicional;

f) Localização de ativos: A RA permite aos funcionários saber a posição geográfica precisa de um ativo, de forma que podem se deslocar até ele com facilidade e rapidez. Esta abordagem substitui os tradicionais mapas impressos, que acompanham os técnicos ainda nos dias de hoje;

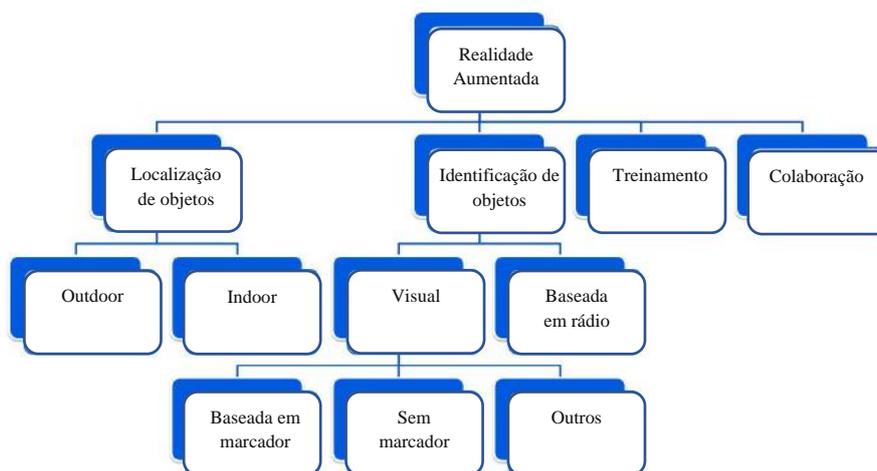
g) Visualização de equipamentos e estrutura: Informações históricas relacionadas aos ativos podem ser apresentadas ao trabalhador, como por exemplo: localização, comandos relacionados ao ativo, conexões, histórico de inspeções e condições estruturais;

h) Visualização de ativos ocultos: Muitos ativos em diversas indústrias (ex: Telecomunicações, Energia elétrica), estão em locais não visíveis diretamente, por exemplo enterrados. Para facilitar a localização destes elementos, os técnicos recorrem a mapas e informações tácitas de sua experiência, o que não confere ao processo a precisão necessária. Usando RA, a localização de ativos ocultos é facilitada;

i) Consciência da situação (*situational awareness*): o nível de consciência de um empregado é aumentado através da exibição de informações de equipamentos no local onde ele se encontra.

Uma outra forma de categorização de aplicações de Realidade Aumentada é apresentada por Aleksy et al. (2014), mostrada na Figura 1.

Figura 1. Categorias de aplicações de Realidade Aumentada na indústria.



Fonte: Adaptado de Aleksy et al. (2014).

A Figura 1 lista quatro categorias principais de aplicações de Realidade Aumentada na indústria, cada uma podendo ter mais de uma modalidade. A aplicação que possui relação direta com este trabalho é a de identificação de objetos, da forma visual.

As indústrias em que a Realidade Aumentada vem provando seu potencial incluem, dentre outras: automotiva, aviação e manufaturas, nos campos de manutenção, treinamento, montagem e design de produtos (Bottani et al., 2019).

A adoção de tecnologias de Realidade Aumentada no suporte a atividades de manutenção de técnicos é certamente um cenário de aplicações considerado um caso de sucesso da aplicação de Realidade Aumentada (Aleksy et al., 2014); (Oliveira et al., 2013). A visualização das informações é mais eficiente com a Realidade Aumentada em aplicações como localização de ativos (por exemplo, equipamentos de transmissão de uma rede de telecomunicações, que se encontram dispersos pela rede, fixados em postes de iluminação pública) e assistência remota, com relação a outras tecnologias (Gattullo et al., 2017). Estudos da utilização da RA em atividades de manutenção mostram resultados promissores com relação ao aumento da performance dos técnicos na execução de suas tarefas, com maior gestão de operações e suporte à tomada de decisão (Palmarini et al., 2018).

A pesquisa realizada neste trabalho mostra que há possibilidade de contribuição na forma de um framework, que traz inovações com relação ao que está disponível. O framework desenvolvido utiliza Realidade Aumentada para exibir ao usuário (técnico) informações relacionadas ao equipamento objeto da manutenção, sem necessidade de utilização de marcadores, com integração com um banco de dados de ativos, visão computacional e relacionamento com coordenadas geográficas.

Conforme será melhor explorado adiante, os trabalhos correlatos avaliados não apresentam solução inovadora que enderece de forma simples o apoio a atividades de manutenção em ativos localizados em ambiente outdoor, referenciados geograficamente em um banco de dados legado, com opção de permitir ao técnico atualização das informações após suas tarefas de manutenção.

2. Metodologia

Inicialmente, foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática, buscando publicações relacionadas à utilização de Realidade Aumentada como apoio a tarefas de manutenção. Ao final do processo, chegou-se a cinco artigos de referência, relacionados de forma mais próxima com a aplicação proposta: Bergenti et al. (2014), Cordonnier et al. (2017), Ogushi et al. (2013), Ortega et al. (2019) e Zhang et al. (2016). Também foram avaliadas aplicações comerciais, com objetivo de identificar lacunas e oportunidades de melhorias das funcionalidades relacionadas com o escopo deste trabalho, bem como comprovar o caráter de ineditismo.

Com o término das etapas de Revisão Bibliográfica Sistemática e estudo de aplicações comerciais existentes, o design da solução proposta foi refinado e passou-se à etapa de Implementação da aplicação. Esta consiste na utilização de Realidade Aumentada fundamentada no framework proposto, de forma a disponibilizar aos técnicos de campo informações relevantes para a realização de suas tarefas diárias. Também foi necessário implementar um sistema de reconhecimento de imagens, e integração com informações de coordenadas geográficas, de forma a aumentar a confiabilidade e precisão do aplicativo. Por fim, uma funcionalidade de feedback foi implementada, para permitir ao usuário alterar informações do banco de dados utilizados, como será demonstrado adiante.

