



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

ESTG

Inovação na Manutenção Industrial: A Integração da Realidade Virtual e
Aumentada com o Digital Twin
João Paulo Faria Miranda

2025



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Inovação na Manutenção Industrial: A Integração da Realidade Virtual e Aumentada com o Digital Twin

João Paulo Faria Miranda

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

INSTITUTO POLITÉCNICO DE VIANA DO CASTELO

Inovação na Manutenção Industrial: A Integração da Realidade Virtual e Aumentada com o Digital Twin

João Paulo Faria Miranda

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO



Mestrado em Engenharia Informática
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Orientador: Prof. Doutor Pedro Miguel Teixeira Faria

Orientador: Prof. Doutor Luís Miguel Cabrita Romero

7 de agosto de 2025

Este trabalho foi financiado pelo projeto “TEXP@CT: Pacto de Inovação para a Digitalização do STV”, no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência-02-C05-i01.01-2022.PC644915249-00000025, integrado no subprojeto “WP 2.2 (PPS #8): Plataforma Digital Twin para a Indústria Têxtil”.



Resumo

Na atual era da transformação digital, e com o contínuo avanço das tecnologias de informação, é possível observar um crescente esforço por parte das indústrias na busca constante pela atualização. Este esforço tem como principais objetivos aumentar a eficiência operacional, reduzir custos e reforçar a competitividade das empresas no mercado.

Neste contexto, destaca-se o conceito de *Digital Twin*, um modelo digital dinâmico que permite a representação digital de sistemas industriais, assim como os seus componentes físicos e os respetivos processos operacionais. No entanto, a complexidade e a densidade dos dados gerados pelos modelos *Digital Twin* podem representar um desafio significativo para a sua interpretação por parte dos operadores e técnicos industriais.

A emergência de tecnologias como a Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA) tem vindo a facilitar a interpretação e a interação com os dados gerados pelos modelos *Digital Twin*, demonstrando também a sua aplicabilidade em setores cruciais da indústria, como a manutenção de equipamentos.

O trabalho aqui descrito teve como principal objetivo o desenvolvimento de duas aplicações de RA integradas em modelos *Digital Twin*, aplicadas no contexto da manutenção de equipamentos. Enquanto o primeiro sistema constituiu um projeto interno de carácter exploratório, focado no teste e na validação de tecnologias, o segundo sistema teve uma aplicação prática real na secção de fição de uma fábrica têxtil, no âmbito do projeto TEXP@CT (Pacto para a Inovação da Indústria Têxtil e do Vestuário). Os sistemas desenvolvidos combinam funcionalidades como a leitura de dados em tempo real e o apoio à manutenção de equipamentos através de conteúdos aumentados, com o intuito de otimizar tarefas de manutenção industrial.

Os resultados mostraram um elevado grau de aceitação por parte dos utilizadores por estes sistemas, demonstrando particular interesse na componente de manutenção e formação interativa em RA.

Palavras-chave: Realidade Aumentada, Realidade Virtual, Indústria Têxtil, Manutenção de Equipamentos, *Digital Twin*, Aplicação Móvel.

Abstract

In the current era of digital transformation, and with the continuous advancement of information technologies, there is a growing effort by industries to pursue constant modernization. This effort is primarily aimed at increasing operational efficiency, reducing costs, and enhancing companies competitiveness in the market.

In this context, the concept of the Digital Twin stands out, a dynamic digital model that enables the virtual representation of industrial systems, their physical components, and their corresponding operational processes. However, the complexity and density of the data generated by Digital Twin models can pose a significant challenge for interpretation by industrial operators and technicians.

The emergence of technologies such as Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) has facilitated the interpretation and interaction with data generated by Digital Twin models, also demonstrating their applicability in critical industrial sectors, such as equipment maintenance.

The work described herein aimed to develop two AR applications integrated with Digital Twin models, applied within the context of equipment maintenance. While the first system was an internal exploratory project focused on testing and validating technologies, the second system was implemented in a real-world scenario within the spinning section of a textile factory, as part of the TEXP@CT (Pacto para a Inovação da Indústria Têxtil e do Vestuário) project. The developed systems combine functionalities such as real-time data retrieval and augmented maintenance support content, with the goal of optimizing industrial maintenance tasks.

The results showed a high level of user acceptance of these systems, with particular interest in the interactive AR-based maintenance and training components.

Keywords: Augmented Reality, Virtual Reality, Textile Industry, Equipment Maintenance, Digital Twin, Mobile Application.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família por todo o apoio, carinho e compreensão que me deram ao longo destes anos. Sem eles, tudo teria sido muito mais difícil. A todos, deixo uma sentida palavra de gratidão. Agradeço também aos meus amigos, que me proporcionaram, ao longo dos últimos anos, inúmeros momentos de alegria e felicidade. A todos, deixo uma palavra de apreço e os meus votos das maiores felicidades. Aos meus orientadores desta dissertação, o Professor Doutor Pedro Faria e o Professor Doutor Luís Romero, expresso o meu profundo agradecimento pela disponibilidade, atenção e generosa orientação que me prestaram. Por fim, aos meus colegas e amigos André Costa, David Verde, Diogo Araújo, Duarte Dias, João Mirra, João Santos, Tânia Silva e Válder Gomes, membros da equipa do Laboratório de Interação Audiovisual, agradeço o empenho, o incentivo e a constante disponibilidade demonstrada ao longo deste percurso.

João Miranda

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcutá

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodologia de Pesquisa	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	Conceitos e Tecnologia	6
2.1	Indústria 4.0 e 5.0	6
2.2	<i>Digital Twin</i>	7
2.3	<i>Business Process Model and Notation</i>	7
2.4	<i>Internet of Things</i>	7
2.5	Manutenção Preditiva	8
2.6	Realidade Virtual	8
2.7	Realidade Aumentada	9
2.7.1	Técnicas de Rastreamento	10
2.7.2	Conteúdos em Realidade Aumentada	11
2.7.3	Dispositivos	11
2.8	Representação de Modelos e Animações	12
2.8.1	Modelação	12
2.8.2	Animações	13
2.9	Conclusão do Capítulo	13
3	Trabalho Relacionado	15
3.1	Revisão sistemática	15
3.2	Trabalhos relacionados	17
3.3	Discussão	27
3.4	Conclusão do Capítulo	28
4	Arquitetura e Desenvolvimento do Sistema	30
4.1	Fase 1: Arquitetura e Desenvolvimento	31
4.1.1	Arquitetura Geral do Sistema “Coffee Twin”	31
4.1.2	Funcionalidades	33
4.1.3	Rastreamento e Modelação	35
4.1.4	Representação de Dados	37
4.1.5	Representação de Processos	38
4.1.6	Ação Remota e Bidirecional	40
4.1.7	Formação e Manutenção	42
4.2	Fase 2: Arquitetura e Desenvolvimento	43

4.2.1	Arquitetura Geral do Sistema “RioRA”	43
4.2.2	Funcionalidades	45
4.2.3	Rastreamento com Marcadores	47
4.2.4	Representação de dados	49
4.2.5	Formação e Manutenção	51
4.2.6	Assistente Virtual	54
4.3	Conclusão do Capítulo	56
5	Testes, Resultados e Discussão	57
5.1	Testes ao Sistema “Coffee Twin”	57
5.2	Testes ao Sistema “RioRA”	58
5.3	Discussão	61
6	Conclusões e Trabalho Futuro	63
6.1	Conclusões	63
6.2	Trabalho Futuro	64
	Referências	65
A	Trabalho Publicado	72
B	Algoritmos	76

Lista de Figuras

2.1	Cálculo de previsões com o algoritmo <i>Linear Regression</i> [84].	8
3.1	Processo de pesquisa do trabalho relacionado.	17
3.2	Interface Maintenance 4.0 de um processo de manutenção [10].	18
3.3	Exemplo de funcionalidades em interfaces de realidade aumentada para <i>Digital Twins</i> [8].	19
3.4	Criação de uma tarefa na plataforma “Archer” [64].	20
3.5	Instruções de um processo de montagem utilizando o display do computador [4].	21
3.6	Rastreamento de um VuMark e componente em destaque [78].	22
3.7	Interface da aplicação de RA [61].	23
3.8	Histórico de manutenções realizadas numa oficina industrial [86].	24
3.9	Testes de validação do sistema em ambiente industrial [55].	25
3.10	Utilização do sistema “MARMA” na manutenção de uma peça automóvel [42].	25
3.11	Operador a utilizar os Hololens durante um processo de montagem [30].	26
3.12	Lista de tarefas associadas a um dos veículos [15].	27
4.1	Arquitetura geral do sistema "Coffee Twin".	31
4.2	Esquema de funcionalidades e navegação na aplicação "Coffee Twin".	33
4.3	Painel de controlo da aplicação "Coffee Twin".	34
4.4	Modelo 3D digital da máquina de café.	36
4.5	Guia de auxílio na deteção do modelo da máquina de café.	36
4.6	Leitura da temperatura e humidade atual no painel de controlo.	37
4.7	Últimos registos de temperatura e humidade.	38
4.8	Representação BPMN dos processos da máquina de café.	39
4.9	Estrutura de dados utilizada para armazenar o processo da preparação de café.	40
4.10	Componentes que constituem o sistema "Coffee Twin".	41
4.11	Botões de atuação bidirecional.	42
4.12	Animação pertencente ao processo de preparação de um café.	43
4.13	Arquitetura geral do sistema "RioRA".	44
4.14	Esquema de funcionalidades e navegação na aplicação "RioRA".	45
4.15	Menu da máquina de fiação com ID: 227.	46
4.16	Marcador associado à máquina de fiação com ID: 223.	48
4.17	Esquema dos dados obtidos em cada momento.	49
4.18	Cartão informativo da máquina com ID: 229.	50
4.19	Resultados da pesquisa de eventos associados a uma máquina.	50
4.20	Máquina industrial da secção de fiação da RIOPELE.	51
4.21	Leitor de vídeos de um processo de manutenção.	52
4.22	Comparação entre um patim da máquina de fiação e o seu respetivo modelo digital.	53

4.23	Animação em RA para manutenção do encartamento superior.	54
4.24	Chatbot de mensagens para comunicação com Assistente Virtual.	55
5.1	Questionário com o método SUS.	60
5.2	Demonstração da componente de manutenção com RA na secção de fiação. . . .	60
A.1	Artigo publicado na conferência <i>CISTI 2024</i>	73
A.2	Artigo publicado na revista <i>Sensors 2025 - MDPI</i>	74
A.3	Artigo aceite para publicação na conferência <i>DTIM 2025 - MCCSIS</i>	75

Lista de Tabelas

3.1	Análise dos conceitos chave dos trabalhos analisados.	28
5.1	Análise comparativa de sistemas.	62

Lista de Algoritmos

B.1	Controlo bidirecional da máquina de café - Fase 1	77
B.2	Obtenção de medias de um processo - Fase 1	78
B.3	Ligação com a API da fábrica para dados em tempo real - Fase 2	79
B.4	<i>Chat</i> com ligação ao assistente virtual - Fase 2	79

Abreviaturas e Símbolos

API	Application Programming Interface
AV	Assistente Virtual
BPMN	Business Process Model and Notation
CAD	Computer Aided Design
GNSS	Global Navigation Satellite System
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
MTG	Model Target Generator
MRTK	Mixed Reality Toolkit
RA	Realidade Aumentada
REST	Representational State Transfer
RV	Realidade Virtual
SVG	Scalable Vector Graphic
SDK	Software Development Kit
SfV	Structure from Motion
SUS	System Usability Scale

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Nos últimos anos, assistimos a um rápido avanço das tecnologias de informação, que têm motivado uma forte iniciativa de atualização por parte das indústrias. Estas inovações são fundamentais para a transformação da indústria, promovendo a eficiência e a inovação. A adoção inteligente dessas tecnologias não só otimiza processos e reduz custos, como também facilita a logística, sendo essencial para fortalecer a competitividade das empresas.

Neste cenário, destaca-se o conceito de *Digital Twin*, um modelo dinâmico que representa digitalmente sistemas industriais, integrando componentes físicos e processos operacionais. Este modelo proporciona uma análise mais precisa e detalhada, permitindo prever e compreender melhor o desempenho de sistemas complexos. Assim, os *Digital Twins* são fundamentais para a convergência entre o espaço físico e a informação digital dele resultante [21].

Embora o *Digital Twin* seja um modelo poderoso para a integração de sistemas físicos e digitais, a complexidade dos dados por ele representados pode, por vezes, originar dificuldades de interpretação por parte dos utilizadores. Para enfrentar este desafio, surgem as tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, que, segundo os autores de [11], funcionam como um elo de ligação intuitivo entre os mundos físico e digital, facilitando a interpretação e a interação com os dados.

A RA enriquece o ambiente físico ao sobrepor informações digitais em tempo real [31], sendo particularmente útil em aplicações industriais baseadas em *Digital Twins*. Por outro lado, a RV emerge os utilizadores em ambientes simulados, oferecendo experiências imersivas de treino e uma compreensão abrangente de representações digitais, especialmente benéficas para explorar e interagir com contrapartes virtuais de fábricas do mundo real [69]. Nas opiniões de [89], a RA e RV em conjunto, desempenham papéis cruciais no aprimoramento das experiências do utilizador e na eficiência no cenário em constante evolução das indústrias digitalizadas.

1.2 Objetivos

Este projeto, dividido em duas fases, tem como objetivo o desenvolvimento de duas aplicações de Realidade Aumentada. Sendo uma das aplicações um projeto interno utilizado para a exploração de tecnologias, e a outra destinada a uma empresa têxtil, focada na sua secção de fiação, com a finalidade de otimizar o controlo de dados e a manutenção das máquinas industriais através de operação assistida com RA.

O trabalho aqui apresentado surge da necessidade de melhorar a eficiência, a acessibilidade à informação técnica e a qualidade dos processos de manutenção industrial, procurando colmatar as lacunas existentes no suporte aos operadores de manutenção durante intervenções. Neste sentido, este projeto centra-se na integração da RA com sistemas *Digital Twin*, de forma a facilitar e otimizar os processos de manutenção industrial. Este trabalho insere-se no âmbito do projeto TEXP@CT [75], cujo objetivo é promover um impulso significativo na adoção de tecnologias e soluções digitais inovadoras no setor têxtil e do vestuário.

De modo a testar e experimentar algumas das potencialidades da integração destas tecnologias, foi, inicialmente desenvolvido um protótipo experimental. Consistiu na utilização de uma aplicação de RA que auxilia o utilizador na operação de uma máquina de café integrada num sistema de *Digital Twin*. A aplicação, além de prestar assistência ao utilizador através da disponibilização de conteúdos multimédia em RA, inclui funcionalidades de consulta de dados em tempo real e de bidirecionalidade.

Os dados em tempo real provêm de sensores instalados na máquina, simulando os dados a obter de um equipamento num ambiente industrial. Já a bidirecionalidade, permite o controlo de ações físicas da máquina através da aplicação, simulando a tele-operação, frequentemente utilizada em fábricas reais, onde é necessário monitorizar e atuar remotamente sobre equipamentos com elevada precisão e eficácia.

Este trabalho preliminar serviu como base para o desenvolvimento da aplicação destinada a uma empresa têxtil denominada RIOPELE, como parte de um projeto mais abrangente, tendo sido selecionada a secção de fiação como caso de estudo. Este incluirá ainda funcionalidades de consulta de informações, assistência virtual e manutenção assistida com RA.

As consultas à base de dados permitem que a aplicação receba, em tempo real, informações sobre as diversas máquinas do setor de fiação, possibilitando que o operador realize, entre outras ações, o diagnóstico de eventuais problemas. A base de dados utilizada reúne informações detalhadas sobre o histórico de produções e eventos, bem como sobre o estado atual das máquinas, assegurando que operadores e técnicos de manutenção tenham acesso imediato aos dados necessários para uma atuação rápida e eficaz.

A assistência virtual será facilitada por um *chatbot*, desenvolvido paralelamente, que permitirá aos utilizadores interagir com a aplicação de forma natural e eficiente, solicitando informações ou diagnósticos sem a necessidade de interfaces complexas. Esta funcionalidade proporcionará uma experiência ao utilizador mais fluida e intuitiva, especialmente em ambientes de trabalho onde a rapidez e a eficiência são essenciais.

Além disso, a aplicação oferecerá uma componente de apoio à manutenção. Esta funcionalidade, que utilizará tecnologias de RA, permitirá não só a formação de operadores, possibilitando que aprendam e experimentem diferentes cenários de manutenção de forma segura, sem colocar em risco as máquinas reais, mas também o acompanhamento em tempo real durante intervenções de manutenção.

Para o desenvolvimento deste projeto, será necessário cumprir os seguintes objetivos:

- **Levantamento de conceitos, tecnologias e abordagens:** Será necessário fazer um levantamento de conceitos e tecnologias, assim como um estudo das principais abordagens utilizadas em sistemas de manutenção assistida por RA;
- **Desenvolvimento do primeiro sistema de RA:** Após a pesquisa será feita a exploração dos conceitos e ferramentas identificadas, de modo a implementar um protótipo funcional que permita validar as tecnologias selecionadas;
- **Teste do sistema desenvolvido:** Após o desenvolvimento do sistema, serão realizados testes de validação, de forma a avaliar a sua eficácia, usabilidade e desempenho;
- **Desenvolvimento do segundo sistema de RA:** Após feito o levantamento dos testes do primeiro sistema, será desenvolvido o sistema destinado à fábrica têxtil, devendo este incluir os seguintes sub-objetivos:

Consulta de dados em tempo real;

Integração de um *chatbot* com assistência virtual;

Apoio à manutenção de equipamentos.

- **Teste do sistema desenvolvido:** Após o desenvolvimento do sistema será necessário a realização de testes, desta vez aplicados a um público-alvo específico, e modo a validar a sua utilidade e adequação ao contexto industrial;
- **Avaliação e discussão de resultados:** Por fim após a realização dos testes, é feita a análise e discussão dos resultados obtidos pelo segundo sistema de RA, identificando pontos fortes, limitações e possíveis melhorias futuras.

1.3 Metodologia de Pesquisa

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a metodologia de *Design Science Research* (DSR), por se adequar particularmente a projetos que visam a criação e avaliação de artefactos tecnológicos inovadores com aplicação prática. Envolve processos bem definidos, como a concepção e avaliação dos artefactos produzidos, a produção de contribuições científicas e a apresentação dos resultados obtidos. Segundo [79] o desempenho dos projetos de DSR tem sido baseado em vários modelos de processo, sendo a abordagem mais referenciada a de [62], que inclui seis atividades:

- **Atividade 1. Identificação do Problema e Motivação:** Esta atividade define o problema específico de pesquisa e justifica o valor de uma solução. Neste caso o problema encontra-se na baixa eficiência na recolha de dados das diversas máquinas industriais, assim como, na falta de apoio que os técnicos possuem em realizar a manutenção das máquinas;
- **Atividade 2. Definir os Objetivos para uma Solução:** Os objetivos de uma solução podem ser inferidos a partir da definição do problema e do conhecimento do que é possível e viável. Ou seja, para este trabalho, o principal objetivo é criar uma aplicação de RA onde o utilizador possa visualizar as diversas informações das máquinas e consultar media necessário para a manutenção dos equipamentos;
- **Atividade 3. Design e Desenvolvimento:** Conceber e desenvolver a arquitetura para aplicação de RA;
- **Atividade 4. Demonstração:** Demonstrar as funcionalidades da aplicação de RA aos técnicos de manutenção de equipamentos, assim como, assegurar formação aos mesmos;
- **Atividade 5. Avaliação:** Aplicar a aplicação desenvolvida em casos de uso reais, de modo a validar a mesma, assim como obter as devidas opiniões sobre as soluções desenvolvidas;
- **Atividade 6. Comunicação:** Partilhar a importância do problema, a solução desenvolvida, a sua utilidade e eficácia. Isto pode ser alcançado através da publicação de artigos científicos em conferências ou revistas científicas.

1.4 Estrutura da Dissertação

A organização do trabalho elaborado é brevemente indicada neste sub-capítulo, juntamente com o conteúdo de cada um dos restantes capítulos. Os nove capítulos que compõem este trabalho são:

- **1. Introdução:** Este capítulo aborda o contexto, os objetivos e a metodologia de pesquisa utilizada para a realização deste trabalho. Além disso, é apresentada a estrutura organizacional de toda a dissertação;
- **2. Conceitos e Tecnologia:** O segundo capítulo discute os diversos conceitos que englobam a manutenção industrial, assim como, a representação de modelos e animações e os tipos de dispositivos de RA. Por fim será feita uma breve reflexão, de modo a serem tomadas conclusões sobre estes temas;
- **3. Trabalhos Relacionados:** No terceiro capítulo são apresentados um conjunto de trabalhos já realizados, relacionados com o desenvolvimento de aplicações de RA, com foco na área da indústria;

- **4. Arquitetura e Desenvolvimento do Sistema:** O quarto capítulo foca-se na apresentação das arquiteturas gerais de ambos os sistemas, explorando os seus diversos componentes. Além disso, é feita uma descrição das implementações dos sistemas, construídas com base nas suas arquiteturas, bem como as decisões tomadas e os processos de desenvolvimento envolvidos na elaboração dos mesmos;
- **5. Testes, Resultados e Discussão:** Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos testes dos componentes implementados no segundo sistema de RA. O desempenho da solução final é analisado e o respetivo grau de aceitação por parte dos utilizadores.
- **6. Conclusões e Trabalhos Futuros:** O sexto capítulo apresenta um resumo do trabalho realizado, discutindo os resultados alcançados e as contribuições produzidas, sugerindo possíveis continuações deste projeto;
- **7. Referências:** Este capítulo fornece uma lista das fontes consultadas durante a criação do projeto descrito neste documento;
- **8. Apêndices:** Neste capítulo encontram-se artigos publicados em conferências internacionais, bem como secções com pseudocódigo utilizado no apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

Conceitos e Tecnologia

Inicialmente este capítulo apresenta conceitos introdutórios integrados no contexto da Manutenção Industrial, como a Indústria 4.0 e 5.0 e as tecnologias de *Internet of Things* (IoT), *Digital Twin*, Realidade Virtual, bem como as técnicas de representação de processos industriais e breve contextualização sobre Manutenção Preditiva.

Além disso, é introduzida a tecnologia da Realidade Aumentada, bem como uma apresentação das técnicas de rastreamento utilizadas, o tipo de medias presentes em aplicações deste género e ainda, uma análise sobre dispositivos de RA, com foco nas suas funcionalidades e impactos durante a otimização dos processos de produção.

De seguida, é realizada uma revisão dos princípios fundamentais da representação de modelos e animações, com ênfase nos cuidados durante a modelação digital de objetos e ambientes físicos.

Por fim, as conclusões que sintetizam as principais ideias discutidas ao longo do capítulo, realçando a importância destas tecnologias na evolução da manutenção industrial e apontando resultados impactantes numa futura investigação e desenvolvimento.

2.1 Indústria 4.0 e 5.0

Ao longo do tempo, o setor industrial tem passado por sucessivas transformações, impulsionadas por avanços tecnológicos, económicos e sociais. Uma dessas evoluções está presente na transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, representando um avanço significativo na integração de tecnologias avançadas com a centralização do ser humano em processos industriais, de forma a responder a desafios e a antecipar necessidades futuras.

A Indústria 4.0 é impulsionada pela utilização de tecnologias avançadas, como Inteligência Artificial (IA), *Big Data* e IoT. Estas tecnologias permitem transformar os processos industriais tradicionais, exigindo um novo conjunto de habilidades e competências dos trabalhadores [85].

Porém, esta indústria também trouxe alguns problemas, como impactos ambientais promovidos pela utilização de processos menos sustentáveis, foco na eficiência industrial e o aumento significativo da desigualdade económica, devido à substituição da mão de obra menos qualificada por sistemas automatizados [67].

De forma a combater estas limitações, surge a Indústria 5.0, priorizando a colaboração entre humanos e máquinas, e colocando o ser humano com papéis centrais nos processos industriais [56]. Segundo os autores de [46], esta indústria prioriza a colaboração entre humanos e máquinas, utilizando para tal, tecnologias como IA e robôs colaborativos (cobots), de forma a promover resiliência, criatividade e bem-estar. Além disso, permite complementar e expandir a Indústria 4.0, enfatizando um equilíbrio entre eficiência tecnológica, inclusão social e responsabilidade ambiental [67].

2.2 Digital Twin

O conceito de *Digital Twin* refere-se à criação de uma réplica digital precisa de um objeto físico, sistema ou processo. Esta réplica é constantemente alimentada por dados do mundo real, permitindo uma análise detalhada e uma gestão eficiente. Segundo [87], estes dados podem ser adquiridos de diversas fontes, tais como sensores IoT, dados históricos, registos de manutenção e dados operacionais. O *Digital Twin* é amplamente utilizado em diversas indústrias, como manufatura, construção e saúde, devido à sua capacidade de simular, monitorizar e prever o comportamento de sistemas complexos em tempo real [32].

No setor têxtil, o *Digital Twin* assume um papel mais específico, relacionado com a criação de um modelo virtual detalhado de um produto ou processo têxtil. Este modelo é uma réplica exata do processo físico e é utilizado para simular, analisar e otimizar o desempenho e a produção dos produtos têxteis, permitindo testar diferentes cenários e prever resultados sem necessidade de protótipos físicos, economizando tempo e recursos. Além disso, esta abordagem contribui significativamente para uma melhoria da qualidade de toda a produção.

2.3 Business Process Model and Notation

Uma possibilidade para representar esses processos é através da utilização do modelo BPMN (*Business Process Model and Notation*). O modelo BPMN permite uma representação visual e precisa, utilizando símbolos gráficos intuitivos, dos diversos elementos e atividades que compõem um processo [1]. Através da utilização deste modelo, é possível alcançar uma compreensão clara e consistente dos processos de negócio. Este modelo é utilizado na arquitetura de manutenção inteligente [9], caracterizada como parte da "Indústria 4.0", ou seja, a integração de tecnologias avançadas na produção industrial para criar ambientes de manufatura mais inteligentes, eficientes e conectados [3]. É essencial representar adequadamente todos os processos abrangidos, antes do desenvolvimento do sistema *Digital Twin*.

2.4 Internet of Things

Rede de dispositivos físicos interconectados que recolhem e partilham dados através da Internet. Estes dispositivos podem variar desde sensores simples até sistemas complexos de

máquinas, trabalhando em conjunto para otimizar processos e melhorar a eficiência. Na indústria têxtil, a IoT utiliza sensores conectados e dispositivos inteligentes para monitorizar e controlar processos de produção em tempo real, transformando a gestão dos inventários e a manutenção das máquinas. No entanto, a aplicação da IoT requer uma infraestrutura de dados abrangente para a aquisição, roteamento, fusão e armazenamento dos dados. As máquinas de produção precisam de interfaces adequadas para tornar os seus dados acessíveis, exigindo, assim, uma adaptação fundamental das infraestruturas técnicas e digitais das empresas [63].

2.5 Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva utiliza técnicas de análise de dados e algoritmos de aprendizagem de máquina para prever falhas em equipamentos antes que elas ocorram. Este tipo de manutenção é essencial para minimizar interrupções inesperadas e reduzir custos operacionais. Algoritmos como o *Linear Regression*, presente na figura 2.1, são comumente utilizados para analisar dados históricos e identificar padrões que indicam a necessidade de intervenção [45].

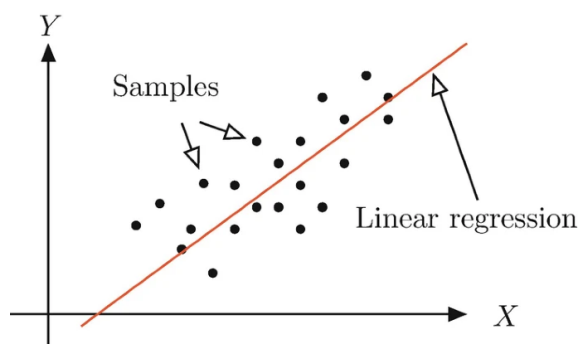


Figura 2.1: Cálculo de previsões com o algoritmo *Linear Regression* [84].

2.6 Realidade Virtual

A Realidade Virtual é uma tecnologia que cria um ambiente virtual simulado, permitindo aos utilizadores interagir com um mundo 3D que pode ser semelhante ou completamente diferente do mundo real. Num contexto industrial, a RV é utilizada para treino industrial, abordando questões como altos custos de treino, tempo de produção e riscos de segurança na fabricação industrial. Um exemplo é apresentado no artigo [49], no qual os autores descrevem um sistema que cria um ambiente virtual realista, facilitando operações visuais, demonstrações de processos, feedback interativo e identificação de erros para a formação de utilizadores. Os principais componentes incluem a reprodução de ambientes de produção reais e a entrada de dados multidimensionais. Este sistema demonstra resultados como uma melhor formação dos trabalhadores, o aumento da segurança industrial e melhorias na eficiência e na qualidade da produção.

Adicionalmente, a RV também pode ser utilizada em conjunto com tecnologias de *Digital Twin*, permitindo que um utilizador interaja diretamente num ambiente real através de um ambiente

virtual. No artigo [88], os autores discutem um sistema que integra estas tecnologias para melhorar a interação homem-máquina numa fábrica inteligente. Os principais componentes incluem um braço robótico de seis eixos, um sistema de óculos de RV, um sistema de *Digital Twin* e algoritmos de IA para reconhecimento de imagens. O sistema permite a sincronização de movimentos em tempo real entre modelos físicos e digitais, melhorando a formação do operador e o desempenho das diversas tarefas. Os testes realizados com este sistema destacam o seu potencial para melhorar a eficiência e a experiência dos utilizadores em ambientes semelhantes.

2.7 Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada é uma tecnologia que integra informações digitais com o ambiente físico, oferecendo uma experiência enriquecida ao utilizador, onde elementos virtuais se misturam com o mundo real, em tempo real. No contexto industrial, a RA tem vindo a ganhar destaque como uma ferramenta poderosa para otimizar diversos processos. Ao sobrepor instruções visuais e informações contextuais diretamente no campo de visão dos trabalhadores, a RA facilita a realização de tarefas complexas, como a manutenção de equipamentos, reparações e operações industriais.

Estudos apontam que a utilização da RA em ambientes industriais pode aumentar significativamente a eficiência e a precisão das tarefas de manutenção. Isto contribui para a redução de erros humanos e diminui o tempo necessário para completar uma tarefa. Como resultado, a RA pode reduzir consideravelmente o tempo de inatividade das máquinas, um dos maiores fatores de perda de produtividade na indústria moderna. Ao diminuir os tempos de interrupção para manutenção, as empresas podem melhorar a continuidade operacional e, consequentemente, a sua rentabilidade [54].

O acesso à RA é facilitado por uma ampla gama de dispositivos, como smartphones, tablets e, mais recentemente, óculos de RA. Esse tipo de interação simultânea com o mundo físico e digital proporciona um aumento da produtividade e da segurança, uma vez que os trabalhadores conseguem manter a atenção nas tarefas enquanto acedem a dados relevantes.

A tecnologia de RA abrange diferentes métodos de rastreamento, sendo os mais comuns baseados em imagens, marcadores e modelos. O rastreamento por imagem utiliza imagens específicas para posicionar elementos digitais no ambiente real. Devido à sua elevada personalização, os autores de [23] consideram este método mais flexível em comparação com abordagens mais tradicionais. O rastreamento por marcadores refere-se à utilização de um conjunto de imagens padronizadas, utilizadas como referência para deteção e posicionamento. Já a deteção baseada em modelos recorre à correspondência entre objetos físicos e as suas réplicas digitais. Este método, segundo [76], tende a proporcionar experiências mais imersivas, interessantes e cativantes do que os restantes.

2.7.1 Técnicas de Rastreamento

O rastreamento em Realidade Aumentada pode ser realizado por diferentes técnicas, geralmente classificadas em dois grandes grupos: técnicas com marcadores e técnicas sem marcadores. Cada abordagem apresenta características diferentes que devem ser consideradas em função do contexto de utilização.

1. Técnicas Com Marcadores:

- **Imagens:** Identificação de imagens reais e específicas por meio de câmaras e algoritmos de visão computacional para rastreamento e posicionamento de conteúdo digital no ambiente;
- **Marcadores padronizados:** Uso de marcadores visuais padronizados, como códigos QR [33] ou tags fiduciais como ARTags [25] e Vumarks [81], que servem como pontos de referência física para alinhar objetos virtuais com o mundo real;

2. Técnicas Sem Marcadores:

- **Global Navigation Satellite Systems (GNSS):** O GNSS permite o rastreamento da posição do utilizador ou de objetos em relação a coordenadas geográficas, geralmente utilizando GPS ou sistemas de localização interna;
- **Structure from Motion (SfM):** Técnica baseada em visão computacional, utilizada na reconstrução de um ambiente 3D digital a partir de múltiplas imagens reais capturadas;
- **Reconhecimento de Modelos/CAD-based (Computer-Aided Design):** Permite o reconhecimento de objetos tridimensionais baseados em modelos digitais preconcebidos, permitindo que o sistema de RA interaja com elementos específicos do ambiente real;
- **Profundidade:** Utilização de sensores de profundidade, equipados com tecnologias como o *Light Detection And Ranging* (LiDAR) [53], de modo a fazer o mapeamento tridimensional de um ambiente.

A escolha na utilização destas técnicas de rastreamento deve ter em conta fatores como a luminosidade. Técnicas, pertencentes a métodos sem marcadores, como profundidade ou GNSS tendem a ser menos sensíveis a variações de luz, tornando-as mais adequadas a situações em ambiente exteriores ou de luminosidade variável. Já em situações, de ambientes de iluminação controláveis, técnicas pertencentes a métodos com marcadores, podem se tornar mais vantajosos, visto que são mais fáceis de desenvolver e apresentam uma maior precisão de deteção, quando comparados com métodos com marcadores [13].

2.7.2 Conteúdos em Realidade Aumentada

A RA permite a sobreposição de diversos conteúdos media sobre o ambiente físico, permitindo ao utilizador interagir com o mundo real a partir de um ambiente digital, auxiliando em tarefas e, segundo [57], complementando atividades do mundo real. A utilização destes conteúdos media pode ser efetuada de forma isolada ou combinada, dependendo dos objetivos da aplicação, sendo que os tipos de media mais utilizados são:

- **Imagens:** Elementos visuais estáticos, onde se podem incorporar esquemas, diagramas técnicos ou fotografias, que quando sobrepostos ao ambiente físico, apoiam a compreensão de componentes ou processos.
- **Modelos 3D:** Utilização de objetos tridimensionais, permitindo ao utilizador explorar as suas geometrias e estruturas. Estes elementos são muitas vezes animados, possibilitando a ilustração de processos ou fluxos operacionais.
- **Documentos/Texto:** Ficheiros de texto, fichas técnicas ou manuais que podem ser consultados diretamente no ambiente de RA.
- **Áudios:** Incorporação de sons ou narrações, de forma a fornecer instruções ou *feedbacks* auditivos, sendo utilizados maioritariamente como complemento a outros tipos de media.
- **Vídeos:** Conteúdos audiovisuais que podem apresentar instruções passo a passo, demonstrações de procedimentos ou treinos técnicos.

2.7.3 Dispositivos

Os dispositivos de realidade aumentada são ferramentas essenciais na implementação de tecnologias avançadas em ambientes industriais. Estes dispositivos permitem sobrepor informações digitais ao ambiente físico, enriquecendo a perceção do utilizador e facilitando a interação com o mundo real.

Existem vários tipos de dispositivos de RA, cada um com características específicas. Segundo [12], podemos dividi-los em *displays* e dispositivos de input.

1. Displays

Esta categoria pode ser subdividida em três tipos principais de *displays*:

- **Displays Colocados na Cabeça (HMD):** É um dispositivo utilizado na cabeça, normalmente como parte de um capacete, que sobre põe imagens do ambiente real e virtual à visão do utilizador. O HMD pode ser *video-see-through*, onde duas câmaras capturam e processam a imagem real e virtual para uma resolução precisa, ou *optical-see-through*, que usa visores semitransparentes para sobrepor informação gráfica à visão do utilizador, embora a sincronização entre o real e o virtual possa ser menos precisa, nesta solução;

- **Displays de Mão:** *Displays* que possam ser segurados pela mão do utilizador. Utilizam a técnica *video-see-through* em conjunto com outros sensores, como a bússola ou o GPS para uma colocação precisa do conteúdo digital no ambiente real;
- **Realidade Aumentada Espacial (SAR):** Utilização de um projetores de vídeo, hologramas, frequências de rádio e outras tecnologias, de modo a direcionar informação digital diretamente nos objetos físicos sem a necessidade de carregar ou utilizar diretamente os dispositivos de RA;

2. Dispositivos de Input

São uma evolução dos *displays*, permitindo uma interação bidirecional entre o utilizador e o dispositivo. Sendo os mais comuns os *displays* com tela sensível ao toque. Atualmente, são amplamente utilizados em várias indústrias.

Em ambientes industriais, devido às suas exigências e características específicas, os dispositivos mais comuns são:

- **Óculos de Realidade Aumentada:** Dispositivos portáteis que permitem ao utilizador visualizar informações digitais com um grande grau de praticidade e imersão. Estes óculos são particularmente úteis em tarefas que exigem as mãos livres, proporcionando maior liberdade de movimentos durante a utilização de aplicações de RA, como em situações de inspeção ou manutenção de equipamentos e respetivos componentes.
- **Dispositivos Móveis:** Dispositivos como smartphones e tablets também podem ser utilizados como dispositivos de RA através do desenvolvimento de aplicações específicas. A utilização deste tipo de aparelhos é uma opção prática e acessível, uma vez que muitos trabalhadores, além de os possuírem, já estão familiarizados com a sua utilização no dia a dia. Outra vantagem deste tipo de dispositivos reside no fator económico, dado que, na maioria dos casos, reduzem a necessidade de investimento em novos equipamentos.

2.8 Representação de Modelos e Animações

A representação de modelos e animações desempenha um papel fundamental na criação de sistemas digitais avançados, particularmente neste contexto da manutenção industrial e da realidade aumentada e virtual. A capacidade de criar modelos tridimensionais detalhados e animações realistas é essencial para uma melhor visualização e simulação de processos, permitindo uma melhor compreensão e otimização das diversas operações industriais.

2.8.1 Modelação

A modelação 3D refere-se ao processo de criação de representações digitais tridimensionais de objetos, sistemas ou ambientes físicos. Estes modelos podem ser utilizados em várias

aplicações industriais, desde a simulação de processos de fabrico até à criação de réplicas digitais de equipamentos para fins de manutenção.

A modelação pode abranger vários níveis de detalhe, sendo estes determinados pela forma como o modelo é desenvolvido e pelo objetivo para o qual é criado. Para isso, podem ser utilizados softwares específicos para obter modelos com um grau de detalhe elevado, ou os modelos podem ser desenvolvidos de forma completamente manual [48].

Segundo os autores de [7], durante a aquisição e desenvolvimento de modelos 3D digitais, algumas regras devem ser respeitadas, tais como:

- **Filtragem e Simplificação de Informação:** Remoção de informações e/ou secções do modelo que não sejam relevantes, de forma a otimizá-lo;
- **Integração de Pontos de Vista:** Devem ser integrados no modelo final todos os pontos de vista, ou seja, durante a captura do modelo, devem ser consideradas todas as suas faces e lados;
- **Reconstrução de Superfícies:** Caso o modelo tenha sido gerado com a ajuda de um software específico, deve ser realizada uma reconstrução, manual ou não, das superfícies mais carentes;
- **Deteção de Características Especiais:** Algumas partes do modelo podem ser identificadas como únicas e diferentes, necessitando assim, de ajustes. Pode ser necessário adaptar o seu tamanho, posição, contornos e/ou texturas;

2.8.2 Animações

As animações complementam a modelação ao adicionar movimento e interação aos modelos. Através de animações, é possível simular o funcionamento de máquinas, processos de produção, e cenários de manutenção, proporcionando uma visualização dinâmica que facilita a compreensão dos processos em questão [47]. A utilidade das animações acentuam-se em contextos de formação, onde a visualização do funcionamento de uma máquina em tempo real pode ajudar os trabalhadores a compreender melhor os diferentes procedimentos operacionais e de manutenção.

2.9 Conclusão do Capítulo

Este capítulo oferece uma estrutura teórica, de modo a procurar melhorar a compreensão do leitor sobre as características únicas e sobre os componentes que envolvem o mundo da realidade aumentada aplicada a ambientes industriais. A investigação teórica dos diversos fundamentos que abrangem este tema permite, não só, um melhor entendimento sobre a RA, como cria uma base de estudo das restantes tecnologias que a envolvem.

Além disso, a identificação do tipo de técnicas de rastreamento e media utilizados em aplicações deste tipo, em conjunto com a categorização de dispositivos de RA, permitem uma

maior clareza na escolha de ferramentas adequadas ao contexto industrial. A identificação criteriosa destes elementos e das suas funcionalidades específicas não só facilita a seleção de tecnologias, como também reforça o impacto positivo da RA na produtividade e na capacitação de trabalhadores.

Por fim, é feita a discussão sobre a representação de modelos e de animações neste contexto, bem como os cuidados a ter durante a representação 3D digital de componentes.

O capítulo seguinte apresenta uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar e analisar investigações relacionadas com a aplicação da RA na manutenção em ambientes industriais.

Capítulo 3

Trabalho Relacionado

Neste capítulo, é realizada uma revisão sistemática da literatura para identificar pesquisas sobre Realidade Aumentada, as suas diversas formas de aplicação e a aplicação dessa tecnologia na manutenção industrial. Após a análise detalhada de cada um dos estudos escolhidos, é realizada uma comparação para determinar e discutir as abordagens que foram adotadas.

3.1 Revisão sistemática

Como existem tantas variáveis e complexidades nos processos industriais, não é fácil criar um sistema universal para a manutenção de equipamentos e, como resultado, a grande maioria das soluções já implementadas concentram-se em aplicações específicas para problemas concretos ou para determinados setores industriais.

Ao implementar soluções de manutenção, é necessário um sistema que permita aos técnicos visualizar e compreender sequências de instruções de forma clara e acessível, sem depender exclusivamente de manuais técnicos volumosos ou de uma extensiva formação. Além disso, é essencial traduzir informações técnicas detalhadas em formatos interativos e visuais, uma vez que os métodos tradicionais podem ser mais difíceis de interpretar em ambientes de produção exigentes.

Como a execução de tarefas de manutenção exige instruções precisas e compreensíveis, o uso de tecnologias como a Realidade Aumentada tem-se tornado numa solução cada vez mais popular.

A maioria das aplicações de RA voltadas para o ambiente industrial utilizam uma junção de ferramentas diferentes. Divergindo as mesmas, desde modelos para visualização e comunicação de dados, como o *Digital Twin*, até ferramentas para a criação de modelos 3D como o Blender [26] e o Autodesk Maya [38]. Para a criação das plataformas de RA em si, existem plataformas, tal como o Unity [74], que o permitem.

Utilizando a metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA) [60], foi realizada uma análise da literatura existente que se centra na utilização da RA na manutenção industrial. Para localizar as publicações de pesquisa, foram utilizadas as bases de dados do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e da

Scopus. Os termos "*industrial maintenance*" e "*augmented reality*" foram combinados e utilizados para a pesquisa. Os critérios de inclusão englobaram as combinações de palavras-chave previamente listadas e publicações posteriores ao ano de 2019, já que a maioria das tecnologias desenvolvidas antes desse ano são desatualizadas ou não suportadas.

Primeiramente foi efetuada uma pesquisa nas bases de dados do IEEE e da Scopus, que resultou num total de 511 artigos, dos quais 71 foram removidos devido a duplicação, resultando em uma identificação de 440 artigos para análise. Esses artigos foram, posteriormente, filtrados com base no seu título, palavras-chave e resumo. Os critérios de exclusão aplicados, que incluíram a exclusão de todo o tipo de estudos relacionados com revisões de literatura, com foco principal na tecnologia de realidade virtual ou cujo contexto era inadequado para a pesquisa, permitiram a eliminação de um total de 355 estudos diferentes.