2.1 Revisão Bibliográfica Sistemática

A pergunta foi definida como "Quais são os aplicativos mais comuns criados com o objetivo de trabalhar com Realidade Aumentada, envolvendo localização e visão computacional de dispositivos móveis, para tarefas de manutenção?"

Esta questão teve como objetivo determinar a quantidade de publicações abordando o assunto desejado, bem como questões e preocupações comuns relacionadas a ele.

As pesquisas consideraram apenas artigos publicados entre 2010 e 2020 e em inglês. Foram incluídas quatro bases de dados: IEEE Xplore, Science Direct, Google Acadêmico e ACM Digital Library. As seguintes frases foram usadas como parâmetros durante a fase de busca: "augmented reality" AND "field services"; "augmented reality" AND "power line" AND "recognition"; "augmented reality" AND "equipment" OR "maintenance management" OR "facility management"; "augmented reality" AND "outdoor" AND "technician" AND "GPS"; "augmented reality" AND "field work" AND "engineering". A pesquisa inicial retornou um total de 1.122 artigos.

Com o objetivo de otimizar o processo, foram realizadas cinco etapas de filtragem. Eles estão listados na Tabela 1, bem como o número de artigos restantes após cada processo de filtragem, também mostrado na Figura 2.

Tabela 1. Quantidade de publicações após cada estágio.

Estágio de filtro	1	2	3	4	5
Número de publicações	821	527	209	98	25

Fonte: Autores.

A Tabela 1 lista os cinco estágios aplicados, que foram os seguintes:

Estágio 1. Filtragem de texto pelo software Mendeley®: "Realidade Aumentada"

Estágio 2. Filtragem de texto pelo software Mendeley®: "Visão"

Estágio 3. Filtragem de texto pelo software Mendeley®: "GPS"

Estágio 4. Leitura do Título, resumo, introdução e conclusão

Estágio 5. Leitura de texto completo

Figura 2. Ilustração dos cinco estágios de filtragem.



Fonte: Autores.

Como pode-se verificar na Figura 2, a quantidade final de publicações após o terceiro estágio (filtros de texto) foi de um total de 209 artigos.

A quarta etapa mencionada consistiu na leitura dessas quatro seções de todas as 209 publicações, descartando aquelas que não atendiam aos critérios desejados, como: a) publicações que apresentaram qualquer tipo de experimento bem-sucedido que utilizasse o reconhecimento de imagem em um dispositivo móvel; e b) publicações que fizeram realmente uso da Realidade Aumentada. Somente as publicações que não atenderam aos critérios foram descartadas. No caso de dúvida se uma publicação atendeu aos critérios, lendo estas quatro seções, ela não foi descartada. Como resultado dessa etapa, 98 publicações foram deixadas para a fase seguinte e final.

Nesse ponto, todas as publicações foram lidas, com o objetivo de determinar se elas atendiam aos critérios estabelecidos. Apenas 25 publicações passaram nesta etapa. Considerando apenas os artigos que abordaram problemas relacionados a tarefas de treinamento ou manutenção, restaram 16 das 25 publicações listadas.

Como o principal objetivo desta revisão sistemática envolvia avaliar aplicativos diretamente relacionados à manutenção de ativos, um último filtro pode ser aplicado, considerando apenas as publicações que tratam de atividades de manutenção em campo, o que levou a três artigos, publicados por Ogushi et al. (2013), Bergenti et al. (2014) e Cordonnier et al. (2017).

Posteriormente, foram encontradas duas Revisões Sistemáticas com o foco em utilização de RA em rotinas de manutenção, publicadas por Palmarini et al. (2018) e Cardoso et al. (2020). Avaliando as referências bibliográficas destas duas publicações e outras publicações que as citaram, foram encontrados mais dois artigos relacionados à manutenção de ativos, publicados por Zhang et al. (2016) e Ortega et al. (2019), que foram incluídos na relação de artigos de referência.

As cinco publicações consideradas como sendo de referência são confrontadas no Quadro 1.

Quadro 1. Abordagens dos autores dos artigos de referência

Funcionalidade da aplicação	Bergenti et al. (2014)	Cordonnier et al. (2017)	Ogushi et al. (2013)	Ortega et al. (2019)	Zhang et al. (2016)
Utilização do GPS embarcado no dispositivo		X		X	X
Emprego de tecnologia de Realidade Aumentada	X	X	X	X	X
Utilização de algum tipo de visão computacional	X	X	X	X	X
Uso de marcadores	X		X		
Funcionalidade de feedback ao usuário					
Adequação da base de dados existente	X	X	X	X	X
Conexão a uma base de dados sem adequações					

Fonte: Autores.

O Quadro 1 compara sete características analisadas para cada um dos autores. Pode-se verificar que não há muitas publicações disponíveis que realmente abordem o uso de Realidade Aumentada para atividades de manutenção em ativos. Assim, considerou-se necessário buscar aplicações comerciais relacionadas ao tema, de forma a expandir a pesquisa.

2.2 Avaliação de aplicações comerciais

Por meio de entrevistas com profissionais que trabalham com aplicações que utilizam georreferenciamento e pesquisas de estudos de caso na Internet, foram identificadas cinco aplicações que apresentam algum grau de semelhança com a aplicação objeto deste trabalho, listadas no Quadro 2.

Quadro 2. Abordagens dos correlatos comerciais.

Funcionalidade da aplicação	CEPC	TechSee	General Electric	AuGeo®	ENEL
Utilização do GPS embarcado no dispositivo	X			X	X
Emprego de tecnologia de Realidade Aumentada		X	X	X	X
Utilização de algum tipo de visão computacional			X		X
Uso de marcadores					
Funcionalidade de feedback ao usuário	X	X			
Adequação da base de dados existente	X			X	X
Conexão a uma base de dados sem adequações			X		

Fonte: Autores.

O Quadro 2 compara as mesmas sete características avaliadas nas publicações dos artigos de referência, desta vez para o contexto de correlatos comerciais.

Após a análise comparativa das publicações e dos correlatos comerciais, conclui-se que a proposta apresentada traz características de inovação, listadas a seguir:

a) O sistema não faz uso de marcadores, como o proposto por exemplo por Ogushi (OGUSHI et al, 2013). Os ativos são identificados através da sua posição geográfica, e um algoritmo de visão computacional foi implementado para apontar a localização exata do ativo;

b) A aplicação é exclusivamente de uso outdoor (e não indoor, como em Bergenti (Bergenti et al, 2014). e Ogushi (Ogushi et al., 2013);

c) A aplicação é capaz de reconhecer e buscar informações relevantes de cada um dos milhares de ativos disponíveis, ao invés de um único equipamento, como em Bergenti (BERGENTI et al., 2014) e Ogushi (Ogushi et al., 2013), de forma que o georreferenciamento é fundamental nesta abordagem;

d) O sistema não depende de um mapeamento prévio da rede com criação de um novo cadastro de ativos, como no caso da proposta da empresa ENEL e nas aplicações descritas pelos cinco autores de referência. O sistema legado da empresa é consultado em tempo real para a busca e apresentação das informações dos ativos por meio de realidade aumentada;

e) Foi implementada uma opção que permita atualização de informações de cadastro diretamente pelo técnico, ao perceber algum erro nas informações apresentadas, ou cadastro incompleto de algum equipamento, através de uma interface simples e intuitiva. Assim que o técnico realizar a atualização de algum dado, a mesma estará disponível para consulta pelos demais técnicos e também pela equipe de *backoffice* da empresa;

f) O sistema faz uso da modalidade híbrida de *tracking*, diferentemente por exemplo de Zhang (Zhang et al., 2016) que implementou uma versão da aplicação usando visão computacional, e outra usando informações de sensores, mas não combinou as duas informações.

A proposta apresentada também é diferente dos correlatos comerciais encontrados, nos seguintes pontos:

a) O sistema implementado pela empresa CEPC utiliza informações de GPS para orientar os técnicos sobre direções e rotas, em um sistema integrado com a base de dados dos ativos da empresa (sistema GIS) de forma que auxilie os técnicos em seus trabalhos, mas nenhuma modalidade de visão computacional ou Realidade Aumentada foram aplicadas. Ademais, um novo mapa digital foi criado exclusivamente para esta aplicação;

b) A solução comercializada pela empresa TECHSEE se resume a um compartilhamento de vídeo entre um técnico e um especialista remoto. Este auxilia o técnico exibindo informações na tela de seu dispositivo móvel para guiá-lo em suas tarefas de manutenção. Nenhuma informação geográfica é usada, e tampouco visão computacional

c) O caso da General Electric relata uma aplicação com visão computacional e Realidade Aumentada. Um diferencial deste sistema é que ele se integra com a base de dados legada (já existente) da empresa, sem necessidade de adaptação ou criação de novos mapas ou informações de equipamentos. No entanto, não há utilização de informações geográficas, e tampouco existe opção de interação pelo usuário no sentido de digitar informações (feedback);

d) O aplicativo AuGeo® permite com facilidade a entrada de dados pelo site da aplicação, para posterior visualização da posição geográfica dos elementos através de Realidade Aumentada, em dispositivos móveis. Como lacunas destacam-se a falta de um módulo de visão computacional e a necessidade de se entrar com os dados, não havendo integração com uma base de dados já existente e sediada em um servidor.

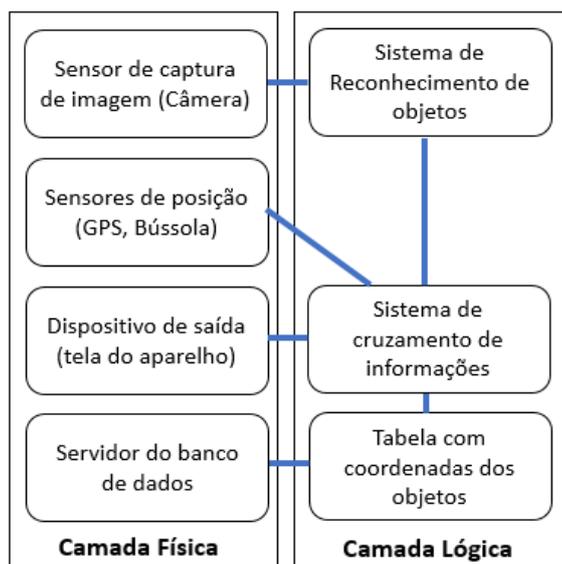
e) O protótipo em desenvolvimento da empresa ENEL se assemelha ao que se pretende desenvolver neste trabalho. São utilizadas coordenadas geográficas, visão computacional (para identificação visual dos ativos da empresa) e Realidade Aumentada. No entanto, o estágio inicial deste desenvolvimento prevê o mapeamento de todos os ativos e criação de um novo banco de dados. Não foi relatada funcionalidade de feedback. Vale lembrar que o projeto foi iniciado em outubro de 2019 e deve ter duração de 3 anos.

2.3 Arquitetura conceitual do sistema

A proposta deste trabalho é o estabelecimento de um framework que integre Realidade Aumentada, coordenadas obtidas a partir do GPS do dispositivo móvel, uma conexão com uma base de dados já existente de uma empresa, e visão computacional, para auxiliar tarefas de manutenção de técnicos que trabalham em campo, percorrendo dezenas de ativos da empresa por dia, dispersos geograficamente.

Na utilização da aplicação fundamentada no framework proposto, o usuário captura uma imagem do objeto desejado usando a câmera de seu dispositivo móvel. O objeto desejado, que aparece na imagem, é reconhecido por meio de visão computacional. O sistema consulta dados de GPS e um banco de dados remoto de equipamentos, busca informações relevantes e as apresenta na tela do dispositivo móvel, usando Realidade Aumentada. O sistema permite, ainda, que o usuário entre com informações diretamente na aplicação, por exemplo para informar uma nota relacionada ao uso do sistema, ou para informar um erro relacionado à identificação do objeto ou às informações mostradas (opção de feedback). A Figura 3 lista os elementos da arquitetura do sistema implementado.