Finalmente, 85 artigos passaram por uma análise completa e foram considerados elegíveis ou rejeitados com base em critérios específicos. Esses critérios incluíram resultados avaliados cujo conteúdo não era pertinente para o estudo ou inacessível, falta de dados originais sobre a componente de desenvolvimento ou foco na vertente de detecção de objetos. Isso levou à seleção de 16 publicações, duas das quais estavam associadas ao mesmo projeto. Consequentemente, 15 publicações distintas foram identificadas, a partir do conjunto de artigos selecionados. Todo o processo é apresentado na Figura 3.1.

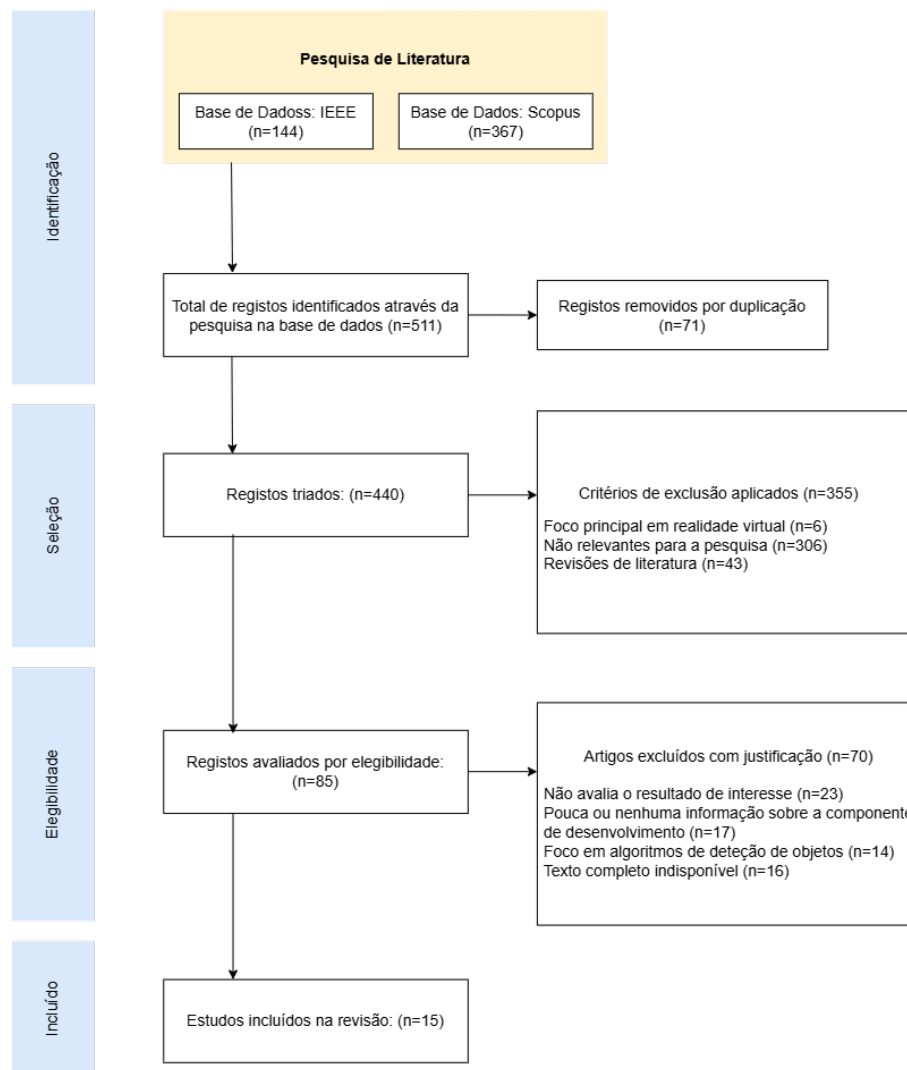


Figura 3.1: Processo de pesquisa do trabalho relacionado.

3.2 Trabalhos relacionados

Os autores [3, 10] propõem um sistema baseado em RA para apoiar procedimentos de manutenção industrial numa unidade de produção de componentes automóveis, alinhado com os princípios da Indústria 4.0. O sistema utiliza a plataforma Unity, reconhecida pelo seu suporte ao desenvolvimento em 2D e 3D, e integra o SDK Vuforia [39] para implementar um sistema baseado em marcadores de RA. O motor de jogo Unity foi escolhido devido à sua capacidade de criar aplicações multiplataforma leves e rápidas, além de oferecer uma base robusta para desenvolvimento, utilizando a linguagem C# [35]. O sistema combina a interação através de RA, que guia o operador em tarefas de manutenção, com suporte de diferentes tipos de media, como textos, vídeos e modelos 3D, e uma base de dados em MySQL [59] para recolha de dados operacionais. A aplicação opera tanto em dispositivos móveis, smartphones ou tablets, como em óculos inteligentes, sendo neste caso, escolhidos os Microsoft HoloLens, permitindo a sua

utilização num modo de mãos-livres. O uso do Vuforia permite rastrear marcadores de forma a iniciar os procedimentos de manutenção. Além disso, o sistema oferece dois modos distintos: o modo de treino e o modo de execução. O modo de treino permite que os operadores pratiquem algumas etapas, antes de realizarem tarefas diretamente nas máquinas reais. No modo de execução, a aplicação guia os utilizadores em tempo real, fornecendo assistência visual e garantindo que os passos sejam seguidos corretamente. Na Figura 3.2, é apresentada a interface do sistema, assim como as etapas pendentes para finalizar uma tarefa.



Figura 3.2: Interface Maintenance 4.0 de um processo de manutenção [10].

A formação de operadores em ambientes fabris também foi abordada no artigo [83], onde, é igualmente proposta, uma aplicação de RA para auxiliar na formação da operação do processo de corte por fio em máquinas EDM (Electrical Discharge Machine). A aplicação utiliza modelos 3D criados no CATIA V5[70] e animações desenvolvidas no Blender, de forma a ilustrar os diferentes componentes e passos necessários para operar com o equipamento. Estes elementos foram posteriormente integrados num projeto Unity 3D com o SDK Vuforia, resultando numa aplicação capaz de projetar informações e instruções sobre uma máquina EDM. As funcionalidades principais da aplicação centram-se na visualização de setas direcionais em 3D, textos explicativos e vídeos. Ao invés de utilizarem marcas, normalmente escolhidas devido à sua facilidade de criação em grande número, os autores preferiram a utilização de imagens alvo, ou seja, predefiniram um conjunto de imagens, neste caso QR Codes, como alvos de deteção pelo Vuforia. Esta abordagem foi utilizada devido à utilização de um baixo número de imagens alvo. Os testes foram realizados com 26 estudantes de engenharia mecânica, onde foi possível observar uma melhoria significativa na compreensão e execução das diferentes tarefas, em especial, aqueles sem, ou com pouca experiência prévia. Além disso, a aplicação mostrou-se importante no aumento da motivação e do envolvimento dos utilizadores durante o processo de aprendizagem. Estes resultados destacam o potencial da RA em transformar a formação técnica e

industrial, tendo um grande papel na simplificação dos processos e explicação de conceitos técnicos complexos.

O artigo [8] apresenta um sistema *Digital Twin* que integra a tecnologia da RA para apoiar cenários de manutenção preditiva na indústria química. Este sistema inclui funcionalidades como: a navegação macro, ou seja, a identificação de locais na planta através de um sistema GPS; identificação de componentes com RA; visualização de diagramas de tubagens e instrumentação (P&ID); atualização de modelos digitais com base em discrepâncias entre dados CAD e a planta real; e a integração de informações adicionais, como dados de sensores em tempo real. O protótipo foi desenvolvido utilizando o ambiente de desenvolvimento Unity 3D, em conjunto com a framework ARFoundation [71] para as funcionalidades de RA, sendo testado em dispositivos móveis. No futuro, os autores pretendem integrar uma ligação automática entre a aplicação e uma base de dados.



Figura 3.3: Exemplo de funcionalidades em interfaces de realidade aumentada para *Digital Twins* [8].

Em [64], os autores descrevem que, todos os dias, trabalhadores de manutenção urbana enfrentam situações frustrantes no que diz respeito à necessidade de informações que não estão prontamente acessíveis ou da realização de manutenções em equipamentos cujas instruções estão desatualizadas, parcialmente destruídas ou inexistentes. Tendo isso em consideração, foi desenvolvida uma aplicação de RA que utiliza dispositivos móveis para rastrear equipamentos urbanos e apresentar informações relevantes, tais como dados em tempo real ou instruções passo a passo para tarefas de manutenção. Adicionalmente, foi concebida uma aplicação desktop auxiliar, de nome "Archer", que permite a criação e gestão das instruções que serão exibidas na app móvel. Este sistema introduz o conceito de checkpoints de RA, ou seja, pontos estratégicos ao longo das tarefas de manutenção que asseguram o rastreamento estável, mesmo quando os equipamentos sofrem alterações durante o processo. Para determinar automaticamente a localização ideal desses checkpoints, foram utilizados *Raycasts* [65], que permitem projetar raios em diferentes direções a partir de um determinado ponto de vista pré-definido. Este processo

permite analisar, quer o grau de visibilidade dos modelos 3D, quer se o rastreamento poderá ser comprometido, devido a alterações no equipamento. Por fim, os testes realizados demonstraram uma grande precisão e usabilidade do sistema, destacando o potencial da tecnologia de RA para melhorar os fluxos de trabalho, aumentar a eficiência e reduzir erros nas operações de manutenção urbana.

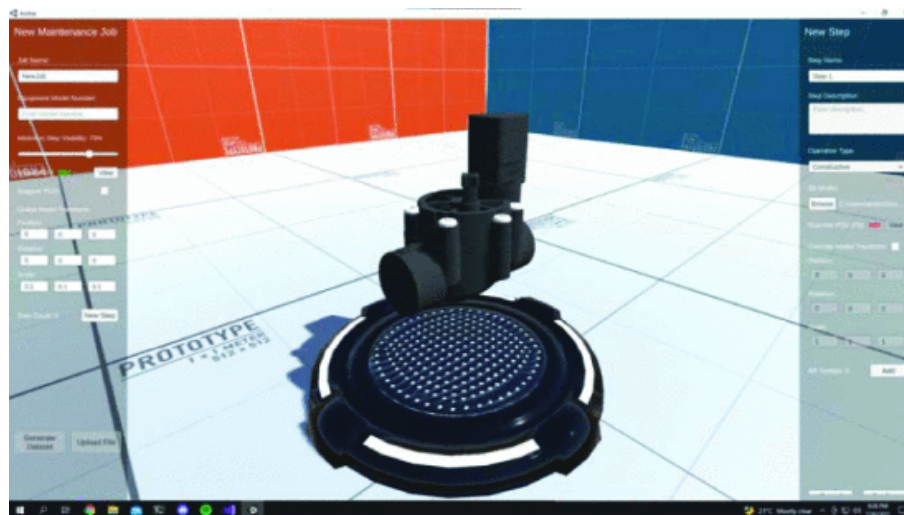


Figura 3.4: Criação de uma tarefa na plataforma “Archer” [64].

O artigo de Sebastian Knopp, Philipp Klimant e Christoph Allmacher [41] explora a aplicação da tecnologia de RA em conjunto com os óculos Microsoft HoloLens [52], para orientação industrial na montagem e desmontagem de moldes modulares de cimento. Para combater adversidades no reconhecimento de objetos, como ambientes sujos ou componentes desgastados, os autores propuseram uma abordagem com um sistema de marcas, assegurando assim, um rastreamento fiável. Este sistema incorpora uma interface de mãos livres que utiliza interações por gestos, permitindo que os trabalhadores naveguem nas tarefas de forma fluida. A interface é dinamicamente ajustada, reposicionando os menus, sempre, dentro do campo de visão do utilizador, conforme este se movimenta. Para cada ação foi associado um gesto diferente, como por exemplo, para a alteração do passo de manutenção é necessário realizar o gesto de *click* do HoloLens [22]. Em situações que exigem assistência remota, o sistema inclui uma funcionalidade de transmissão em tempo real. Através da capacidade de streaming integrada do HoloLens, e com uma alta resolução e baixa latência, os especialistas podem visualizar a perspetiva do trabalhador, incluindo conteúdos de RA. Com a utilização desta abordagem, os autores afirmam que é possível eliminar ineficiências presentes nos métodos tradicionais, de partilha de imagens e acelerar a resolução de problemas. Testes anteriores demonstraram que a utilização deste tipo de sistemas pode reduzir o tempo de manutenção de moldes modulares em até 30%, principalmente devido à redução do tempo de inatividade.

Os autores de [4] descrevem a implementação de uma aplicação baseada em RA para a análise dos movimentos utilizados em processos de montagem manuais. Esta abordagem é utilizada não

apenas como uma ferramenta educativa, permitindo a visualização de instruções de montagem sobrepostas ao ambiente real, mas também como um método de análise da eficiência e precisão dos movimentos executados durante o processo de montagem. A aplicação pode ser utilizada através de dois dispositivos, sendo o primeiro um dispositivo móvel Android [50]. Neste, a detecção de objetos é realizada com recurso ao SDK do Vuforia, a partir dos seus modelos 3D, permitindo a apresentação de instruções de montagem em tempo real. Ou então, utilizando o dispositivo móvel apenas para o rastreamento do modelo, e proceder à visualização de instruções num ecrã de um computador, tal como ilustrado na Figura 3.5. Para a análise dos movimentos, foram utilizadas câmaras estrategicamente posicionadas e orientadas para as mãos do operador. Os movimentos são capturados e posteriormente analisados em formato de vídeo, codificado de acordo com o modelo MODAPTS [14], com o objetivo de calcular tempos padrão e identificar penalizações associadas ao esforço físico e cognitivo. Os resultados demonstraram que esta abordagem é mais eficaz do que a utilização de instruções em papel, proporcionando uma melhoria na compreensão das tarefas e na análise ergonómica de processos.

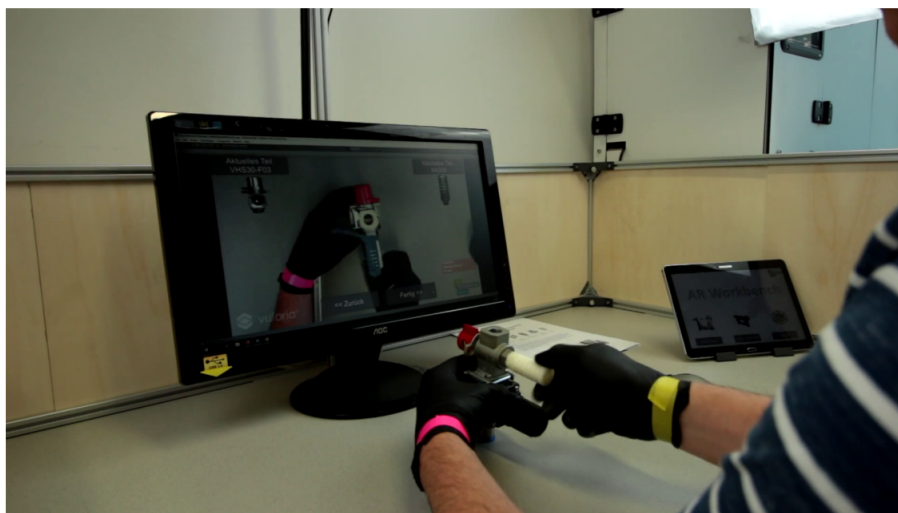


Figura 3.5: Instruções de um processo de montagem utilizando o display do computador [4].

Em [78], é explorado um sistema de execução assistida de testes de segurança, que junta a RA e documentos de engenharia eletrónica (E-CAD), no apoio a técnicos na realização de inspeções periódicas em máquinas industriais. O sistema permite a extração automática de dados diretamente dos esquemas elétricos, eliminando a necessidade de criação de modelos de teste, especificamente para cada uma das variantes dos equipamentos. A aplicação, desenvolvida em Unity em conjunto com o SDK do Vuforia, oferece funcionalidades que facilitam a consulta dos diagramas elétricos e a identificação de componentes críticos para os testes de segurança, através da sobreposição de informações visuais no ambiente físico, tal como, por exemplo, a criação de destaques visuais em certos componentes de uma máquina, como é possível verificar na Figura 3.6. Esta abordagem demonstrou melhorar a precisão e a eficiência dos testes de segurança, tornando-os acessíveis a técnicos com diferentes níveis de experiência. Além disso, o sistema reduziu significativamente

o tempo de preparação e de execução de testes, com a minimização de erros humanos. Porém, alguns desafios foram identificados, tais como dificuldades no rastreamento devido a iluminação inadequada.

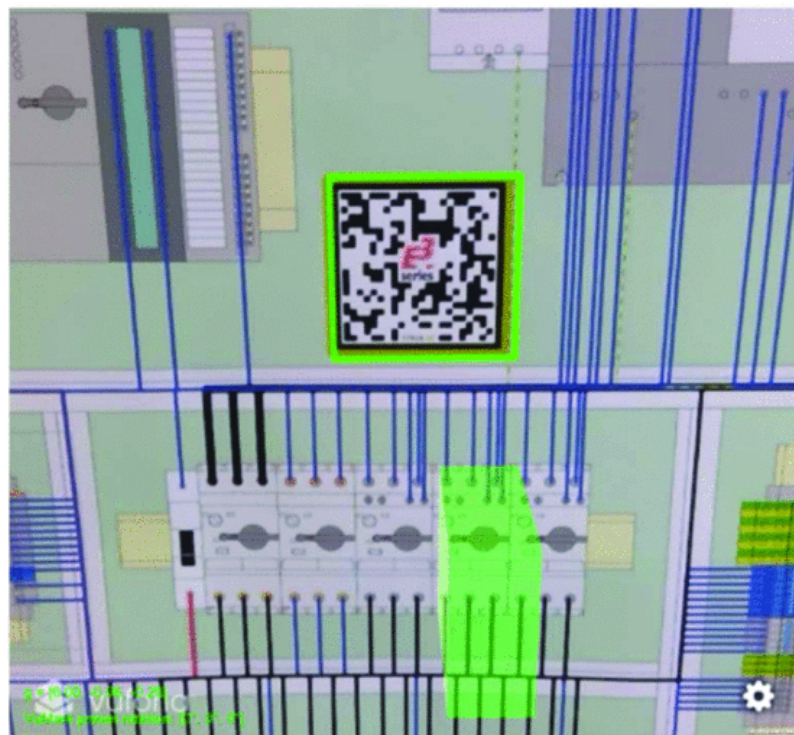


Figura 3.6: Rastreamento de um VuMark e componente em destaque [78].

O artigo [24] apresenta o desenvolvimento de um sistema de controlo e manutenção para um contador de pedras, que tem como objetivo ser facilmente replicado por pequenas empresas, assim como, apresentar um baixo custo de desenvolvimento. Através do uso de ferramentas como o Unity e o Vuforia foi possível desenvolver a aplicação de RA, em conjunto, com uma base de dados SQLite [17] para a gestão local de dados. Além disso, foi utilizado um micro-controlador (Atmega328p) para controlo dos sensores e atuadores, que alimentam a base de dados. Através da aplicação desenvolvida é possível visualizar informações em tempo real, como o estado dos sensores e atuadores, e realizar operações de manutenção com o auxílio da RA, tais como, etiquetas e textos explicativos. De modo, a assegurar o baixo custo e uma implementação simples deste sistema, foi utilizado o Bluetooth como sistema de comunicação, entre o micro-controlador e a aplicação. Os testes realizados demonstraram que o sistema conseguiu reduzir o tempo de operação em até 80% e manter uma precisão de contagem com erro inferior a 1%.

Em [61], os autores apresentam uma aplicação integrada num sistema *Digital Twin*, para uma impressora 3D, controlado através de RA. A aplicação desenvolvida exibe diversos parâmetros da impressora, tais como coordenadas do cabeçote de impressão, temperaturas do *hot-end* e da mesa de impressão, bem como a percentagem indicativa do progresso da impressão em tempo real. Além disso, a interface permite ao utilizador controlar as funções essenciais da impressora,

como iniciar e pausar impressões ou aquecer componentes. Para a comunicação bidirecional foram utilizados protocolos como o MQTT e o HTTP, que garantiram uma transmissão de dados eficiente entre o dispositivo físico e o digital. A aplicação foi desenvolvida utilizando o motor de jogos Unity, em conjunto com o Vuforia. Para desenvolver o modelo CAD da impressora, foi utilizado o Autodesk Fusion 360 [36] e para gerir a comunicação de dados entre a impressora e o seu *Digital Twin* foi usado o Node-RED [29]. Os autores acreditam que esta abordagem pode ser adaptada a vários outros dispositivos industriais, utilizando diferentes modelos CAD 3D de objetos físicos e adaptando a interface para novos objetos.