Figura 3. Arquitetura de blocos do sistema.



Fonte: Autores.

Na Figura 3, os elementos da arquitetura implementada são agrupados em camada física (sensores, equipamentos e dispositivos) e camada lógica (algoritmos e tabelas utilizados).

Os módulos representados na Figura 3 são:

a) Sensor de captura de imagem (Câmera): elemento incorporado ao dispositivo móvel. Pode ser por exemplo a câmera embutida em um smartphone, responsável pela aquisição das imagens;

b) Sensores de posição: o GPS embarcado no dispositivo móvel será usado para obtenção das coordenadas geográficas (latitude e longitude) em que o usuário se encontra. A bússola servirá para identificação da direção em que o usuário está apontando seu dispositivo móvel. Ambos servem como entrada do Sistema de Cruzamento de informações;

c) Dispositivo de saída (tela do aparelho): utilizada na interação do usuário com a aplicação. Exibe as imagens continuamente capturadas pela câmera (sem necessidade do usuário pressionar o botão de captura de fotos) e também as informações e gráficos disponibilizados via Realidade Aumentada. Estas indicações por Realidade Aumentada serão geradas diretamente no dispositivo móvel, por se tratarem de gráficos e textos simples, sem necessidade de muito poder de processamento;

d) Servidor do banco de dados: computador que hospeda o banco de dados com informações relacionadas aos ativos (nome, categoria, posição geográfica). Este banco de dados é acessado de forma remota pela aplicação;

e) Sistema de reconhecimento de objetos: aplicação que compara as imagens obtidas pela câmera com um banco de dados de imagens, armazenadas em um servidor remoto, que servem como referência. Este módulo é uma entrada do Sistema de Cruzamento de Informações, repassando a informação relativa ao objeto que foi identificado pelas suas formas;

f) Sistema de Cruzamento de Informações: algoritmo que recebe a identificação do objeto informada pelo Sistema de Reconhecimento de Objetos, bem como a posição de cada elemento próximo ao usuário, provenientes da Tabela com Coordenadas dos Objetos, e a posição geográfica do usuário, e com isso consegue diminuir os erros inerente à precisão da tecnologia GPS ao reconhecimento de imagens. Desta forma, se o algoritmo reconhece que um objeto deveria estar em uma determinada posição (conclusão obtida a partir da Tabela com Coordenadas dos Objetos) e encontra um objeto que se assemelha ao que existe em imagens de referência, então infere-se que aquele objeto é o mesmo que se encontra na Tabela com Coordenadas dos Objetos;

g) Tabela com Coordenadas dos objetos: Tabela que lista todos os ativos que se pretende identificar, e tem em cada coluna uma informação que caracteriza cada um: Nome, Latitude e Longitude do objeto.

A escolha cautelosa do hardware é fundamental para uma melhor usabilidade da solução. Uma Revisão Bibliográfica Sistemática conduzida por Palmarini et al. (2018) a respeito do uso de aplicações com RA em atividades de manutenção concluiu que o hardware mais comum em aplicações deste tipo é o HMD (head-mounted display), presente em 30% das publicações analisadas, seguido pelo HHD (hand-held device), presente em 27% dos estudos analisados. De forma similar, outra Revisão Bibliográfica Sistemática conduzida por Cardoso et al. (2020) com o foco em Realidade Aumentada Industrial mostrou preferência pelo uso de HMDs (40% das publicações) e de HHDs (28% das publicações).

A preferência pelo uso do HHD neste trabalho se justifica pelos seguintes itens:

a) Atividades de manutenção em campo são comumente realizadas por dezenas ou centenas de técnicos. Equipar cada um dos técnicos com HMDs geraria um alto custo;

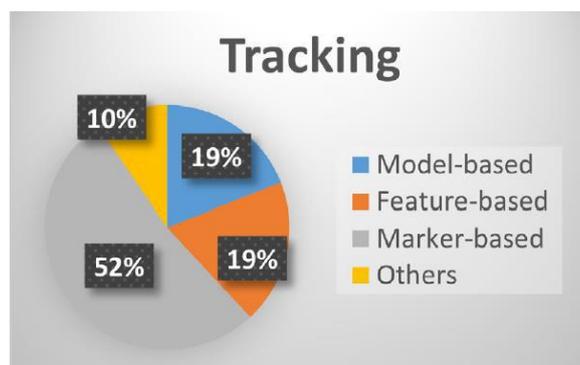
b) Técnicos em campo normalmente já possuem smartphones, para que possam entrar em contato ou serem supervisionados pelo staff de operação das empresas;

c) No framework apresentado, o usuário não tem a necessidade de utilizar a aplicação por muito tempo em cada manutenção, o que poderia justificar o uso de HMDs (para manter as mãos livres). Sendo assim, ele pode realizar consulta de dados de ativos na aplicação, tomar suas decisões e em seguida não é mais necessário que ele permaneça visualizando a tela do smartphone enquanto realiza suas atividades;

d) A utilização de uma aplicação executada em smartphone seria de fácil utilização pelos técnicos, com necessidade somente de um treinamento básico, ao passo que a utilização de HMDs demandaria investimento considerável em treinamento.

Com relação ao modelo de *tracking* aplicado, as abordagens utilizadas podem ser baseadas em visão, baseadas em sensores ou ambos (estratégia híbrida) (PALMARINI et al., 2018). Estas técnicas são mostradas na Figura 4.

Figura 4. Técnicas de tracking utilizadas nas publicações selecionadas pela RBS de Palmarini.



Fonte: Palmarini et al. (2018).