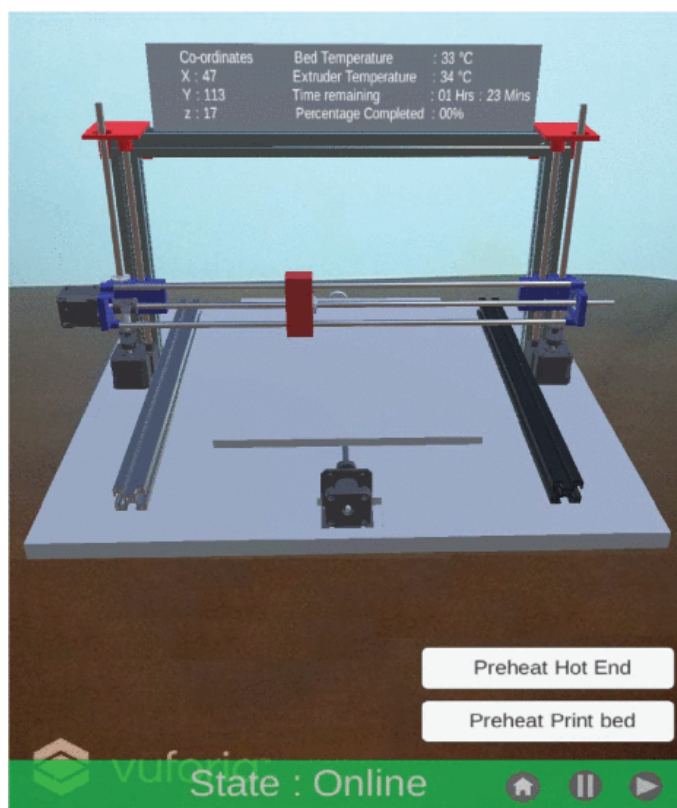
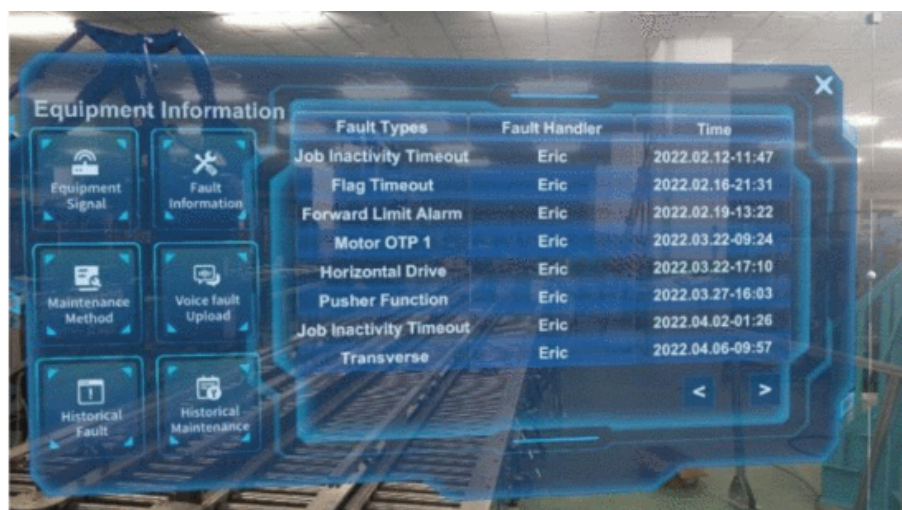


Figura 3.7: Interface da aplicação de RA [61].

Os autores em [86] reconhecem que os métodos mais tradicionais de manutenção não têm conseguido acompanhar o crescente aumento da complexidade dos sistemas industriais modernos, resultando em uma baixa eficiência, aumento de custos e numa maior probabilidade de erros humanos. Para abordar estes problemas, propõem um sistema de manutenção de equipamentos direcionado para oficinas industriais, cuja interface é demonstrada na Figura 3.8, tendo sido desenvolvido para os óculos de RA HoloLens. Este sistema utiliza uma combinação de tecnologias, que inclui: o SDK do Vuforia, para o reconhecimento de equipamentos através dos seus modelos 3D; o Unity 3D para desenvolvimento da interface da aplicação; a *Application Programming Interface* (API) do Baidu AI Cloud [16], para reconhecimento de voz; o MR-WebRTC [19], para assistência remota, através de vídeo assistência; o Mixed Reality Toolkit (MRTK) [18], para a interação intuitiva baseada em gestos e comandos de voz e por fim, foi

utilizada uma API Web, que permite a transmissão de dados de cada equipamento para o HoloLens. De modo a utilizar o sistema, os trabalhadores devem fazer um reconhecimento dos equipamentos, através da aplicação, disponibilizando assim as funcionalidades de aceder a dados operacionais em tempo real e visualizar vídeos de manutenção diretamente sobrepostos ao equipamento físico. Outras funcionalidades incluem a possibilidade de vídeo assistência com outros operadores, a utilização do reconhecimento de voz para criar e armazenar relatórios de falhas, que em seguida são armazenados numa base de dados para futura análise.



Fault Types	Fault Handler	Time
Job Inactivity Timeout	Eric	2022.02.12-11:47
Flag Timeout	Eric	2022.02.16-21:31
Forward Limit Alarm	Eric	2022.02.19-13:22
Motor OTP 1	Eric	2022.03.22-09:24
Horizontal Drive	Eric	2022.03.22-17:10
Pusher Function	Eric	2022.03.27-16:03
Job Inactivity Timeout	Eric	2022.04.02-01:26
Transverse	Eric	2022.04.06-09:57

Figura 3.8: Histórico de manutenções realizadas numa oficina industrial [86].

Em [55], os autores propõem um sistema de assistência remota à manutenção de equipamentos com recurso a RA, aplicado ao contexto da Indústria 4.0. Este sistema, semelhante ao anteriormente descrito, foi igualmente desenvolvido com recurso ao Unity, ao SDK do Vuforia e ao MRTK, tendo sido implementado exclusivamente para o dispositivo de RA Microsoft HoloLens. A solução integra uma plataforma *cloud* que permite comunicação bidirecional, incluindo transmissão de vídeo em tempo real a partir do campo de visão do técnico. Desta forma, o engenheiro remoto pode visualizar o ambiente real e projetar conteúdos 3D interativos diretamente no campo de visão do utilizador. Uma das vantagens do sistema é a eliminação da necessidade de preparar previamente cenas de RA, tornando o processo mais dinâmico e adaptável a diferentes cenários de falha ou manutenção. Testes realizados como os ilustrados em 3.9 demonstraram que, para além de promover a eficiência operacional, o sistema contribui para a redução de custos, minimização de erros operacionais e eliminação de tempos de deslocação e inspeções desnecessárias.

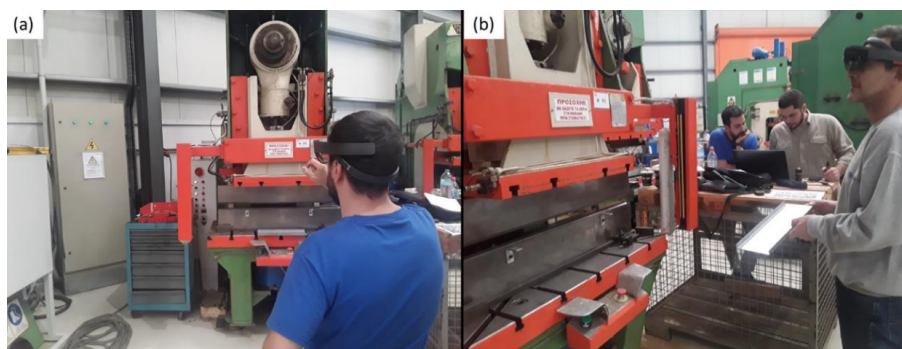


Figura 3.9: Testes de validação do sistema em ambiente industrial [55].

Com o intuito de melhorar a eficiência, reduzir erros e apoiar a formação no setor da manutenção industrial, os autores de [42] apresentam o desenvolvimento de uma aplicação, de nome "MARMA", concebida para auxiliar técnicos em tarefas de manutenção e reparação. Para o desenvolvimento desta solução, recorreram à plataforma Unity 3D e ao SDK do Vuforia, de forma a permitir a deteção de objetos. Após a deteção de um dos equipamentos, a aplicação utiliza a sobreposição de modelos 3D, instruções textuais e animações orientadas para auxiliar em procedimentos de manutenção, tal como ilustrado em 3.10. Após testes, realizados no ramo do setor automóvel, concluiu-se que a aplicação permitiu uma redução média de 30% no tempo de execução das tarefas, contribuindo ainda para uma diminuição geral dos erros operacionais. Os participantes destacaram, adicionalmente, o potencial da aplicação como ferramenta de apoio à formação de novos técnicos.



Figura 3.10: Utilização do sistema "MARMA" na manutenção de uma peça automóvel [42].

O artigo [44] apresenta uma aplicação de RA direcionada para o setor da construção naval, com especial enfoque nas atividades de *outfitting* [66], ou seja, na instalação de sistemas e equipamentos a bordo de navios. A aplicação foi desenvolvida com o motor de jogo Unity e recorreu ao ARFoundation para integrar a componente de RA. Utiliza um sistema de deteção baseado em imagens, permitindo a visualização e interação com elementos virtuais em RA, bem como a consulta de informações sobre os atributos e a origem de fabricação dos objetos reais

replicados. Adicionalmente, a aplicação possibilita a elaboração de relatórios sobre as tarefas realizadas. Após a leitura de uma das imagens distribuídas em zonas estratégicas, o operador pode criar um relatório relativo à tarefa associada ao marcador e carregar essa informação na base de dados do sistema. Os testes realizados demonstraram que a utilização desta abordagem permitiu uma redução média de até 30% nas horas de trabalho, bem como uma melhoria de cerca de 20% na produtividade global.

Segundo os autores de [30], as tarefas de montagem de painéis de isolamento são altamente complexas, totalmente manuais e suscetíveis a erros, especialmente quando os operadores dependem de manuais em papel ou de instruções apresentadas em ecrãs estáticos. Para responder a estes desafios, é apresentado um sistema de RA, denominado “HoloRailway”, desenvolvido para apoiar operações de montagem na indústria ferroviária. O principal objetivo do sistema é reduzir os erros humanos, melhorar a eficiência e aumentar a qualidade dos processos de produção. Recorrendo ao MRTK e ao SDK do Vuforia, em conjunto com o motor de jogo Unity, foi possível desenvolver uma aplicação que permite a deteção de marcadores através dos óculos de RA Microsoft HoloLens. A aplicação utiliza funcionalidades como a sobreposição de modelos 3D, como setas de orientação, para guiar o operador passo a passo durante os procedimentos de montagem. A interação com o sistema é realizada através de gestos e comandos de voz, tirando partido das funcionalidades do MRTK integradas no dispositivo HoloLens, o que proporciona uma maior praticidade na sua utilização, conforme ilustrado na Figura 3.11. Esta abordagem demonstrou resultados positivos, nomeadamente na redução do tempo necessário para a montagem, quando comparada com métodos tradicionais, bem como na diminuição do número de erros cometidos.



Figura 3.11: Operador a utilizar os Hololens durante um processo de montagem [30].

Em [15], é proposta uma aplicação de RA para o setor da indústria automóvel. O principal objetivo consiste em reduzir o tempo de inspeção, melhorar a precisão na deteção de defeitos e garantir um registo digital eficaz dos resultados obtidos durante o processo de inspeção automóvel. Para tal, foi desenvolvida uma aplicação utilizando o motor de desenvolvimento Unity e o SDK do Vuforia, permitindo a deteção de marcadores associados a diferentes veículos. Através desses marcadores, são disponibilizadas instruções em formato de tarefas, tal como

demonstrado na Figura 3.12, indicando os elementos específicos que devem ser inspecionados no veículo correspondente. O artigo propõe, assim, uma estrutura baseada em RA com vista à melhoria do processo de inspeção visual no contexto automóvel. Além de guiar o operador durante a inspeção, a aplicação permite ainda o registo direto de defeitos ou anomalias identificadas, através da sua interface interativa. Os testes realizados demonstraram uma receção positiva por parte dos operadores, destacando-se a clareza na apresentação das informações. Verificou-se ainda uma redução de aproximadamente 20% no tempo médio de inspeção por veículo.

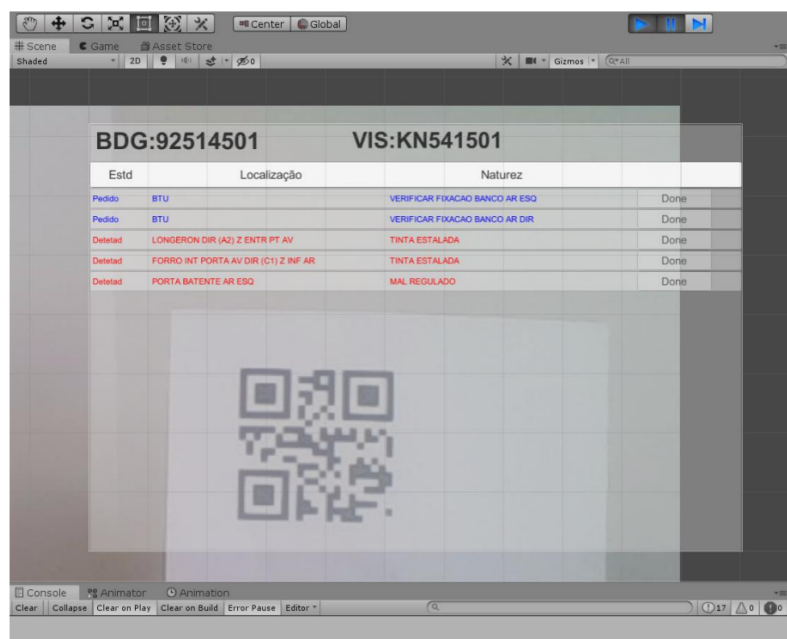


Figura 3.12: Lista de tarefas associadas a um dos veículos [15].

3.3 Discussão

Com base na análise dos diversos estudos anteriormente apresentados, é possível verificar o frequente aumento da utilização de aplicações de RA, direcionadas para o auxílio da manutenção industrial. Na Tabela 3.1 é feito um estudo dos conceitos principais de cada uma das publicações, incluindo o software de desenvolvimento, o tipo de ferramenta de RA, a plataforma para a qual a aplicação foi desenvolvida e, por fim, o tipo de rastreio utilizado para a integração dos componentes de RA.

Tabela 3.1: Análise dos conceitos chave dos trabalhos analisados.

Sistema	Plataforma	Ferramenta de RA	Software de Desenvolvimento	Rastreamento
[3] [10]	Smartphone & Tablet / Hololens	Vuforia	Unity	Marcadores
[83]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Imagens
[8]	Smartphone & Tablet	ARFoundation	Unity	Coordenadas Espaciais
[64]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Modelos
[41]	Hololens	Vuforia	Não especificado	Marcadores
[4]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Modelos
[78]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Marcadores
[24]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Imagens
[61]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Imagens
[86]	Hololens	Vuforia / MRTK	Unity	Modelos
[55]	Hololens	Vuforia / MRTK	Unity	Coordenadas Espaciais
[42]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Modelos
[44]	Smartphone & Tablet	ARFoundation	Unity	Imagens
[30]	Hololens	Vuforia / MRTK	Unity	Marcadores
[15]	Smartphone & Tablet	Vuforia	Unity	Marcadores

É possível observar que existe uma clara preferência pelo uso do motor de jogo Unity, para a criação das interfaces das aplicações, aliado à ferramenta Vuforia, para integração das funcionalidades de RA.

Na maioria dos estudos desta revisão literária, a grande preocupação dos autores caiu na produção de aplicações que tivessem um baixo custo de desenvolvimento, para tal, foi imperativo a utilização de ferramentas gratuitas de RA como o Vuforia ou o ARFoundation, que além de disponibilizarem diversas ferramentas para a criação de aplicações, tais como fácil associação de conteúdos media e bases de dados personalizadas para os elementos rastreáveis, também permitem uma rápida integração no software Unity.

Embora alguns estudos tenham utilizado os óculos de RA Microsoft Hololens, existe uma clara preferência pelos dispositivos móveis, nomeadamente smartphones e tablets, refletindo a acessibilidade, a familiaridade e a conveniência destes dispositivos, quer para o desenvolvimento de aplicações de RA, quer para a utilização por parte de um trabalhador fabril comum.

Durante a criação destas aplicações, grande parte das escolhas para rastreamento decaiu na utilização de imagens, como alvo, ou de marcadores. Estas escolhas devem-se, em grande parte, ao tipo de aplicações desenvolvidas. Em aplicações de menor escala, em que se atua em um baixo número de máquinas e/ou aparelhos industriais, a escolha preferencial foi a utilização de imagens. Em situações com mais aparelhos, é possível verificar uma preferência por marcadores ou, em certos casos, por modelos 3D.

3.4 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, foi realizado um estudo de trabalhos relacionados com a manutenção industrial utilizando Realidade Aumentada. A análise dos diferentes trabalhos apresentados demonstra um crescente interesse neste tipo de aplicações no apoio a processos de manutenção e formação de

operadores. As soluções desenvolvidas utilizam, maioritariamente, o motor de jogo Unity, em conjunto com o SDK Vuforia, que permite a introdução das componentes aumentadas.

Além disso, os estudos analisados destacaram a versatilidade da RA na adaptação a diferentes contextos industriais, tais como a produção de estampas em metal, a formação de técnicos de uma produção de componentes automóveis, ou no auxílio na montagem de painéis de isolamento. Devido à acessibilidade e familiaridade, por parte dos operadores industriais, a implementação de aplicações em dispositivos móveis, como smartphones e tablets, revelou-se como a escolha predominante. O desenvolvimento contínuo de novas abordagens, aliado à constante atualização das tecnologias de RA, poderá levar a uma adoção mais ampla e eficaz deste tipo de soluções em ambientes industriais cada vez mais exigentes.

No capítulo seguinte, serão apresentados dois sistemas de RA, correspondentes às duas fases que compõem este projeto. Para ambos os sistemas, será feito um enquadramento contextual, seguido de uma descrição da respetiva arquitetura e das etapas de desenvolvimento.

Capítulo 4

Arquitetura e Desenvolvimento do Sistema

Este capítulo apresenta e descreve a arquitetura e o desenvolvimento envolvidos em ambas as fases que compõem este trabalho. A primeira fase diz respeito ao protótipo experimental inicial com a máquina de café integrada num ambiente *Digital Twin*, enquanto a segunda fase está relacionada com o desenvolvimento da aplicação destinada à secção de fiação da empresa RIOPELE.

A primeira aplicação deve permitir a leitura de dados em tempo real e históricos da máquina, possibilitar a atuação bidirecional com o equipamento de forma a simular ações de teleoperação em ambiente fabril e apresentar conteúdos animados em RA que auxiliem o utilizador em tarefas de manutenção ou utilização do aparelho. Estas funcionalidades, inspiradas por necessidades identificadas em ambientes industriais, vão permitir fazer o teste e validação destas tecnologias de forma a, posteriormente, ser iniciado o desenvolvimento direcionado para um ambiente industrial real.

Já a segunda aplicação deve possibilitar a leitura de dados em tempo real e históricos das máquinas da secção de fiação, apoiar a manutenção de componentes e equipamentos industriais, recorrendo a diferentes tipos de media como animações em RA, e deve integrar um chatbot, cujo desenvolvimento servirá como ponte de comunicação com um assistente virtual existente. Estas funcionalidades foram definidas de modo a responder a necessidades reais do setor de fiação da empresa têxtil em questão, onde se pretende otimizar os processos de manutenção industrial e auxiliar a leitura de informações das diversas máquinas que constituem o setor.

Para tal, o capítulo encontra-se subdividido em duas partes distintas, correspondentes a cada uma das fases. Em cada parte, será inicialmente apresentada a arquitetura geral, de forma a esquematizar as diferentes aplicações de Realidade Aumentada. Em seguida, são descritas as diversas etapas que compõem o desenvolvimento, com o objetivo de explicitar todo o processo associado à criação das aplicações, abrangendo desde a produção dos conteúdos multimédia até ao desenvolvimento final em ambiente Unity.

4.1 Fase 1: Arquitetura e Desenvolvimento

Nesta fase, o objetivo foi desenvolver um protótipo com foco na testagem de tecnologias, tais como a Realidade Aumentada, IoT e *Digital Twin*, para a realização de manutenção preditiva em ambientes industriais. Para tal, foi concebido um sistema que utilizasse a RA e permitisse a leitura de dados em tempo real de um aparelho eletrônico, a consulta do histórico de dados, a interação bidirecional e, por fim, que fosse facilmente escalável para diferentes tipos de máquinas.

O sistema desenvolvido, de nome “Coffee Twin”, é composto por uma máquina de café controlada à distância através de um Raspberry Pi [34], que, para além de possibilitar atuações remotas, está também ligado a um sensor responsável pela recolha de dados de humidade e temperatura. Através da RA é possível realizar a deteção do modelo físico da máquina, de modo a permitir aceder a um painel de controlo, onde o utilizador pode visualizar dados do sensor e controlar remotamente a máquina de café, bem como visualizar um modelo digital do aparelho, sobreposto ao objeto físico.

4.1.1 Arquitetura Geral do Sistema “Coffee Twin”

A arquitetura do sistema, ilustrada na Figura 4.1, apresenta, de forma generalizada, os diversos componentes que o constituem.

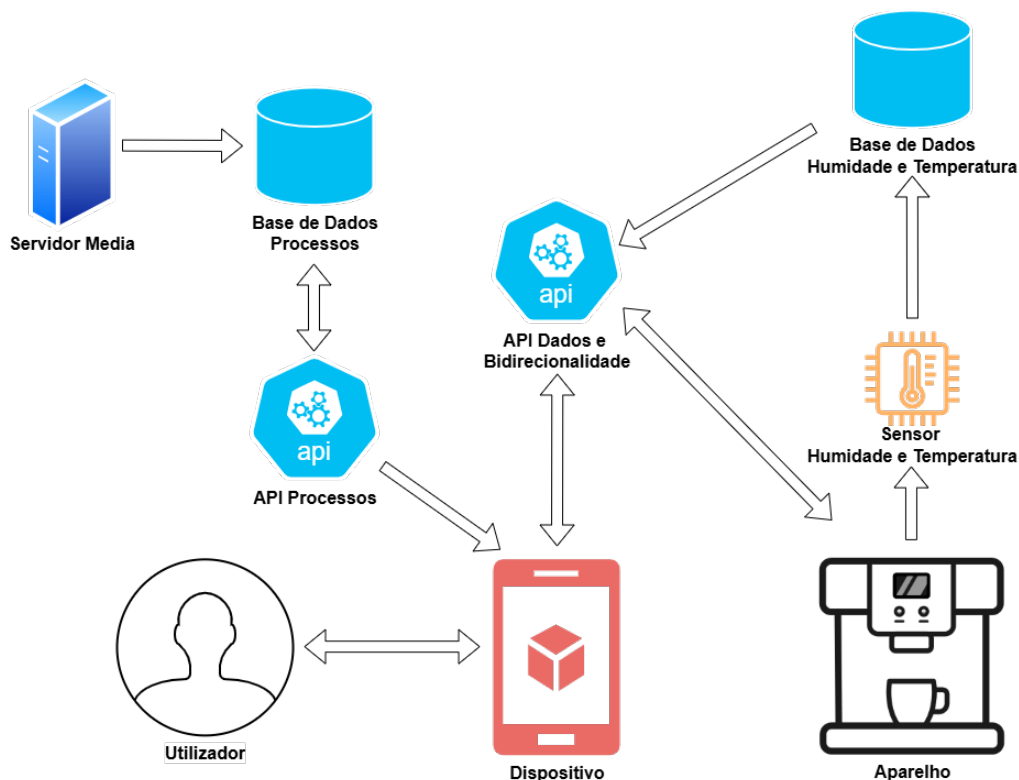


Figura 4.1: Arquitetura geral do sistema "Coffee Twin".