Na Figura 4, os modelos híbridos pertencem à classe “outros”. Eles fazem uso de uma estratégia de visão combinada com informações de sensores. No framework proposto, o *tracking* será híbrido, utilizando a modalidade “feature-based” e como sensores o GPS e bússola do dispositivo móvel. A escolha por modalidades sem marcadores se justifica pela grande quantidade de ativos que uma empresa possa ter em diferentes locais, o que levaria à necessidade de identificar cada um deles com um marcador.

Quanto à solução de *authoring*, a modalidade mais simples e efetiva para o que se propõe neste trabalho é a manual, com exibição de texto. Informações sobre o ativo em que o usuário está trabalhando serão mostradas na tela de seu smartphone. Uma das vantagens de se utilizar o texto simples, sobre o uso de imagens 2D ou 3D, é a menor necessidade de processamento na geração do conteúdo, tornando a solução mais aderente a dispositivos que tenham configurações de hardware mais simples.

2.4 Detalhes da implementação

Para a realização de uma prova de conceito, selecionou-se o escopo de tarefas de manutenção de uma operadora local de telecomunicações, cujos técnicos precisam diariamente se deslocar até a residência de cada cliente. Em seguida eles buscam por um elemento de rede denominado CTOE (Caixa de Terminação Óptica Externa) fixado a um poste de iluminação pública, o mais próximo possível à residência do cliente. O técnico acessa então este elemento de rede, verifica se existem portas disponíveis para a conexão da fibra óptica até a residência do cliente, e efetua a conexão entre este elemento e o modem (equipamento localizado dentro da residência do cliente).

A contribuição evidenciada da nova aplicação para tarefas deste tipo é a utilização de Realidade Aumentada para exibição de informações relacionadas a estes elementos de rede, diretamente no smartphone do técnico de campo, de forma a agilizar suas tarefas. A seguir são listados os passos da implementação para esta prova de conceito.

2.4.1 Coleta de amostras

Nesta etapa, foram adquiridas amostras (imagens) por meio da câmera de um dispositivo móvel, para realizar o treinamento do algoritmo de reconhecimento. Foram utilizadas 92 amostras positivas (imagens que contém o poste de iluminação pública que se pretende reconhecer) e 239 amostras negativas (imagens que não possuem o poste). As imagens das amostras negativas foram adquiridas de forma a abranger o cenário próximo ou atrás do poste, com cenas comumente encontradas e que poderiam ser confundidas com o poste, como por exemplo árvores.

As imagens tiveram resolução de 3120 x 4160 pixels. Não houve nenhum tipo de tratamento no conjunto de imagens adquiridas, mantendo-se a resolução original das mesmas, sem a aplicação de filtros.

A Figura 5 mostra algumas imagens utilizadas no conjunto de imagens positivas.

Figura 5. Exemplos de imagens adquiridas para composição do conjunto de imagens positivas.



Fonte: Autores.

Pode-se observar, na Figura 5, que houve preocupação especial na aquisição de imagens de postes de diferentes cores e formatos, bem como condições de iluminação distintas, para aumentar a eficácia da etapa de treinamento.

A Figura 6 mostra algumas imagens utilizadas no conjunto de imagens negativas.

Figura 6. Exemplos de imagens adquiridas para composição do conjunto de imagens negativas.



Fonte: Autores.

De acordo com o mostrado na Figura 6, para formar o conjunto de imagens negativas, procurou-se adquirir imagens de objetos normalmente encontrados próximos aos postes de iluminação pública, que possuem em suas formas linhas verticais,

como lixeiras ou árvores, justamente para que na etapa de treinamento ocorresse com mais facilidade a diferenciação destes objetos em relação aos postes.

2.4.2 Treinamento

A etapa de treinamento é utilizada para ensinar a ferramenta utilizada a reconhecer padrões de imagem que permitam identificar um poste em uma imagem. Para a realização do treinamento foi utilizada a interface GUI Cascade Trainer. Este é um programa que pode ser usado para treinar, testar e melhorar modelos de classificadores em cascata. Ele usa uma interface gráfica para definir os parâmetros e facilitar o uso da ferramenta OpenCV para as etapas de treinamento e teste de classificadores. A saída da ferramenta GUI Cascade Trainer consiste em uma matriz de reconhecimento, em forma de arquivo de extensão xml, a ser usado pela ferramenta OpenCV na etapa de reconhecimento.

Os parâmetros utilizados para a aplicação desenvolvida na etapa de treinamento, bem como para as demais etapas, estão listados no Quadro 3.

Quadro 3. Parâmetros de configuração utilizados pela aplicação desenvolvida.

Treinamento	Mapa
numPos: 92 numNeg: 239 numStages: 20 precalcValBufSize[Mb] : 1024 precalcIdxBufSize[Mb] : 1024 acceptanceRatioBreakValue : 0 stageType: BOOST featureType: LBP sampleWidth: 30 sampleHeight: 500 boostType: GAB minHitRate: 0.999 maxFalseAlarmRate: 0.5 weightTrimRate: 0.95 maxDepth: 1 maxWeakCount: 100	Integração com a plataforma Mapbox
Servidor	GPS
Banco de dados MySQL	Leitura das coordenadas de latitude e longitude do usuário (dispositivo móvel)
Câmera	Bússola
Acesso à câmera do dispositivo móvel. São usados 15 fps (quadros por segundo) do vídeo capturado pela câmera para análise das imagens	Dispositivos que possuem bússola: a posição da bússola é lida pela aplicação Dispositivos que não possuem bússola: uma função para apontamento de direção de deslocamento é utilizada

Fonte: Autores.

O Quadro 3 relaciona os parâmetros e métodos utilizados para cada dimensão da aplicação desenvolvida: definições da etapa de treinamento, qual mapa foi utilizado, tipo de servidor, forma de obtenção das coordenadas geográficas, uso da câmera e da bússola do dispositivo móvel.

Para o treinamento, a OpenCV disponibiliza dois tipos de recursos: Haar e LBP. Para esta implementação, foi escolhido o método LBP (Local Binary Pattern), que apresenta maior rapidez nas etapas de treinamento e reconhecimento da imagem.