O sistema é alimentado por um sensor de humidade e temperatura instalado no aparelho. Os dados são posteriormente armazenados numa base de dados e utilizados pela aplicação principal através de uma API (API Dados e Bidirecionalidade). Para além de consumir os dados do sensor, a aplicação também consegue atuar bidirecionalmente no aparelho, comunicando com um servomotor nele instalado. Este servomotor, um atuador eletromecânico com movimento em 360 graus, pode ser controlado através de scripts em Python [77], possibilitando a atuação direta sobre os botões do aparelho, com controlo sobre a força e o ângulo de atuação.

De modo a simular uma máquina industrial, foi utilizada uma máquina de café convencional, pois, mesmo com um grau de complexidade menor, possibilitava, de igual forma, o estudo e avaliação dos seus processos, quer de utilização, quer de manutenção.

Para a recolha dos dados, foi utilizado um sensor instalado num Raspberry Pi 3, que capturavam, de forma recorrente, os valores de temperatura e humidade da máquina. Posteriormente, os dados eram armazenados e integrados num sistema FIWARE [27], sendo que este tratamento de dados não faz parte do trabalho aqui apresentado. A FIWARE é uma plataforma de código aberto que propõem facilitar o desenvolvimento de aplicações inteligentes em diversos domínios, sendo frequentemente aplicada em projetos com *Digital Twins*. Esta plataforma disponibiliza vários componentes, entre eles o Orion Context Broker [28], que neste contexto, permitiu a recolha e organização dos dados do sensor, assegurando que todas as informações fossem acessíveis e centralizadas. Neste trabalho o sistema FIWARE é utilizado para consulta dos dados em tempo real e dados históricos da máquina, sendo que o seu desenvolvimento não faz parte deste projeto.

Além desta ligação, o Raspberry Pi está também conectado a um servomotor, colocado sobre os botões de extração de café, permitindo a interação bidirecional. Por fim, o cabo de energia da máquina está ligado a um *switch*, possibilitando ligar e/ou desligar o aparelho conforme necessário. Tanto a leitura dos dados do sensor como a interação com os dispositivos são asseguradas por uma única API (API Dados e Bidirecionalidade), paralelamente desenvolvida para complementar o sistema FIWARE existente, sendo que a instalação e programação de todos os atuadores e sensores que utiliza, também não fazem parte do trabalho aqui apresentado.

Adicionalmente, é utilizada uma segunda API (API Processos), também desenvolvida em paralelo a este trabalho, para comunicar com a aplicação. Esta API estabelece ligação com uma base de dados complementar, onde são armazenadas informações relativas a processos relacionados com a máquina de café. A um processo são associados diversos conteúdos media, que são armazenados em um servidor online, e posteriormente referenciados na base de dados de processos do sistema. Estes processos têm como principal objetivo auxiliar o utilizador nas tarefas de manutenção do equipamento.

Para o desenvolvimento da aplicação, foi utilizado o motor de jogos Unity 3D, em conjunto com o SDK do Vuforia. Enquanto o Unity permite a criação de aplicações leves, rápidas e compactas em 3D, o Vuforia possibilita a integração de funcionalidades de RA na aplicação. A escolha deste SDK baseou-se, sobretudo, na necessidade de implementar o rastreamento por modelos, permitindo uma associação fácil e eficiente entre o objeto real da máquina de café e a

sua réplica tridimensional digital. Esta funcionalidade foi viabilizada através da utilização do *Model Target Generator* (MTG), uma ferramenta do Vuforia que permite a conversão de modelos 3D num elemento de uma base de dados Vuforia. Além disso, o Vuforia possibilita a criação de um sistema de auxílio ao utilizador durante a deteção de objetos em RA, destacando-se assim de outras ferramentas semelhantes.

A ligação e comunicação com as APIs foram implementadas através de scripts em C#, permitindo que, na aplicação, o utilizador consiga visualizar conteúdos media que o auxiliam a realizar processos da máquina de café, consultar dados em tempo real e históricos provenientes dos sensores, bem como interagir com componentes físicos, como o servomotor e o *switch*. Esta interação permite, por exemplo, ligar ou desligar a máquina e selecionar a preparação de um café curto ou longo. A aplicação final é destinada a dispositivos móveis Android, como smartphones e tablets.

4.1.2 Funcionalidades

A aplicação tem como principal objetivo auxiliar o utilizador no processo de preparação de café. Assim sendo, foi desenvolvido um sistema que permite ao utilizador consultar dados em tempo real e históricos provenientes do sensor instalado na máquina, bem como receber apoio na manutenção do equipamento, através da execução de ações bidirecionais e de conteúdos formativos, apresentados sob a forma de animações em RA.

O esquema geral das funcionalidades da aplicação desenvolvida encontra-se representado na Figura 4.2.

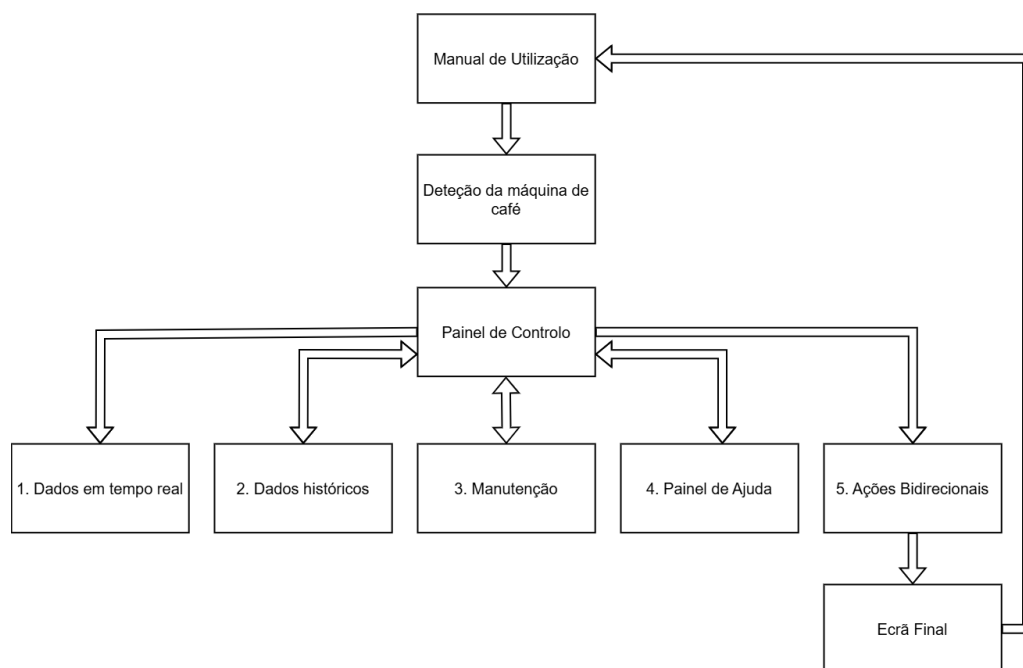


Figura 4.2: Esquema de funcionalidades e navegação na aplicação "Coffee Twin".

A aplicação inicia com um manual de utilização, cujo objetivo é permitir ao utilizador aprender, de forma simples e eficaz, tanto a operar o aparelho como a utilizar a aplicação. Este manual permite não só demonstrar as várias funcionalidades da aplicação de RA, como também apresentar a forma correta de utilização da mesma. O manual consiste numa sequência de painéis compostos por imagens e texto, que procuram enquadrar rapidamente e de forma eficiente o utilizador nas dinâmicas da aplicação.

Após a conclusão do manual de utilização, o utilizador recebe a informação visual da aplicação para proceder à deteção da máquina de café. Para realizar a deteção o utilizador deve apontar a câmara do tablet para a máquina de café, seguindo o auxílio de uma imagem-guia disponibilizada no ecrã.

Uma vez detetado o objeto físico, será disponibilizado o painel de controlo da aplicação, representado na Figura 4.3, bem como o modelo digital, sobreposto ao modelo físico.



Figura 4.3: Painel de controlo da aplicação "Coffee Twin".

No painel de controlo o utilizador terá acesso aos dados em tempo real dos sensores da máquina, podendo consultar informações da temperatura e humidade atual. Além disso o painel é composto por um conjunto de botões que permitem aceder às restantes funcionalidades do sistema.

A consulta de dados históricos é disponibilizada através do botão "Gráficos", que direciona o utilizador para uma visualização gráfica dos registos mais recentes captado pelo sensores, permitindo assim, acompanhar a evolução dos valores de temperatura e humidade ao longo do tempo.

Através do botão "Manutenção", o utilizador pode visualizar, por meio de uma sequência de animações 3D em RA, o processo de preparação de um café. Utilizando os botões da interface, é possível controlar quais as animações a apresentar e consultar a descrição do subprocesso

correspondente. Quando o processo termina, o utilizador pode reiniciar a sequência de animações ou voltar ao painel de controlo.

Através do botão localizado no canto inferior direito do ecrã, o utilizador pode aceder a um painel de ajuda, onde é possível rever algumas das instruções essenciais para a utilização da aplicação, previamente apresentadas no manual de utilização.

Por fim, o utilizador poderá atuar bidireccionalmente sobre a máquina, ou seja, através de botões presentes no painel de controlo, é possível proceder a preparação de um café remotamente. O utilizador pode ligar e/ou desligar a máquina, bem como selecionar tirar um café curto ou longo, utilizando os respetivos botões disponíveis na interface. Além disso pode recorrer ao controlo por voz, através da ativação do botão do microfone, de forma a executar estas funcionalidades através de frases predefinidas. Existem indicações visuais que informam o estado atual da máquina e do microfone, podendo estes estarem ligados ou desligados. Para tirar um café é necessário garantir que a máquina se encontra ligada.

Após a conclusão do processo, o utilizador é redirecionado para o ecrã final da aplicação, concluindo assim a tarefa. Neste ecrã, terá ainda a opção de recomeçar todo o processo, voltando assim para o começo da aplicação.

4.1.3 Rastreamento e Modelação

O Vuforia é um kit de desenvolvimento utilizado para a criação de aplicações de RA. Recorre a tecnologia de visão computacional para reconhecer e rastrear imagens planas e objetos 3D em tempo real. Devido à sua fácil utilização e configuração, pode ser facilmente integrado num ambiente de desenvolvimento Unity. Neste protótipo, o Vuforia foi utilizado para o reconhecimento do objeto físico da máquina de café. Este rastreamento foi possível através da utilização de um modelo 3D digital que replicava o aparelho real.

Para a construção deste modelo 3D, foi utilizada a ferramenta Blender [26]. O Blender é um software open-source de modelação, animação e renderização 3D. Através desta ferramenta, foi modelado o objeto digital da máquina de café, sendo este um trabalho inteiramente manual, baseado em medidas reais retiradas do aparelho físico. Além das dimensões reais, este modelo, representado na Figura 4.4, também foi texturizado de acordo com o padrão de cores do objeto original e exportado em formato FBX [37].

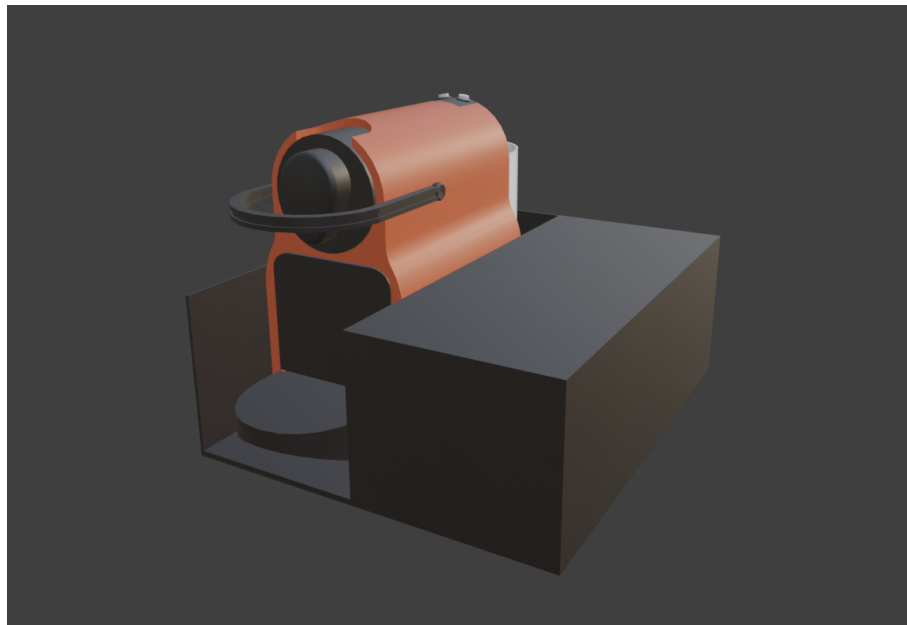


Figura 4.4: Modelo 3D digital da máquina de café.

Após a finalização e extração do modelo, este foi importado para o MTG, permitindo a conversão do modelo num elemento de uma base de dados Vuforia. Essa base de dados pode, posteriormente, ser utilizada para rastreamento de objetos-alvo. Durante esta importação, foi essencial a definição de posições-guia do modelo [80], ou seja, ângulos de visualização que auxiliam na detecção do objeto real, tal como a representada na Figura 4.5. Estas posições-guia são criadas durante a importação no MTG, permitindo definir várias guias diferentes de acordo com os ângulos de observação pretendidos.



Figura 4.5: Guia de auxílio na detecção do modelo da máquina de café.

Estas guias, quando replicadas pelo utilizador, permitem uma melhor detecção do modelo, pois o software Vuforia encontra correspondências mais rapidamente. Além da definição de algumas

guias, foi também fundamental a utilização da opção de rastreamento através da textura do modelo, de forma a otimizar o processo de rastreamento.

Durante a execução da aplicação, o modelo digital é também utilizado após a deteção do objeto físico real. Ou seja, quando o Vuforia deteta o modelo real, o modelo digital é sobreposto de forma aumentada sobre a máquina de café, aumentando assim a imersividade da aplicação. De modo a auxiliar o rastreamento do modelo, foi utilizada a representação de uma das guias anteriormente mencionadas, permitindo ao utilizador orientar-se até que a deteção do equipamento seja realizada.

4.1.4 Representação de Dados

Para analisar e prevenir futuras avarias, é recorrente a recolha de informações dos equipamentos industriais. Neste contexto, os dados analisados são a temperatura e a humidade, recolhidos pelo sensor presente na máquina de café. Estes dados são posteriormente comunicados através de uma REST API, que devolve, em formato JSON, uma listagem completa de todo o histórico de registos armazenados pelo sensor, incluindo a temperatura, a humidade e o instante em que foram capturados, sendo as atualizações recebidas a cada 20 segundos.

Através da utilização de scripts no ambiente de desenvolvimento Unity, foi possível estabelecer a comunicação com a API, direcionando estes dados para duas finalidades distintas.

A primeira consistiu na disponibilização dos dados atualizados de humidade e temperatura do aparelho de forma rápida e acessível ao utilizador. Para tal, foram colocados dois componentes de texto num painel de controlo, representado na Figura 4.6, sempre visível durante a utilização da aplicação.



Figura 4.6: Leitura da temperatura e humidade atual no painel de controlo.

Estes componentes são atualizados a cada 15 segundos, conforme a última entrada recebida na API. Adicionalmente, foram definidos valores de segurança: caso os valores de temperatura e/ou humidade recebessem leituras superiores a 24 graus celsius e 60 por cento de humidade relativa, respetivamente, seria enviado um alerta para avisar o utilizador da necessidade de intervenção na máquina. Para tal, foi feita uma verificação a partir dos dados recebidos em tempo

real pelos sensores instalados, sendo que os valores utilizados são meramente representativos, não correspondendo a limites técnicos ou a valores prejudiciais para o equipamento.

Para além dos dados em tempo real, os dados históricos e os últimos registos também foram utilizados, mas num contexto diferente. Sendo este um trabalho relacionado com a manutenção de equipamentos, por vezes, a melhor forma de evitar uma avaria é analisar e compreender a evolução dos comportamentos e dos valores registados pelos aparelhos. Tendo isto em consideração, foi desenvolvido um gráfico, ilustrado na Figura 4.7, onde são apresentados os últimos registos de temperatura e humidade, permitindo uma leitura fácil e rápida para o utilizador. O gráfico recebe atualizações das suas informações a cada 15 segundos.

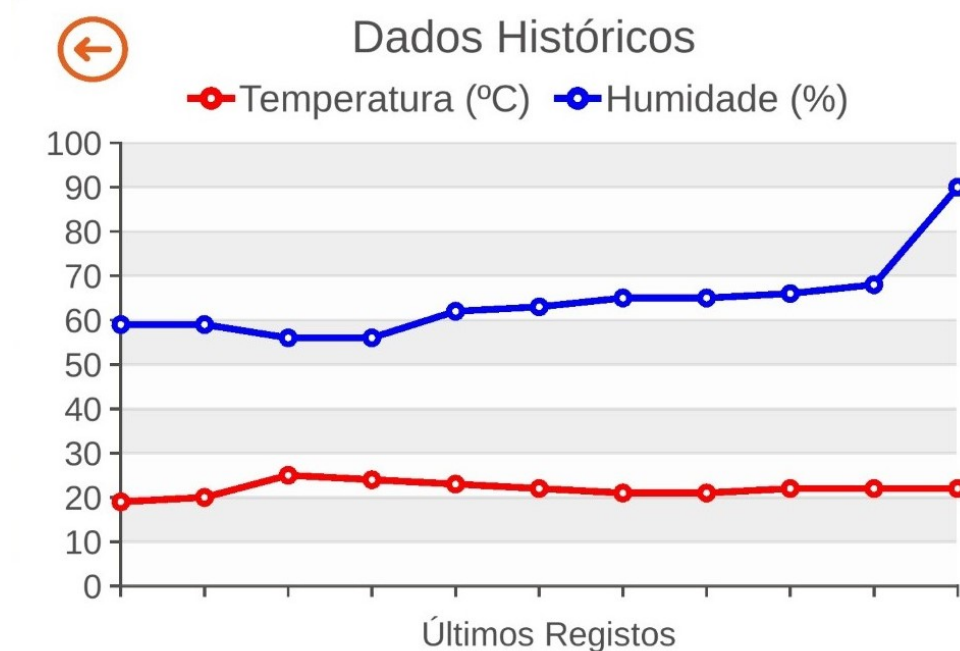


Figura 4.7: Últimos registos de temperatura e humidade.

4.1.5 Representação de Processos

Para introduzir o apoio à manutenção de equipamentos na aplicação e a bidirecionalidade, foi realizado um estudo preliminar sobre os processos pertencentes ao aparelho. Para esse efeito, foi utilizada a metodologia BPMN [1], de forma a identificar e gerir os principais processos relacionados com a utilização e manutenção da máquina de café. Após a análise, concluiu-se que o aparelho abrange três processos principais de manutenção e utilização: "Esvaziar Reservatório de Água", "Preparar Café" e "Esvaziar Reservatório de Cápsulas". Cada um dos processos estudados foi representado com todos os seus passos, ações, escolhas e até subprocessos, conforme necessário. Feita essa representação desses processos, representada na Figura 4.8, foi decidido que o processo a ser utilizado na aplicação seria o que envolvia a preparação de um café, devido à sua interatividade e à possibilidade de, numa futura continuação do projeto, ser

expandido com a integração dos outros dois processos de esvaziar os reservatórios de água e de cápsulas, uma vez que estão diretamente relacionados com o processo de “Preparar Café”.

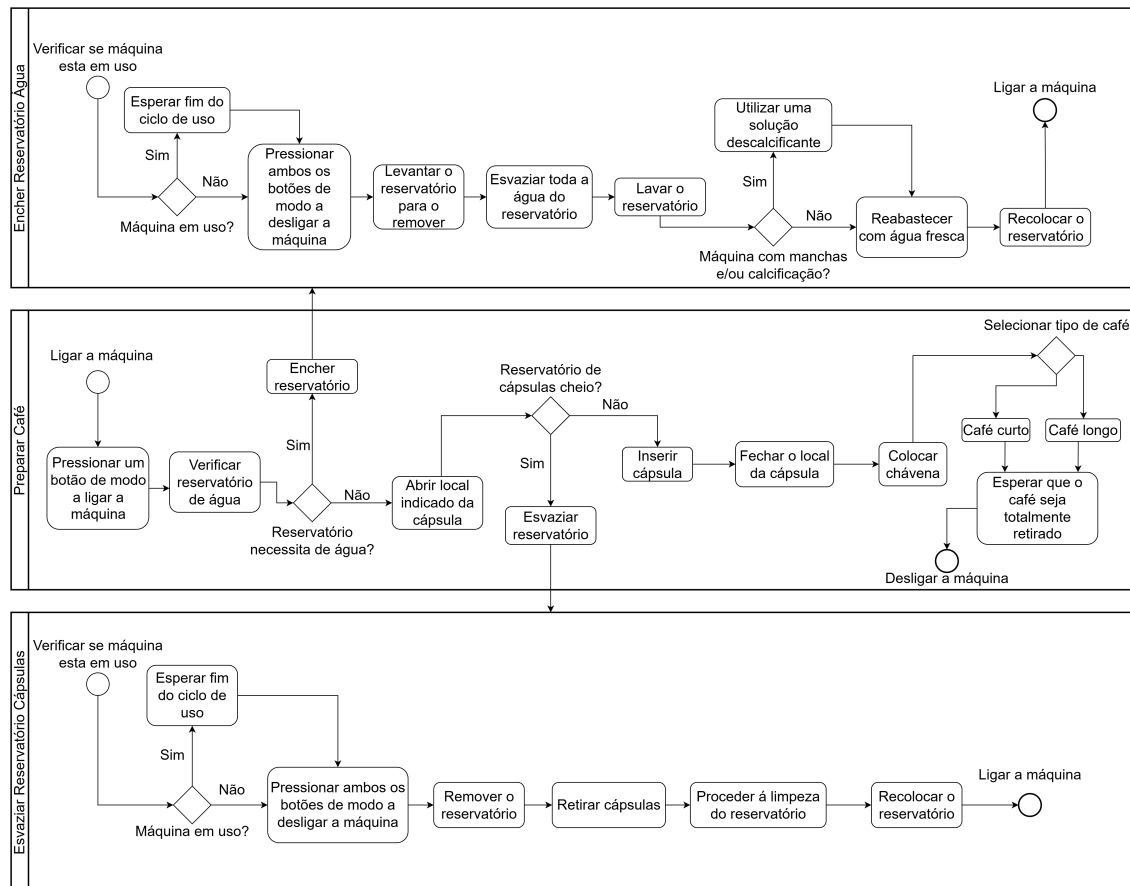


Figura 4.8: Representação BPMN dos processos da máquina de café.

Após representados os processos envoltivos da máquina de café, foi utilizada uma base de dados desenvolvida em paralelo a este trabalho, conforme descrito em [20], recorrendo a um sistema SQL híbrido [82], que combina estruturas relacionais e grafos.

O modelo de dados utilizado, representado na Figura 4.9, foi pensado para um contexto industrial e é composto por diversas tabelas conectadas para a gestão de um sistema industrial. Esta base de dados foi adotada para o armazenamento de todo o processo da preparação de café, incluindo os seus subprocessos e as suas respetivas médias associadas.

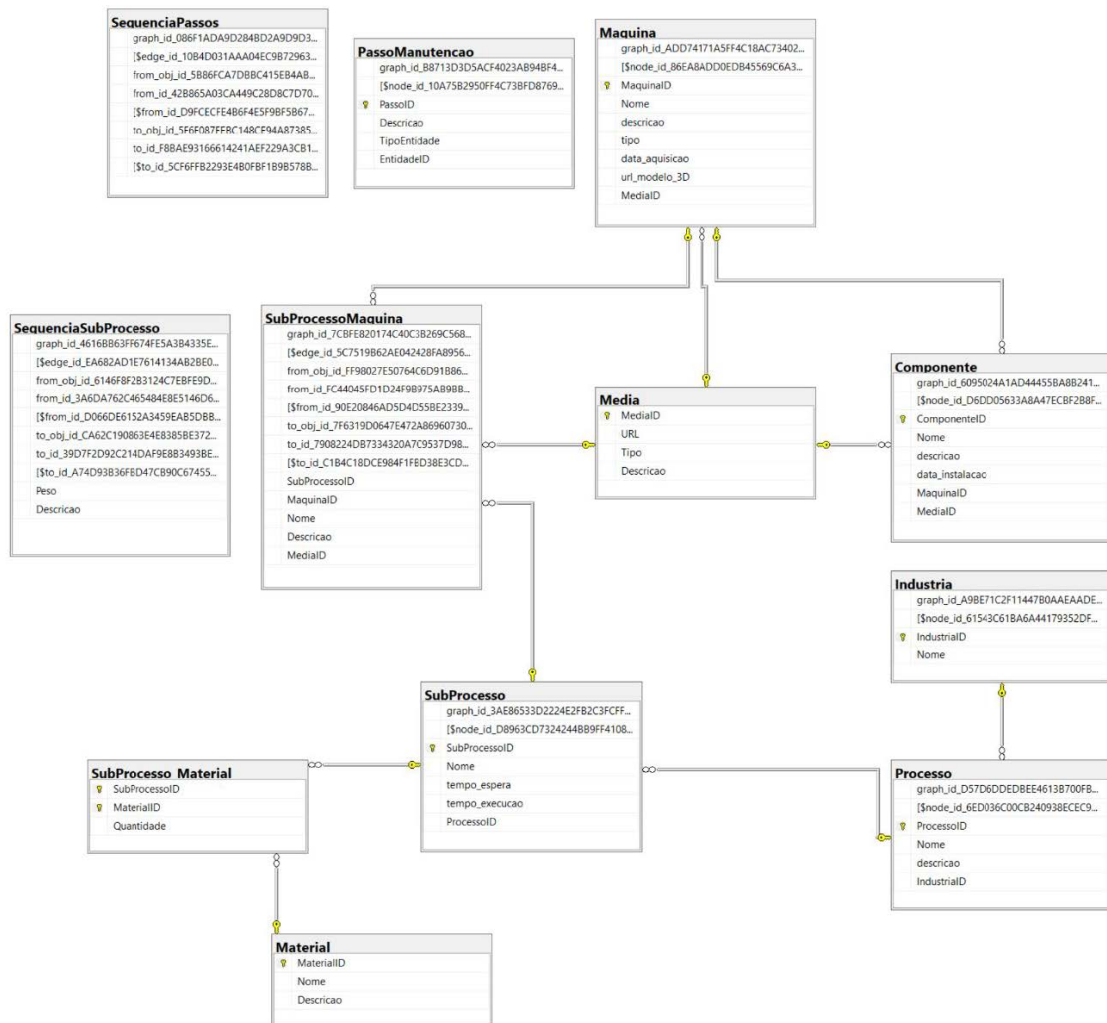


Figura 4.9: Estrutura de dados utilizada para armazenar o processo da preparação de café.

A tabela "Indústria" está relacionada com a tabela "Processo", que organiza os processos principais por indústria. Cada etapa específica a um processo é detalhada na tabela "SubProcesso", que se relaciona com a tabela "Material" por meio de "SubProcesso Material", indicando os materiais utilizados em cada etapa, e com a tabela "Maquina" através de "SubProcessoMaquina". Na tabela "SequenciaSubProcesso" é definida a ordem de execução entre subprocessos. Em termos da manutenção, a tabela "Maquina" detalha equipamentos usados, enquanto "Componente" descreve as partes individuais das máquinas. De forma a organizar as etapas e a ordem de manutenção, foram utilizadas as tabelas "PassoManutencao" e "SequenciaPassos", que vinculam-se às máquinas e componentes. Por fim, a tabela "Media" associa informações multimídia a máquinas, componentes e outros elementos.

4.1.6 Ação Remota e Bidirecional

Em termos de bidirecionalidade, este processo engloba quatro possíveis interações: ligar e desligar a máquina e tirar café curto ou longo. Para permitir a interação do utilizador com estas

ações, foram utilizados dois componentes: um *switch*, colocado no cabo de alimentação do aparelho e responsável por fornecer ou cortar energia à máquina de café, e um servomotor, ligado a um Raspberry Pi, que contém uma pequena palheta que gira sobre os botões de café curto e longo conforme o desejado. Tanto o *switch* como o servomotor comunicam com a aplicação através da REST API, já anteriormente referida, e estão representados na Figura 4.10.

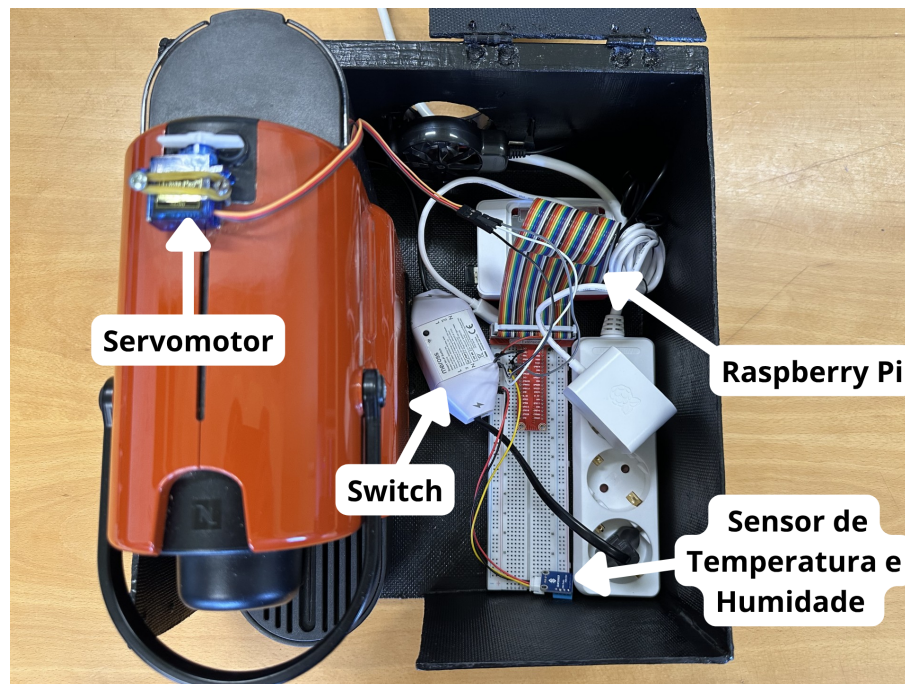


Figura 4.10: Componentes que constituem o sistema "Coffee Twin".

Mais uma vez, no ambiente Unity, foi efetuada a ligação à API através de scripts em C#, permitindo a implementação de três novos elementos no painel de controlo da interface da aplicação: um botão para ligar/desligar a máquina e dois botões para as ações de tirar café curto e longo, representados na Figura 4.11. Quando o utilizador pressiona um dos botões, é enviada uma alteração de estado para a API, que, por sua vez, comunica com o componente correspondente, permitindo a atuação remota sobre a máquina, tal como representado em B.1. Relativamente aos botões de café longo e café curto, a comunicação via POST com a API só é realizada, quando a máquina já estiver ligada.



Figura 4.11: Botões de atuação bidirecional.

De igual modo, a atuação remota também é possível através de comandos de voz. Durante a execução da aplicação, é mantido em segundo plano um elemento vazio com um script de escuta, que quando ativado, deteta frases predefinidas, nomeadamente "Café curto", "Café longo", "Ligar máquina" e "Desligar máquina". A ativação do microfone, ou neste caso da captação de palavras, é feita através de um botão, presente na interface do painel de controlo. Após a deteção de uma destas frases, ocorre um procedimento semelhante ao dos botões da interface visual, comunicando a mudança de estado à API, mantendo-se a verificação se a máquina já se encontra ligada, antes do envio de um pedido de café curto ou longo. Para o reconhecimento de palavras, foi utilizado um plug-in externo da Vosk [5], um kit de desenvolvimento open-source para reconhecimento de fala.

4.1.7 Formação e Manutenção

Em relação à componente de formação da aplicação, foi desenvolvida uma sequência de animações em RA, representando os diversos subprocessos envolvidos no processo de preparação de café. Para o desenvolvimento das animações, foi utilizado o módulo de animação do Unity, aplicado ao modelo 3D da máquina e aos seus respetivos componentes.

Após a conclusão das animações relativas a cada um dos subprocessos foi feita a conversão dos modelos animados em *Prefabs* [73]. Os *Prefabs* são estruturas reutilizáveis no Unity que encapsulam *GameObjects* com todos os seus componentes e configurações. Cada *Prefab* foi, posteriormente, convertido em um *AssetBundle* [72], ou seja, um formato de empacotamento utilizado para distribuir conteúdos externos e carregá-los dinamicamente durante a execução da aplicação.

Os vários *AssetBundles* foram armazenados num servidor online e referenciados na base de dados de processos do sistema. Através de scripting, conforme representado em B.2, é estabelecida uma ligação com uma API, que comunica com a base de dados de processos, a partir da qual são obtidos os conteúdos medias e as respetivas descrições associadas a cada subprocesso do processo de preparação de café. Tanto os conteúdos como as descrições são armazenados em listas dinâmicas, utilizadas posteriormente para compor uma sequência controlável.

Durante a execução da aplicação, o utilizador pode assistir a essa sequência controlável de animações, conforme ilustrado na Figura 4.12, utilizando os botões localizados na parte inferior

do ecrã para navegar entre os diferentes passos. Adicionalmente, no topo do ecrã, é apresentada a descrição textual da tarefa correspondente ao subprocesso em execução.

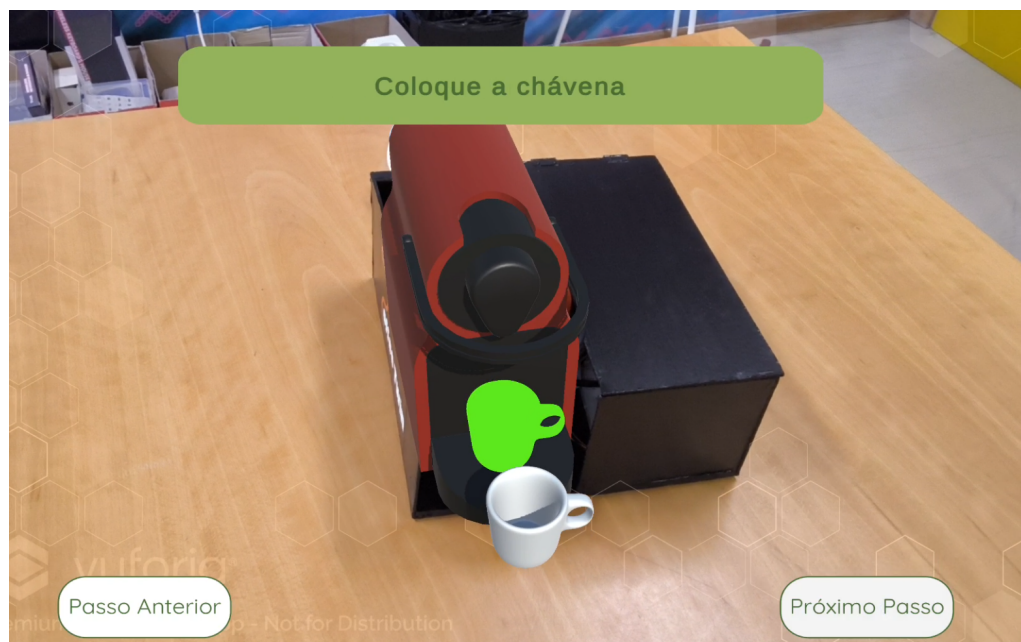


Figura 4.12: Animação pertencente ao processo de preparação de um café.

4.2 Fase 2: Arquitetura e Desenvolvimento

Esta fase tem início com a conclusão da fase anterior, que serviu como uma prova de conceito para esta nova etapa. O objetivo agora é o de aplicar as tecnologias e métodos aprendidos a um caso de uso real na indústria têxtil. Assim sendo, foram inicializados os trabalhos com a RIOPELE, uma fábrica têxtil portuguesa que se dedica à criação e produção de tecidos, integrante do projeto TEXP@CT. Onde foi proposto o desenvolvimento de uma aplicação de RA, de nome "RioRA", para a secção de fição da fábrica, de modo a facilitar a leitura de informações em ambiente fabril e otimizar a manutenção de equipamentos. A aplicação desenvolvida deve permitir ao utilizador consultar dados atuais e históricos das máquinas da secção de fição, bem como, através de diferentes tipos de media, auxiliar na manutenção dos seus componentes. Por fim, a aplicação deverá integrar um *chatbot* que comunicará com um Assistente Virtual (AV), que responderá a perguntas rápidas sobre as máquinas e/ou processos de manutenção associados.

4.2.1 Arquitetura Geral do Sistema "RioRA"

Após discussão com os representantes da fábrica, foi desenvolvido um sistema cuja arquitetura está ilustrada na Figura 4.13.

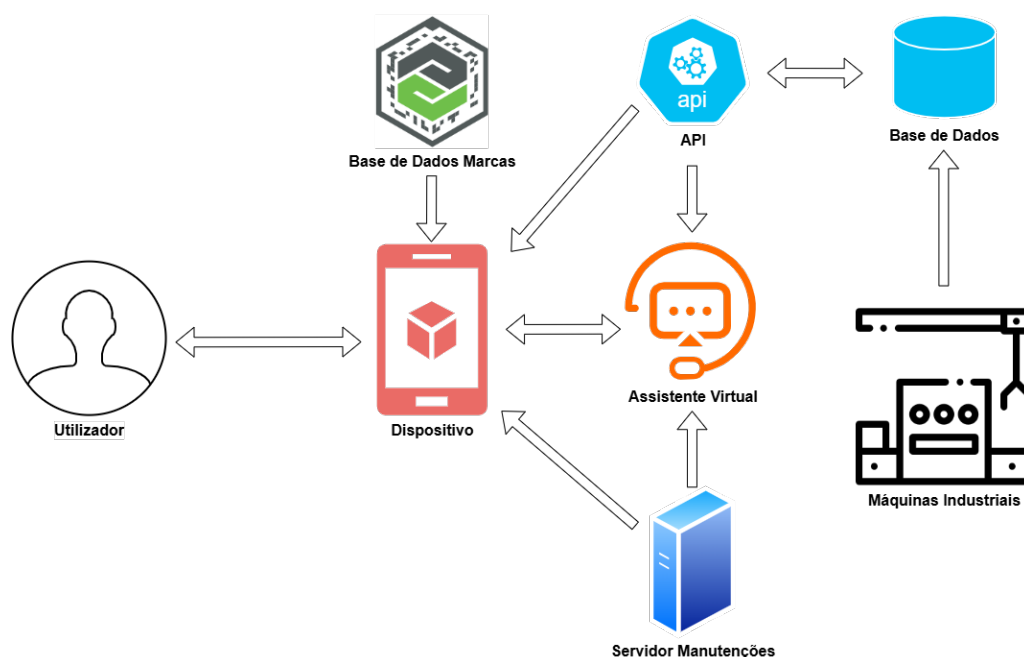


Figura 4.13: Arquitetura geral do sistema "RioRA".

Quer a aplicação final, quer o AV, são alimentados por uma API disponibilizada pela fábrica RIOPELE. Esta API fornece diversas informações sobre cada uma das máquinas, incluindo identificadores, propriedade, velocidades máxima e mínima, bem como dados sobre o estado atual, como o sentido de torção, tipo de material e lote em produção. Para além disso, é possível consultar o histórico de produções e de eventos associados a uma determinada máquina, bem como os detalhes de cada produção e/ou evento.

A secção de fiação é composta por várias máquinas idênticas e com partes móveis, o que levou à adoção de um sistema de marcas/marcadores. Cada marca permite a representação de uma máquina de fiação da secção, sendo posteriormente armazenada numa base de dados própria.

Através de um servidor online, são armazenados vídeos que mostram operadores reais a realizar processos de manutenção das máquinas, facilitando a formação de novos colaboradores.

Para responder a dúvidas que os operadores possam ter ou para obter outros tipos de informações, foi incorporado um AV baseado em inteligência artificial, alimentado com dados da API e dados de manutenções. O seu desenvolvimento, no entanto, não está incluído no âmbito deste trabalho.

A aplicação final, tal como a anterior, foi desenvolvida em Unity 3D, utilizando o SDK do Vuforia para a integração dos componentes de deteção e para permitir a incorporação da componente de animação em RA, para o auxílio na manutenção de equipamentos. Em C#, foram criadas ligações entre o Unity e a API, o servidor de vídeos e o AV, permitindo que o utilizador possa consultar dados, produções e eventos associados a uma máquina, visualizar vídeos relativos a processos de manutenção e fazer consultas rápidas e dinâmicas sobre todo o tipo de informações relacionadas com as máquinas da secção de fiação.

Mais uma vez, a aplicação final foi desenvolvida para dispositivos Android, como tablets e smartphones.

4.2.2 Funcionalidades

A aplicação desenvolvida tem como objetivo facilitar a interação entre o operador e os equipamentos industriais, promovendo um acesso rápido e intuitivo a diversos tipos de informações e formações essenciais, aumentando assim a eficiência e a produtividade de todo o setor de fiação. Tendo isso em conta, foi concebida uma solução prática e adaptada ao contexto fabril, capaz de auxiliar o operador na consulta de dados operacionais em tempo real, bem como no apoio durante procedimentos de manutenção ou em ações de formação associadas a intervenções técnicas nas máquinas e/ou nos seus componentes.

Na Figura 4.14, encontra-se representado um esquema geral das funcionalidades da aplicação desenvolvida.

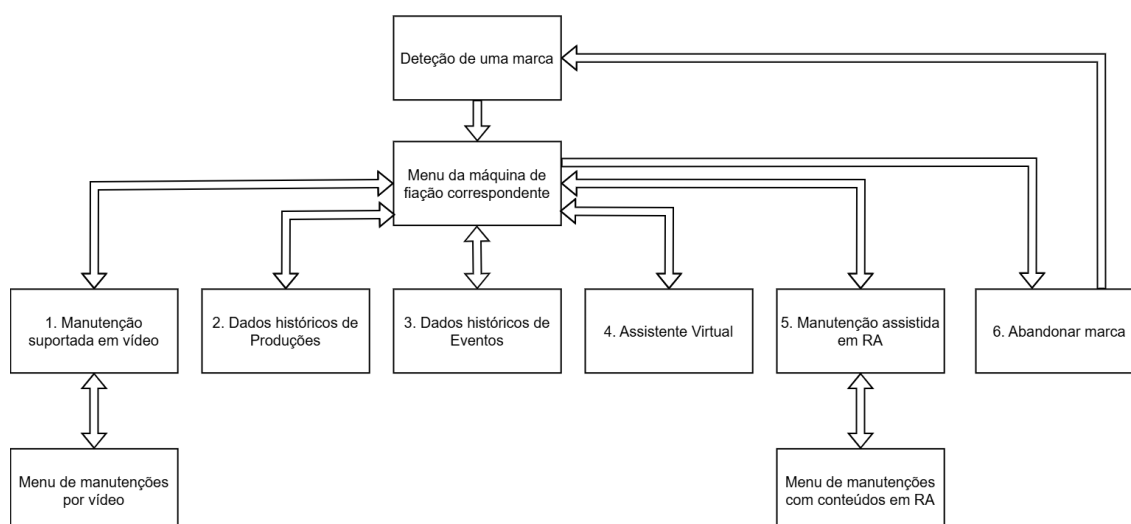


Figura 4.14: Esquema de funcionalidades e navegação na aplicação "RioRA".

Após a inicialização da aplicação, o utilizador deverá realizar a deteção de uma das marcas. Para tal, será necessário apontar a câmara do dispositivo para uma das marcas identificadoras das máquinas de fiação. Após a deteção, será exibido um cartão com a identificação da máquina, onde o utilizador poderá confirmar ou não a marca detetada. Caso a confirmação seja feita, será apresentado o menu da máquina.

O menu da máquina, presente na Figura 4.15 é composto por um cartão com informações atualizadas da máquina em questão, seguindo o design padronizado já utilizado pela RIOPELE em outras aplicações. Para além deste cartão, é também apresentado um menu com várias opções disponíveis para o utilizador.