A aplicação foi desenvolvida em linguagem Python e adaptada para uso em dispositivos móveis com uso da Unity (versão 2020.3.19f1). Os recursos utilizados pela aplicação foram: acesso a câmera, ao GPS e ao mapa. Para o mapa, foi utilizada uma integração da Unity com a Mapbox, que é uma plataforma de localização.

2.4.3 Utilização da aplicação

Ao se iniciar a aplicação, a mesma obterá, a partir das informações do GPS do dispositivo móvel, a localização atual do usuário. De posse desta localização, a aplicação escolhe automaticamente o banco de dados relativo à posição atual do usuário, dentre todos os bancos de dados existentes no servidor (um banco de dados para cada bairro da cidade). Este banco de dados consiste em uma tabela, contendo as coordenadas de cada elemento de rede, como a do exemplo do Quadro 4.

Quadro 4. Exemplo da tabela de dados disponibilizada em servidor mySQL para consulta remota.

CTOE	Latitude	Longitude	Portas Ocupadas	Total de Portas
CTO-ULA-03766	-18,959250	-48,295820	9	16
CTO-ULA-03767	-18,960212	-48,295787	12	16
CTO-ULA-03768	-18,959931	-48,295145	4	16
CTO-ULA-03769	-18,958884	-48,295175	7	16
CTO-ULA-03770	-18,959443	-48,294327	9	16
CTO-ULA-03771	-18,959378	-48,293807	5	16

Fonte: Autores.

No Quadro 4, cada equipamento (CTOE) possui coordenadas geográficas, a quantidade de portas ocupadas e quantidade total de portas.

Para esta prova de conceito, foram criados dois bancos de dados, contendo as posições de 75 CTOEs, dispersas em dois bairros da cidade de Uberlândia (MG): Jardins Roma e Morada do Sol.

A aplicação desenvolvida possui dois modos de operação:

- Visão de mapa, para facilitar deslocamento do usuário em direção aos equipamentos que são objeto de manutenção;
- Visão da câmera do dispositivo móvel, em que a informação é mostrada por RA quando um objeto cadastrado é reconhecido.

São extraídos 15 fps (quadros por segundo) do vídeo capturado pela câmera do dispositivo móvel, de forma a obter imagens para análise da presença ou não do objeto de interesse (poste de iluminação pública).

O algoritmo reconhece o poste na imagem adquirida e por meio da geolocalização (coordenadas) é feita uma verificação se no poste reconhecido encontra-se uma CTOE. O algoritmo compara as coordenadas do usuário (obtidas a partir do GPS do dispositivo móvel) e verifica se elas estão próximas das coordenadas de alguma CTOE do banco de dados. Para esta etapa, é definida uma faixa de distâncias em metros para as informações de latitude e longitude, formando um “quadrado” em torno de cada CTOE. Se o usuário estiver dentro de um determinado quadrado, o algoritmo conclui que o poste reconhecido na imagem adquirida possui uma CTOE, e então o nome da CTOE e suas informações de ocupação de portas são lidas no banco de dados e apresentadas ao usuário por Realidade Aumentada.

3. Resultados

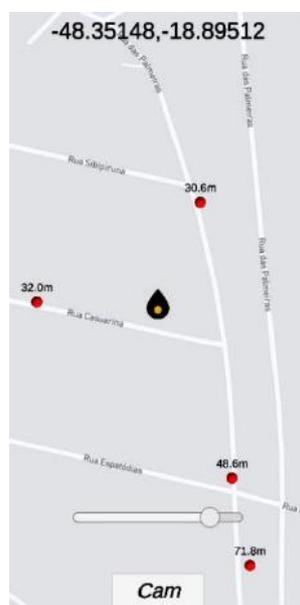
Na prova de conceito executada, um técnico em campo foi solicitado a executar suas rotinas diárias de instalação e manutenção, de posse de seu smartphone, com o aplicativo desenvolvido devidamente instalado. O teste consistiu das seguintes etapas:

- O técnico deve se deslocar em seu veículo à residência de cada cliente que solicitou o serviço;

- b) Ao chegar ao endereço, o técnico abre o aplicativo e acessa a “visão de mapa”, verificando quais são os elementos de rede (CTOEs) mais próximos da residência do cliente;
- c) O técnico se dirige a pé até o poste indicado no mapa, e alterna para a “visão de câmera”;
- d) O técnico aponta a câmera de seu smartphone na direção do poste, que é reconhecido pelo sistema;
- e) O nome do elemento de rede associado àquele poste é exibido em seu smartphone;
- f) O técnico seleciona a caixa de texto com o nome do elemento, e informações de ocupação de portas são exibidas;
- g) Havendo portas disponíveis, o técnico efetua a instalação do serviço;
- h) O técnico marca no aplicativo qual porta foi utilizada para a conexão do cliente.

A Figura 7 ilustra a disposição geográfica dos elementos de rede em um mapa do bairro em que foi realizada a prova de conceito.

Figura 7. Mapa dos elementos de rede.



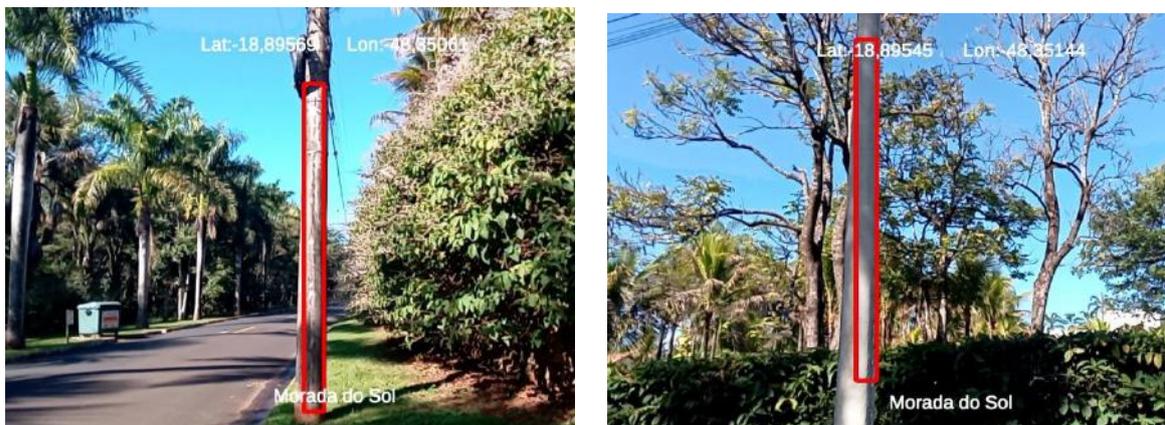
Fonte: Autores.