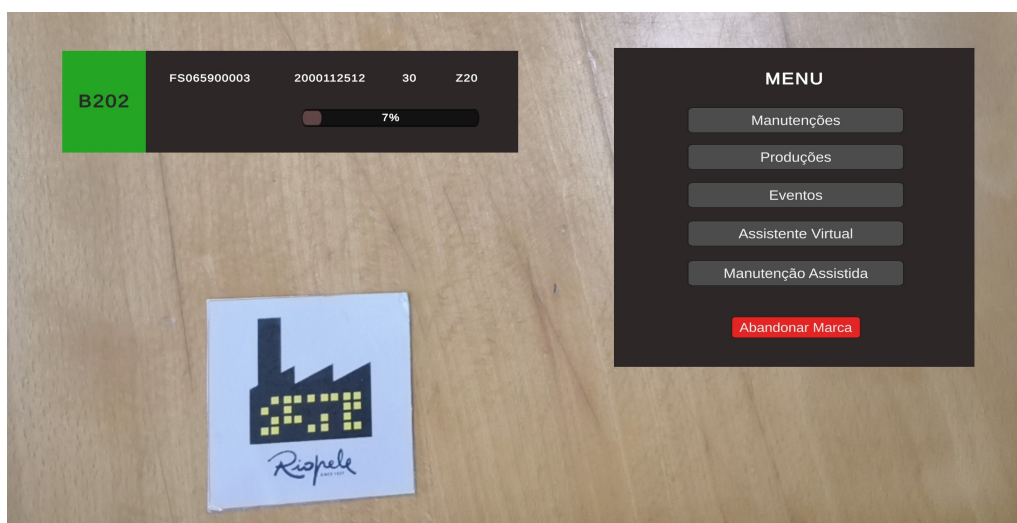


Figura 4.15: Menu da máquina de fiação com ID: 227.

A primeira opção permite aceder às manutenções possíveis da máquina, ou seja, um submenu onde o utilizador pode escolher o tipo de manutenção que pretende visualizar em vídeo. De seguida, será apresentado um leitor de vídeo com um ou mais vídeos relativos à manutenção selecionada. O utilizador poderá pausar o vídeo, avançar ou retroceder, bem como escolher outra manutenção para visualizar.

A segunda e a terceira opções dizem respeito à consulta de informações operacionais da máquina, nomeadamente eventos registados e produções associadas. Após selecionar uma destas opções, o operador poderá definir um intervalo de tempo para pesquisa. Os resultados são apresentados num cartão dinâmico, que se ajusta automaticamente ao número de registos encontrados.

Uma quarta opção é a de consultar o Assistente Virtual. Ao aceder ao AV, é exibido um *chat* onde o utilizador pode realizar pesquisas sobre qualquer uma das máquinas da secção de fiação, bem como sobre possíveis manutenções associadas.

Segue-se a opção de aceder à manutenção assistida. Semelhante ao menu de manutenções por vídeo, o utilizador pode selecionar a manutenção que pretende visualizar, contudo, neste caso, serão utilizados os objetos físicos como base para a sobreposição de animações 3D em RA. Após selecionar uma manutenção, o utilizador deverá proceder à deteção do objeto físico, recorrendo à guia visual como apoio. Uma vez concluída a deteção, é iniciada uma sequência de animações que pode ser controlada através de dois botões, permitindo avançar ou retroceder conforme necessário. Em simultâneo com as animações, estará disponível um leitor de vídeo no canto superior direito do ecrã, onde serão reproduzidos vídeos relacionados com a manutenção selecionada. À medida que o utilizador percorre as animações, será atualizada uma lista de tarefas localizada por baixo do leitor de vídeo. No final, o utilizador poderá optar por reiniciar todo o processo de manutenção ou regressar ao menu inicial.

Por fim, o operador também tem a opção de abandonar a marca atualmente detetada. Neste caso, a aplicação ficará novamente em modo de espera até ser feita nova deteção. Para evitar

inconsistências na apresentação dos dados, as informações do cartão são automaticamente limpas, assegurando que não permanecem informações desatualizadas da detecção anterior.

4.2.3 Rastreamento com Marcadores

A secção de fiação da RIOPELE é atualmente composta por cerca de 30 máquinas. Todas as máquinas, além de serem praticamente idênticas e de grandes dimensões, são constituídas por inúmeras partes que se movimentam constantemente, o que torna a detecção através dos seus modelos digitais bastante difícil. Tendo isso em conta, tornou-se essencial encontrar outra forma de identificar cada uma das máquinas através da aplicação. A solução adotada foi a utilização de um sistema de marcadores/marcas, ou seja, foram criadas imagens-alvo distintas para identificar cada uma das diversas máquinas de fiação da fábrica, funcionando de forma semelhante a um código QR. Esta abordagem destaca-se em relação à utilização de imagens-alvo, uma vez que permite a criação mais rápida e eficiente de um grande número de alvos de RA, mantendo um design padronizado e personalizado para o conjunto de marcadores. Em comparação com outras abordagens, como a detecção de modelos, os marcadores resolvem o problema da semelhança entre os modelos digitais e possibilitam a identificação das máquinas de forma mais rápida e eficaz.

Para a criação dos marcadores, foi utilizado o software de edição vetorial Adobe Illustrator [2], seguindo o guia de design de marcas disponibilizado pela documentação do Vuforia. O Adobe Illustrator destaca-se de outros programas de edição de imagens pelo uso de vetores, permitindo preservar a qualidade original da imagem em diferentes dimensões. Através do guia, foi possível desenvolver um *template* de marcador que permitiu a geração de várias marcas distintas. Esta abordagem permitiu uma gestão mais eficiente dos marcadores em ambiente Vuforia, bem como um nível de personalização superior, quando comparado com métodos mais convencionais, como a utilização de QRCodes.

Os marcadores são compostos por cinco elementos principais: área de design, elementos código, espaço livre, contorno e borda.

- **Área de design:** permite a introdução de elementos gráficos personalizados, tendo sido utilizada, neste caso, para incluir a silhueta de uma fábrica e o logótipo da RIOPELE.
- **Elementos código:** atuam como identificadores únicos, definindo a localização fixa dos possíveis identificadores dentro da marca, funcionando como uma sequência de padrões, onde existem elementos ativos e desativados. O número total de elementos código influencia diretamente a quantidade de marcas que podem ser geradas a partir do *template*, sendo necessário, numa fase inicial, especificar o número de marcadores pretendidos, de modo a obter o número de elementos código necessários. Neste caso, foram utilizados 34 elementos de forma quadrada e cor amarela, presentes na Figura 4.16, permitindo um total de 999 combinações diferentes, que resultam em 999 marcadores possíveis.
- **Espaço livre:** serve como área para a colocação dos elementos código.

- **Contorno e a Borda:** separam, respetivamente, o espaço livre e a área de design dos restantes elementos do marcador.

Na Figura 4.16, pode observar-se um dos marcadores utilizados neste projeto, cujo design remete para a representação de uma fábrica e das suas janelas.

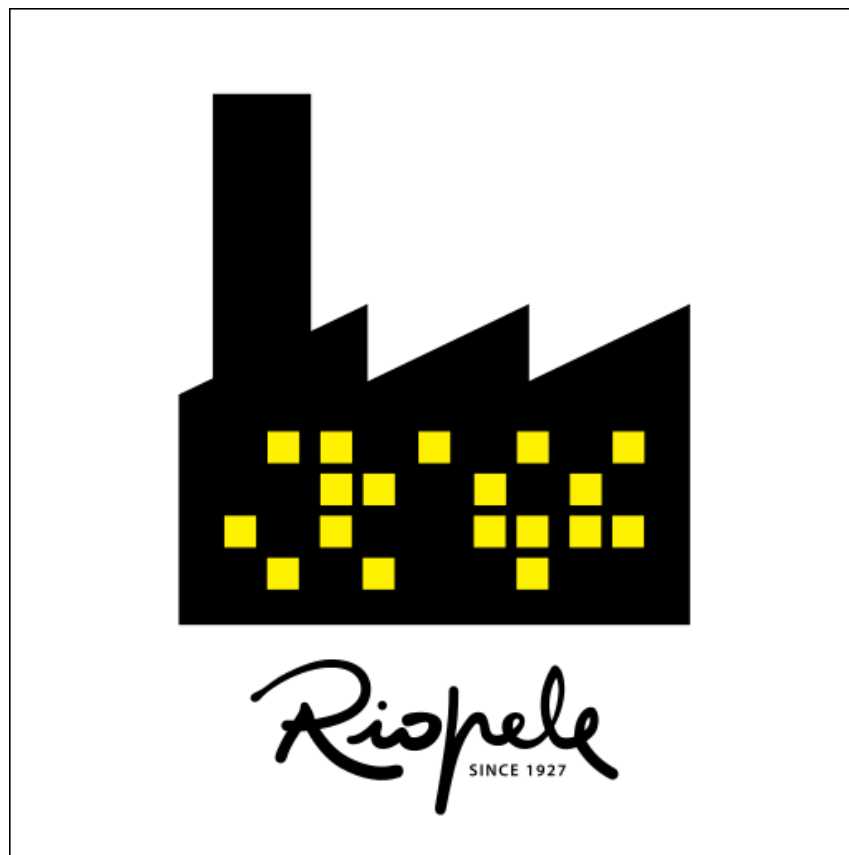


Figura 4.16: Marcador associado à máquina de fição com ID: 223.

Após a criação dos marcadores, estes foram armazenados numa base de dados fornecida pelo Vuforia, denominada VuMark Database [43]. Esta base de dados permite, gratuitamente, armazenar o *template* padrão de uma ou mais marcas de um projeto e gerar diferentes instâncias (ou marcas) dinamicamente, em formato SVG. Durante a criação da base de dados, foi necessário definir o tamanho dos marcadores no momento da impressão. Os representantes da fábrica estabeleceram um tamanho aproximado de 5x5 cm, garantindo uma fácil instalação nas máquinas de fição. Para uma identificação mais intuitiva, cada marca foi nomeada com o identificador da máquina a que pertence.

Após a definição da base de dados, esta foi importada para o ambiente de desenvolvimento Unity. Através de scripts em C#, tornou-se possível armazenar o ID da VuMark no momento da sua deteção. Como referido anteriormente, o identificador de cada VuMark corresponde ao identificador da sua respetiva máquina. Assim, ao detetar uma marca, a aplicação pode enviar pedidos à API da RIOPELE para obter as informações da máquina associada.

Durante os testes da aplicação, surgiram problemas relacionados com a dificuldade na identificação de diferentes marcas. Após deteções sequenciais de vários marcadores, o ID associado a uma nova deteção correspondia, por vezes, a uma marca previamente detetada, e não à marca atual. Para solucionar esta questão, foi alterado o código de captura dos marcadores, implementando uma reinicialização do rastreamento após cada deteção. Esta modificação resultou num aumento da rapidez e eficiência na identificação de marcadores em sequência.

4.2.4 Representação de dados

Atualmente, a fábrica já dispõe de outras aplicações que disponibilizam informações sobre as máquinas da secção têxtil, tais como *Dashboards* espalhadas por ecrãs ao longo de toda a secção, permitindo monitorizar o estado das máquinas, bem como aplicações que possibilitam uma pesquisa mais aprofundada sobre as informações das máquinas, tanto em formato web como em realidade virtual. Ao trazer esta funcionalidade para a RA, é possível aumentar a eficiência e a praticidade no controlo do estado das máquinas e dos eventos ocorridos, proporcionando aos operadores uma ferramenta útil durante as operações de manutenção.

Assim sendo, foi estabelecida uma comunicação, representada em B.3, entre a aplicação Unity e a API fornecida pela fábrica têxtil, através de scripts em C# para a obtenção de dados em três momentos distintos, representados na Figura 4.17. Para todas as pesquisas, foi utilizado como parâmetro principal o ID da máquina, obtido através da leitura da marca respetivamente associada.

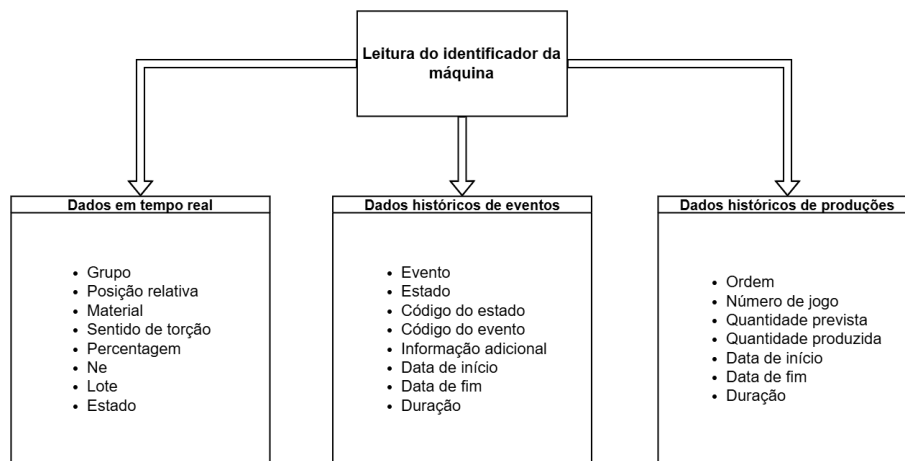


Figura 4.17: Esquema dos dados obtidos em cada momento.

O primeiro momento diz respeito às informações individuais de cada máquina, ou seja, aos dados principais em tempo real, relativos a uma determinada máquina. Estes dados são apresentados ao utilizador sob a forma de um cartão informativo, ilustrado na figura 4.18, no momento em que é confirmada a deteção de uma marca, seguindo um padrão de design e estrutura já utilizado pela fábrica noutras aplicações.

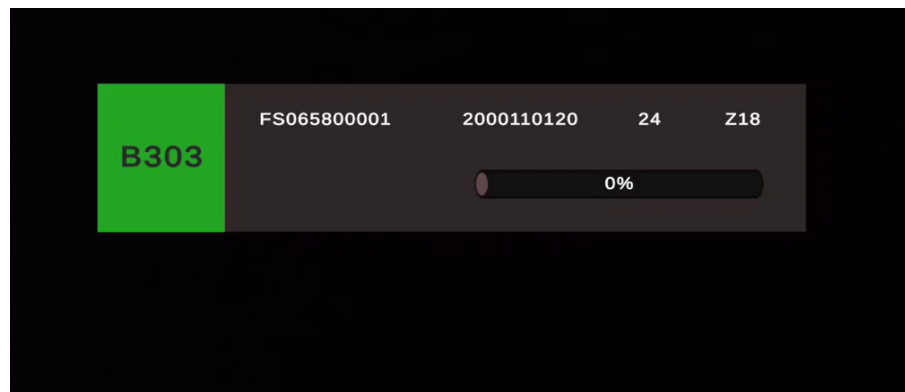


Figura 4.18: Cartão informativo da máquina com ID: 229.

As informações incluem detalhes como o tipo de material e o sentido da torção atual. Simultaneamente, é também efetuado outro pedido à API para obter informações sobre o nome do grupo a que a máquina pertence. Caso algumas das informações obtidas da API, relativas aos detalhes da máquina, sejam retornadas como "null", o cartão apresentará apenas o identificador da máquina, o nome do grupo a que pertence e o seu estado atual que, nestes casos, deverá variar entre estado de máquina pronta, em manutenção ou em avaria.

O segundo momento ocorre quando é realizada uma pesquisa sobre os eventos associados a uma máquina. Para tal, é efetuado um pedido à API para obter os eventos da máquina atualmente detetada, relativos a um determinado intervalo de tempo definido pelo utilizador no momento da pesquisa. Caso o formato de data introduzido pelo utilizador não esteja correto, será enviada uma mensagem de erro para o ecrã, informando sobre a formatação correta. Esta consulta retorna uma lista dinâmica, ilustrada na Figura 4.19, com diversas informações sobre todos os eventos ocorridos.

EVENTOS				
Definir Período:				
2025-04-29	até	2025-05-14	Confirmar	
Data	Evento	Argumento	Estado	Tempo
14-05-2025 11:46	Arranque	N/A	Em Produção Automática	N/A
14-05-2025 11:46	Fim do Doffer	N/A	Máquina Pronta	N/A
14-05-2025 11:42	Início do Doffer	N/A	Doffer	0h 4m
14-05-2025 11:42	Alarme Ordem Completa	5	Jogo Terminado	N/A
14-05-2025 11:42	Jogo Terminado	N/A	Jogo Terminado	N/A
14-05-2025 11:32	Finalizando Produção	N/A	Finalizando Produção	0h 10m
14-05-2025 02:55	Início de Jogo	200024263/ 35	Em Produção Automática	N/A
14-05-2025 02:55	Arranque	N/A	Em Produção Automática	N/A
14-05-2025 02:55	Fim do Doffer	N/A	Máquina Pronta	N/A
14-05-2025 02:48	Início do Doffer	N/A	Doffer	0h 7m
14-05-2025 02:47	Alarme Ordem Completa	5	Jogo Terminado	0h 1m
14-05-2025 02:47	Jogo Terminado	N/A	Jogo Terminado	N/A
14-05-2025 02:37	Finalizando Produção	N/A	Finalizando Produção	0h 10m
13-05-2025 18:00	Início de Jogo	200024263/ 34	Em Produção Automática	8h 37m
13-05-2025 18:00	Arranque	N/A	Em Produção Automática	N/A

Figura 4.19: Resultados da pesquisa de eventos associados a uma máquina.

Durante o processamento do pedido, o utilizador receberá uma mensagem no ecrã, informando que os dados estão a ser carregados. Os dados apresentados incluem a data do evento, o argumento, o estado, o tempo decorrido e o nome do evento. Caso o número de eventos ultrapasse o espaço disponível na área destinada, será adicionada dinamicamente uma *Scroll Bar* ajustada para conter todas as informações.

Por fim, o terceiro momento refere-se à pesquisa das produções de uma máquina, funcionando de forma idêntica à pesquisa de eventos. Neste caso, é efetuado um pedido à API para obter as produções realizadas por uma máquina num determinado intervalo de tempo definido pelo utilizador. Para cada produção, são disponibilizadas informações como o número de ordem, o número do jogo de tecido, a quantidade prevista e produzida, a data de início e fim, bem como o tempo decorrido. Caso não sejam retornadas informações por parte da API, será apresentada uma mensagem de erro ao utilizador, sendo este comportamento idêntico ao da pesquisa de eventos.

4.2.5 Formação e Manutenção

A secção de fiação da RIOPELE é constituída por cerca de 30 máquinas com aparência semelhante, sendo que todas elas partilham componentes idênticos, aos quais estão associadas tarefas específicas de manutenção. A Figura 4.20 apresenta uma fotografia real de uma dessas máquinas.



Figura 4.20: Máquina industrial da secção de fiação da RIOPELE.

Sempre que um novo operador é designado para realizar a manutenção de um equipamento, a fábrica necessita de garantir a sua formação adequada. A possibilidade de reduzir o tempo necessário para essa formação, sem comprometer a qualidade da aprendizagem, constitui um fator crítico para o bom funcionamento da unidade fabril. Neste contexto, a utilização de instruções visuais acessíveis durante a execução das tarefas representa uma solução eficaz, oferecendo um método mais intuitivo, direto e alinhado com a realidade operacional da fábrica.

1. Instruções Suportadas em Vídeo

Com esse objetivo em mente, foi desenvolvido na aplicação um leitor de vídeos que será utilizado tanto para a formação de operadores como para auxiliar durante um processo de manutenção. Este leitor disponibiliza vídeos para seis tipos de manutenções diferentes: encartamento superior, encartamento inferior, substituição de réguas, configuração de PLC, limpeza e montagem do patim de fibra longa. Cada uma destas manutenções inclui um ou mais vídeos com gravações de operadores reais a realizar o processo de manutenção na sua totalidade. As gravações foram feitas na fábrica durante um exercício de manutenção de uma das máquinas de fição.

Dentro da aplicação Unity, foi criado um submenu de manutenções. Esse submenu é composto por um cartão com seis botões, cada um associado a uma das manutenções disponíveis. Quando um desses botões é pressionado, o leitor de vídeo é ativado na interface e inicia-se o primeiro vídeo associado à manutenção escolhida. Este processo é possível através de scripts que fazem um pedido online ao servidor de manutenções para obter o conjunto de vídeos associados a uma manutenção, com base no ID correspondente ao botão pressionado. Por exemplo, se o botão pressionado for o de encartamento superior, serão retornados os endereços públicos dos vídeos associados ao processo de manutenção com ID igual a dois. O leitor de vídeo utilizado encontra-se representado na Figura 4.21.

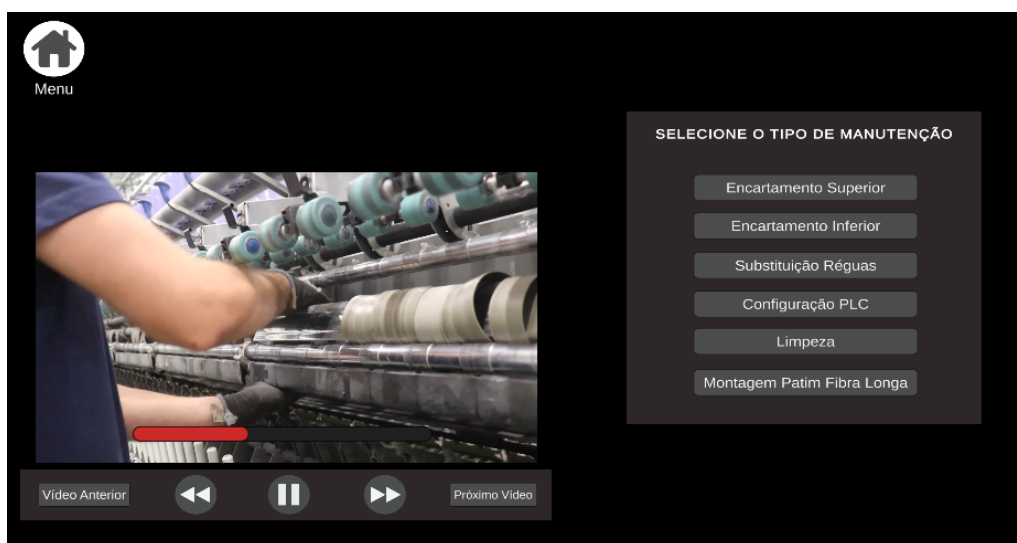


Figura 4.21: Leitor de vídeos de um processo de manutenção.