Na Figura 7, as coordenadas do usuário são mostradas no topo da imagem, e a distância (em metros) entre o usuário e cada elemento de rede (identificados por pontos vermelhos) aparece sobre cada elemento de rede.

Quando o usuário seleciona o botão “Cam” mostrado na Figura 7, a aplicação alterna para o modo “visão de câmera”.

As Figuras 8 e 9 mostram a “visão de câmera”, modo em que a informação aumentada é mostrada em frente ao poste que teve as coordenadas verificadas e o reconhecimento de imagens processado.

Figura 8. Reconhecimento de postes pela aplicação



Fonte: Autores.

A Figura 8 ilustra que o poste foi devidamente reconhecido, sendo destacado por um retângulo vertical vermelho sobre seus contornos, gerado pela aplicação.

Figura 9. Exemplos de postes reconhecidos, com coordenadas geográficas coincidentes com as tabelas de coordenadas.



Fonte: Autores.

A Figura 9 mostra o resultado obtido quando um determinado elemento (retângulo vermelho) é selecionado. São mostradas as informações referentes àquele elemento, que são o nome do equipamento e a relação de portas livres e ocupadas.

A Figura 10 mostra as informações exibidas ao se selecionar um determinado equipamento na tela do dispositivo móvel.

Figura 10. Relação de portas do equipamento selecionado.



CTO-ULA-03789	
Portas livres:	
PORTA 01	PORTA 09
PORTA 02	PORTA 10
PORTA 03	PORTA 11
PORTA 04	PORTA 12
PORTA 05	PORTA 13
PORTA 06	PORTA 14
PORTA 07	PORTA 15
PORTA 08	PORTA 16

Fonte: Autores.

Na Figura 10, as portas ocupadas são destacadas em vermelho. Já as portas livres possuem texto na cor preta.

4. Discussão

Os resultados apresentados mostram a viabilidade da aplicação de Realidade Aumentada como apoio a atividades de campo, visando maior comodidade e velocidade para a execução das tarefas dos técnicos. Sem o apoio de tal ferramenta, o técnico precisaria utilizar mapas de rede impressos, bem como precisaria com frequência recorrer ao apoio de equipes de *backoffice* caso fosse encontrada alguma inconsistência nas informações dos mapas.

Com relação à performance do sistema, a aplicação foi testada em smartphones de configuração considerada intermediária pelo mercado, mostrando-se adequada para o público-alvo (técnicos de campo), que possuem smartphones desta categoria, fornecidos pela empresa para realização de suas atividades.

Sobre a etapa de treinamento para o reconhecimento de objetos, várias combinações de quantidades de imagens foram testadas. A situação que mostrou maior taxa de sucesso foi a utilização de 92 imagens positivas e 239 imagens negativas. A aplicação reconheceu com sucesso postes diferentes dos que estavam presentes nas imagens usadas no treinamento.

Em outras simulações, foram utilizadas mais imagens positivas do que imagens negativas. Para estes casos, a taxa de reconhecimento foi baixa. Foi testado também o caso de se utilizar a mesma quantidade de imagens positivas e negativas, situação em que o reconhecimento falhou em alguns testes.

Foi confirmada a importância de segmentação do banco de dados, pela análise da posição do usuário. Como a aplicação carrega as informações relativas somente ao bairro em que usuário se encontra, isto se traduz em um menor tempo de espera para o usuário, comparativamente à utilização do banco de dados de forma integral.

Dentre as contribuições observadas pelo uso da aplicação, destacam-se:

- Trata-se de um sistema atualizado em tempo real, contendo as posições dos elementos de interesse e informações relevantes para o usuário, que são carregadas de forma *on-line* conforme necessidade;
- O uso da aplicação é bastante intuitivo, com a apresentação da posição do usuário em um mapa. Isto permite uma leitura mais fácil do que a interpretação de mapas impressos sem a posição real do usuário;

c) A possibilidade de atualização de informações do banco de dados pelo usuário, marcando uma nova ocupação de uma porta na prova de conceito realizada, confere maior agilidade no processo e elimina a necessidade de contato com outra equipe atualmente responsável pela atualização cadastral dos equipamentos;

d) Facilidade de consulta às informações de cada equipamento, o que permite apontar necessidade de correção caso seja identificado algum problema de cadastro, como por exemplo o nome errado do equipamento em questão.

5. Considerações Finais

Foram observadas algumas variáveis que podem afetar o desempenho da aplicação desenvolvida. Em relação ao processo de reconhecimento de imagem, é necessária atenção especial ao escolher qual algoritmo para o reconhecimento de imagem é o melhor, para garantir qualidade e um tempo de espera adequados. Outra questão poderia ser a disponibilidade de acesso à Internet móvel, pois a arquitetura depende do acesso à Internet móvel para buscar as informações em tempo real. As condições climáticas também podem interferir na usabilidade do aplicativo (por exemplo, a câmera do smartphone apontada para cima, na direção de um poste de rua, contra a luz do sol, dificultando a visualização de qualquer informação na tela). Por fim, deve-se verificar se o desempenho geral do aplicativo é adequado para os smartphones dos técnicos, que são modelos mais baratos e pouco potentes, pois são fornecidos pelo operador de telecomunicações.

Propõe-se como extensão deste trabalho a realização de testes em várias condições climáticas para garantir que a localização do GPS é precisa o suficiente para permitir a operação adequada. Embora tenha sido relatado por muitos autores que em várias situações os dados do GPS não foram úteis, verificou-se na aplicação desenvolvida que a precisão normalmente é suficiente para a aplicação desejada, uma vez que os equipamentos de telecomunicações estão localizados ao ar livre e bastante distantes um do outro (pelo menos 30 metros). A utilização de reconhecimento de imagens neste caso foi fundamental para o correto apontamento da localização do elemento de interesse. Ficou evidente, portanto, a dependência da utilização combinada de geolocalização e visão computacional para o funcionamento satisfatório do sistema. Como um método adicional para conferir maior precisão na tarefa de localização, pode ser avaliada a utilização de *beacons* (dispositivos transmissores usados para geolocalização), instalados em cada elemento que se pretende identificar.

Referências

- ACM Digital Library (2019). <https://dl.acm.org/>.
- Alavikia, Z. & Shabro, M. (2019). Pragmatic Industrial Augmented Reality in Electric Power Industry, *34th Power System Conference*, 25-32.
- Aleksy, M. et al. (2014). Augmented reality for improved service delivery. *2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. IEEE, 382-9.
- AUGEO® (2019). Release note. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/3d-gis/3d-gis/ar-for-your-gis/>.
- Bergenti, F. & Gotta, D. (2014). Augmented reality for field maintenance of large telecommunication networks. *Conference and Exhibition of the European Association of Virtual and Augmented Reality*, 125-129.
- Billingshurst, M. (2002). Augmented reality in education. *New horizons for learning*, 12(5), 1-5.
- Bottani, E. & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Transactions*, 51(3), 284-310.
- Cardoso, A. et al. (2019). Use of Virtual and Augmented Reality as Tools for Visualization of Information: A Systematic Review. *International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, 407-417.
- Cardoso, L. F., Mariano, F. & Zorzal, E. (2020). A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106159.
- Ceruti, A. et al. (2019). Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 Context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526.
- Chiang, T. H. C., Yang, S. J. H. & Hwang, G-J (2014). An augmented reality-based mobile learning system to improve students' learning achievements and motivations in natural science inquiry activities. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 352-65.

- Cordonnier, M. et al. (2017). Contribution of augmented reality to the maintenance of network equipment. *CIREOpen Access Proceedings Journal*, 2017(1), 87-90.
- Del Amo, I. F. et al. (2018). Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework. *Procedia Manufacturing*, 19, 148-155.
- ENEL Distribuição SP (2019). Projeto Urban Futurability. <https://www.eneldistribuicaoosp.com.br/urban-futurability>.
- Gallala, A.; Hichri, B. & Plapper, P. (2019). Survey: The Evolution of the Usage of Augmented Reality in Industry 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 521(1), 012017.
- Gattullo, M. et al. (2017). From paper manual to AR manual: do we still need text?. *Procedia Manufacturing*, 11, 1303-1310.
- General Electric (2017). Report Looking Smart: Augmented Reality Is Seeing Real Results In Industry. <https://www.ge.com/reports/looking-smart-augmented-reality-seeing-real-results-industry-today/>.
- Google Acadêmico (2019). <https://scholar.google.com>.
- GUI Cascade Trainer (2022). <https://amin-ahmadi.com/cascade-trainer-gui>.
- Hamilton, K. & Olenewa, J. (2011). Augmented reality in education. *Proc. SXSW Interactive*, 1008-1022.
- IEEE Xplore (2019). <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.
- Kerawalla, L. et al. (2006). "Making it real": exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science. *Virtual reality*, 10(3), 163-174.
- Klopfer, E. & Yoon, S. (2004). Developing games and simulations for today and tomorrow's tech savvy youth. *TechTrends*, 49(3), 33-41.
- Lamberti, F. et al. (2014). Challenges, opportunities, and future trends of emerging techniques for augmented reality-based maintenance. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2(4), 411-421.
- Mapbox (2022). <https://www.mapbox.com>.
- Martinetti, A.; Rajabalinejad, M. & Van Dongen, L. (2017). Shaping the future maintenance operations: reflections on the adoptions of Augmented Reality through problems and opportunities. *Procedia CIRP*, 59, 14-17.
- Masood, T. & Egger, J. (2019). Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 181-195.
- Ogushi, I. (2013). Operation and maintenance work using AR technology for optical access networks. *National Fiber Optic Engineers Conference*, NM21-3.
- Olbrich, M. et al. (2013). Augmented reality supporting user-centric building information management. *The visual computer*, 29(10), 1093-1105.
- Oliveira, R. et al. (2013). An augmented reality application to support maintenance—is it possible?. *Maintenance Performance Measurement and Management Conference: 12/09/2013-13/09/2013*, 260-271.
- OpenCV (2022). <https://opencv.org>.
- Ortega, Sebastián et al. (2019). Making the Invisible Visible—Strategies for Visualizing Underground Infrastructures in Immersive Environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 152.
- Palmarini, Riccardo et al. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215-228.
- Python (2021). <https://www.python.org/>.
- Quint, F.; Loch, F. & Bertram, P. (2017). The Challenge of Introducing AR in Industry-Results of a Participative Process Involving Maintenance Engineers. *Procedia Manufacturing*, 11, 1319-1323.
- Ramirez, Hector et al. (2013). Authoring software for augmented reality applications for the use of maintenance and training process. *Procedia Computer Science*, 25, 189-193.
- Science Direct (2019). <https://www.sciencedirect.com>.
- Shelton, B. E. & Hedley, N. (2002). Using Augmented Reality for Teaching Earth-Sun Relationships to Undergraduate Geography Students, *The First IEEE International Workshop Augmented Reality Toolkit*, 8.
- Unity (2021). <https://unity.com>.
- Zhang, Xiaolei et al. (2016). ARGIS-based outdoor underground pipeline information system. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 40, 779-790.