A interface apresenta uma barra que representa a duração total do vídeo e indica o tempo já decorrido, bem como seis botões de controlo. Dois botões permitem avançar ou retroceder o vídeo em 10 segundos, facilitando uma utilização mais eficiente. Outros dois botões servem para alternar entre vídeos dentro do processo, ou seja, possibilitam passar para o vídeo seguinte ou voltar ao anterior, estando ativos apenas se existirem vídeos seguintes ou anteriores. Por fim, existe também um botão que permite pausar e/ou retomar o vídeo atual.

2. Instruções Suportadas em RA

Adicionalmente, foi desenvolvido na aplicação um módulo de manutenção assistida em RA, ou seja, um sistema que, através da deteção do objeto físico de um dos componentes da máquina, permite aceder a um guia de manutenção composto por animações 3D em RA, bem como por vídeos associados a esse processo de manutenção. Neste caso, os objetos utilizados foram os patins, sendo disponibilizada assistência para os processos de manutenção do encartamento superior e para a montagem de um patim de fibra longa.

Para a criação dos modelos 3D dos objetos foi utilizada a ferramenta Blender. Inicialmente, procedeu-se à modelação 3D dos componentes, com base nas suas características físicas, tal como o modelo ilustrado na Figura 4.22. Posteriormente, foram aplicadas texturas e materiais de forma a garantir uma representação visual fiel à realidade. Por fim, foram desenvolvidas as animações, tendo por base as sub-etapas identificadas nos procedimentos de manutenção.

Os modelos animados foram exportados em formato Alembic [6], adequado para integração de animações em Unity, sem a necessidade de *rigging*. Já os modelos destinados à deteção com o Vuforia foram exportados em formato FBX, compatível com os requisitos do sistema de rastreamento por modelos (Vuforia MTG).

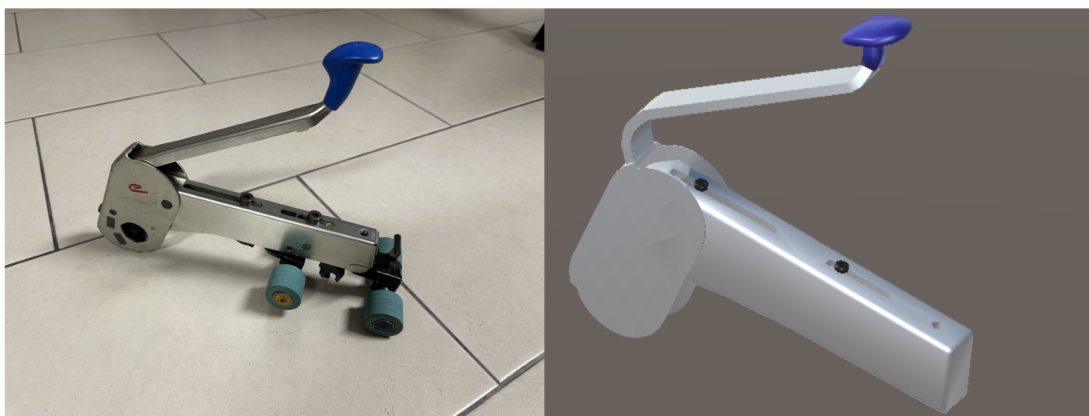


Figura 4.22: Comparação entre um patim da máquina de fiação e o seu respetivo modelo digital.

A partir dos modelos 3D desenvolvidos, foi feita a respetiva importação para a ferramenta Vuforia MTG, de forma a obter dois objetos-alvo detetáveis e as respetivas posições-guia, utilizadas para auxiliar o utilizador durante a deteção na aplicação. Após a criação dos objetos-alvo, foi feita a importação para o projeto em Unity.

Em ambiente Unity, foi necessário importar os modelos dos patins com as suas respetivas animações. Dado que as animações estavam em formato Alembic, foi necessário convertê-las para *mesh*, uma vez que os ficheiros Alembic não são compatíveis com aplicações Android. Para esta conversão foi utilizada uma biblioteca externa denominada FlipBookMeshBaker [51], que permite transformar animações baseadas em vértices num conjunto de *meshes* sequenciais adequadas à reprodução em dispositivos móveis.

Adicionalmente, foi desenvolvido um script personalizado responsável por percorrer todas as animações convertidas e garantir a sua repetição contínua, sempre que os modelos se encontrassem visíveis na cena.

O ecrã de manutenção assistida, representado na Figura 4.23, permite ao utilizador, após a deteção de um dos objetos, visualizar animações relacionadas com a manutenção desse componente. Simultaneamente, poderá assistir a vídeos associados, tal como na abordagem de instruções por vídeo. Por fim, estará também disponível uma lista de tarefas, percorrida à medida que as animações são reproduzidas, sendo que cada tarefa corresponde a uma sub-etapa do processo de manutenção. Para controlo da sequência, o utilizador poderá utilizar botões para avançar ou retroceder nas animações.

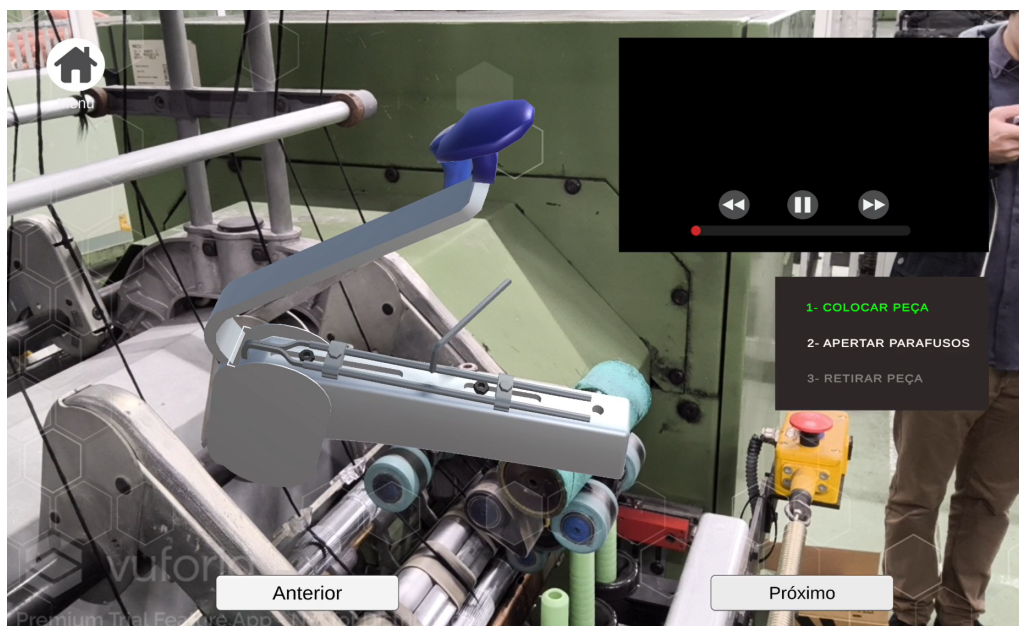


Figura 4.23: Animação em RA para manutenção do encartamento superior.

4.2.6 Assistente Virtual

Paralelamente ao desenvolvimento desta aplicação, foi também criado um Assistente Virtual, integrando tecnologias de Inteligência Artificial e *Machine Learning*. Este assistente é alimentado e treinado com base nas informações fornecidas pela API disponibilizada pela fábrica, bem como em manuais de instruções dos componentes das máquinas de fiação, estando restrito a responder apenas a questões relacionadas com essa informação. Para o seu

funcionamento, é utilizada parcialmente a API do OpenAI [58], de forma a auxiliar no processamento e compreensão das perguntas. De acordo com [40], *chats* de mensagens integrados com IA respondem de forma mais inteligente e demonstram maior flexibilidade, dinamismo e aplicabilidade em comparação com os assistentes tradicionais. Este AV, cujo desenvolvimento não faz parte do trabalho aqui exposto, comunica com o sistema "RioRA" através de um *chat* de mensagens e possui três modos distintos. Sempre que um dos modos é ativado, é exibida uma indicação visual no topo do *chat*. Os modos disponíveis são:

- **Modo Manutenção:** Apoio técnico baseado em documentação processada.
- **Modo Informação:** Consulta de dados operacionais em tempo real.
- **Modo Predição:** Análise preditiva para antecipação de falhas.

O *Chatbot* de mensagens, presente na Figura 4.24 e cuja implementação está representada em B.4, é composto por um *Scroll View*, um componente da interface do Unity que permite a disposição de conteúdos de forma dinâmica. Dentro desse *Scroll View* são inseridos dois elementos, cada um formado por um painel e uma caixa de texto. Um deles apresenta um fundo azul e o outro um fundo cinzento, remetendo para as cores das mensagens enviadas e recebidas, respetivamente. O objetivo é permitir que o utilizador envie mensagens e receba respostas do AV, tal como numa aplicação de mensagens comum.

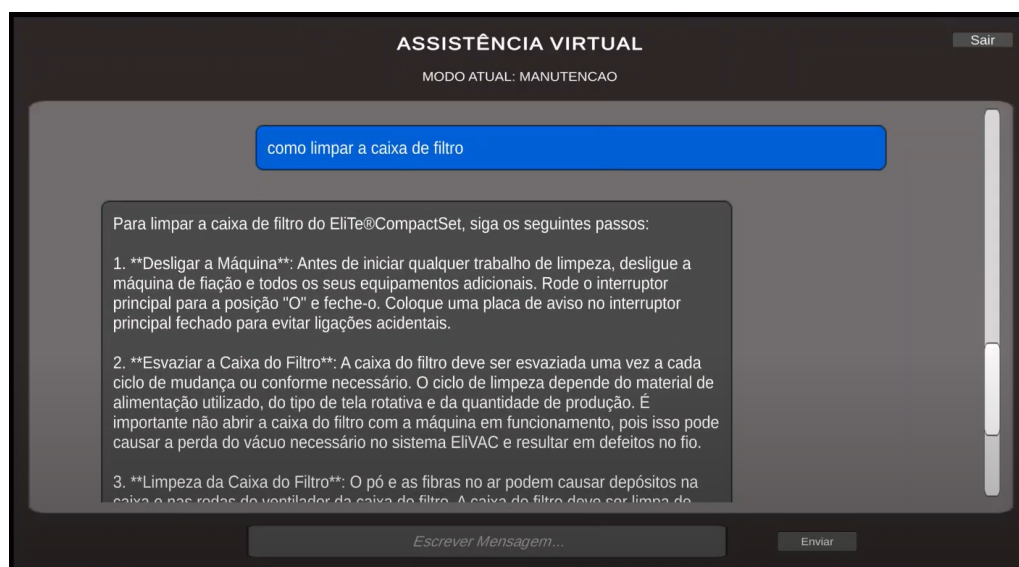


Figura 4.24: *Chatbot* de mensagens para comunicação com Assistente Virtual.

Através do *chat*, os operadores da fábrica podem rapidamente colocar questões sobre qualquer máquina do setor de fiação como por exemplo, “Qual o estado atual da máquina 221 ?” ou “Como faço a manutenção de um patim de fibra longa na máquina 230 ?”.

As mensagens são enviadas através de um campo de texto e transmitidas para o Assistente Virtual através de um pedido POST. A resposta é então processada e devolvida ao *chat* em formato

de texto, bem como em formato de áudio, através de um *Audio Source* presente na *scene* do Unity. Em caso de erro com a conexão ao AV, é devolvida uma mensagem de erro, predefinida, informando o utilizador, sobre a impossibilidade de conectar com o Assistente Virtual.

A qualquer momento, o utilizador pode abandonar ou trocar o modo atual, utilizando comandos como "Sair do modo atual" ou "Entrar no modo informação".

4.3 Conclusão do Capítulo

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de dois sistemas, cada um pertencente a fases distintas em termos de objetivos, desafios enfrentados e resultados obtidos, porém complementares no que diz respeito à exploração e aplicação de tecnologias emergentes, como a Realidade Aumentada, na potencialização da interação e manutenção de equipamentos industriais em diferentes contextos.

A primeira fase consistiu na construção de um protótipo conceptual, de nome "Coffee Twin", no qual foi atribuído a uma máquina de café um modelo *Digital Twin*. Nesta fase, a RA foi utilizada de forma a permitir que o utilizador interagisse com o modelo físico da máquina através da obtenção de informações em tempo real, da execução de comandos por voz, atuações remotas sobre o equipamento e de animações 3D em RA sobre um dos processos principais da máquina. Esta fase foi importante, na medida em que permitiu criar um campo de experimentação, possibilitando testar, validar e consolidar conhecimentos técnicos sobre a integração entre RA, IoT, comunicação em rede e operação bidirecional, num cenário controlado.

A segunda fase, por sua vez, permitiu a aplicação dos princípios estabelecidos na fase anterior a um contexto industrial real. Assim sendo, foi concebido o "RioRA", um sistema completo, escalável e funcional, que possibilita a identificação de máquinas reais através de marcadores personalizados, o acesso a informações operacionais em tempo real, a consulta de eventos e produções históricas, a visualização de vídeos reais e de animações 3D em RA sobre procedimentos de manutenção, bem como a interação com um Assistente Virtual inteligente, através de um *chat* de mensagens. O sistema desenvolvido evidencia a importância da adaptabilidade ao ambiente fabril e, ao mesmo tempo, oferece uma nova forma de capacitação e suporte técnico aos operadores.

Para cada uma destas fases, é abordada inicialmente a estrutura geral dos sistemas que as compõem, seguindo-se uma descrição geral do funcionamento e da utilização de cada uma das aplicações concebidas. Ambas as fases terminam com uma explicação detalhada da sua implementação, subdividida em diferentes etapas e grupos de desenvolvimento.

Concluído o desenvolvimento de ambas as fases, torna-se necessário proceder à avaliação do desempenho, usabilidade e impacto das soluções desenvolvidas. No capítulo seguinte, serão realizados testes para cada uma das aplicações, sendo que, no caso da aplicação da Fase 2, estes decorrerão com a participação de trabalhadores reais da fábrica têxtil. Os resultados obtidos permitirão aferir o grau de eficácia da solução proposta, bem como identificar oportunidades de melhoria e possíveis direções para evoluções futuras.

Capítulo 5

Testes, Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão testadas ambas as aplicações desenvolvidas para cada uma das fases do projeto e, posteriormente, os resultados obtidos serão analisados e discutidos.

Estes testes são essenciais uma vez que um dos principais objetivos deste projeto é assegurar que as soluções propostas sejam eficazes e adequadas à realidade atual do contexto industrial. Os testes encontram-se divididos em duas partes distintas, correspondendo cada uma delas à respetiva fase do projeto. Na primeira parte os aspetos funcionais e técnicos da aplicação criada para o protótipo conceptual são avaliados, enquanto na segunda parte, a aplicação concebida para o ambiente industrial será testada por trabalhadores reais. Cada um dos conjuntos de testes pretende validar aspetos como a performance, a fiabilidade e a usabilidade das aplicações no seu contexto de utilização.

Após realizados os testes, os resultados obtidos serão apresentados e discutidos, permitindo assim, uma avaliação crítica do desempenho das aplicações e a identificação de possíveis melhorias.

5.1 Testes ao Sistema “Coffee Twin”

A Fase 1 terminou com a exposição e apresentação do projeto em eventos académicos, aproveitando a oportunidade para permitir que a aplicação de Realidade Aumentada fosse testada por diferentes utilizadores e, posteriormente, avaliada através de um questionário com o método *System Usability Scale* (SUS) [68], disponibilizado no fim do teste.

No total, participaram 13 utilizadores distintos, dos quais 12 pertenciam ao ensino superior, com idades compreendidas entre os 19-25 anos, e 1 ao ensino secundário, com idade entre os 15-18 anos. Relativamente ao género, 1 participante era do género feminino e os restantes do género masculino. Verificou-se ainda que 6 dos participantes nunca tinham experimentado uma aplicação semelhante, não estando, por isso, familiarizados com sistemas deste género.

O questionário aplicado teve por base uma escala de cinco pontos, em que 1 corresponde a "Discordo totalmente" e 5 a "Concordo totalmente", onde foram incluídas as seguintes questões:

- Eu acho que gostaria de usar a aplicação com frequência;

- Eu acho a aplicação desnecessariamente complexa;
- Eu achei a aplicação fácil de usar;
- Eu julgo que necessitaria de ajuda de uma pessoa com conhecimentos técnicos para usar a aplicação;
- Eu considero que as várias funções da aplicação estão muito bem integradas;
- Eu acho que a aplicação apresenta muitas inconsistências;
- Eu imagino que as pessoas aprenderão a usar esta aplicação rapidamente;
- Eu achei a aplicação complicada de usar;
- Eu senti-me confiante a usar a aplicação;
- Eu necessitei de aprender várias coisas novas antes de usar a aplicação.

De forma geral, os participantes consideraram a aplicação de fácil utilização, referindo que se sentiram confiantes durante a sua interação. Em termos de sugestões, não foram deixados quaisquer comentários sobre a aplicação.

O questionário obteve, de forma global, uma pontuação de 77 pontos, refletindo um elevado nível de aceitação por parte dos utilizadores e reforçando as potencialidades deste sistema.

5.2 Testes ao Sistema “RioRA”

De forma a validar a aplicação desenvolvida, foi realizado um questionário qualitativo, em ambiente industrial, aplicado a colaboradores reais da fábrica que desempenham funções críticas no que diz respeito à área de operação e manutenção de equipamentos. Entre os participantes incluía-se o Chefe Geral de Manutenção, o Chefe de Manutenção de uma área específica, três Engenheiros Informáticos e dois Engenheiros Industriais. Assim sendo, no total, a amostra foi composta por sete participantes, dos quais dois tinham entre os 26-36 anos, dois entre os 37-50 anos, e três entre os 50-65 anos. Seis dos participantes eram do género masculino e um deles do género feminino, sendo que todos possuíam uma formação superior.

O questionário aplicado, mais uma vez, utilizou uma escala de cinco pontos, onde foram incluídas as seguintes questões:

- Eu considero que gostaria de usar esta aplicação com frequência;
- Achei a aplicação desnecessariamente complexa;
- A aplicação foi fácil de usar;
- Necessitaria de suporte técnico especializado para usar esta aplicação;

- Considero as funções bem integradas;
- Considero que houve muita inconsistência nesta aplicação;
- Imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar esta aplicação muito rapidamente;
- Achei o sistema complexo de usar;
- Senti-me muito confiante ao usar esta aplicação;
- Necessitei de aprender muitas coisas novas antes de começar a usar a aplicação.

Para efeitos de avaliação, os participantes testaram diretamente a aplicação, tendo-lhes sido atribuídas quatro marcas, cada uma correspondente a uma máquina de fiação diferente, com o objetivo de simular um cenário real de utilização

De forma unânime, os participantes consideraram as tarefas propostas de fácil execução, destacando a intuitividade na leitura das marcas e a rapidez e precisão das diversas interações no sistema. Além disso, manifestaram satisfação com a experiência geral de utilização da aplicação de RA, salientando aspetos positivos como:

- A fluidez da aplicação;
- A componente formativa;
- A facilidade e praticidade no acesso aos dados das máquinas.

Para além destes comentários, os participantes deixaram ainda sugestões relativas a possíveis melhorias futuras, nomeadamente:

- Um design mais apelativo;
- Uma melhoria na interação nos menus de Produções e Eventos.

Por fim, o questionário incluiu a aplicação do método de avaliação SUS, ilustrado na Figura 5.1, que resultou numa pontuação global de 70 pontos, valor que indica um ótimo nível de usabilidade e uma forte aceitação por parte dos avaliadores.

27. Perguntas

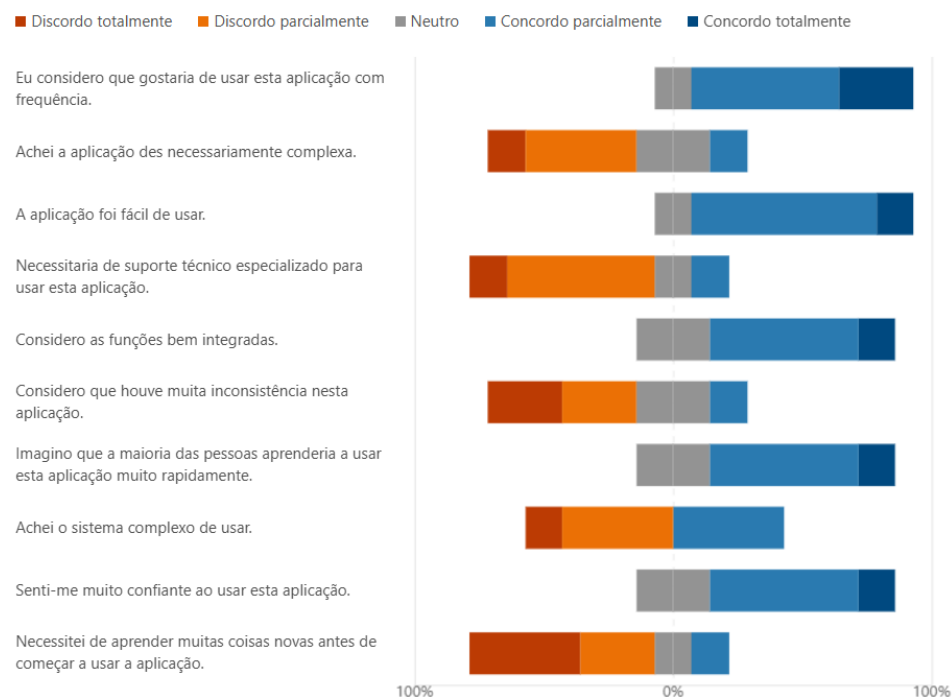


Figura 5.1: Questionário com o método SUS.

Adicionalmente, foram realizados testes com a componente de manutenção assistida por RA, tal como ilustrado na Figura 5.2.



Figura 5.2: Demonstração da componente de manutenção com RA na secção de fição.

Estes testes incluíram demonstrações práticas com os participantes do questionário SUS, durante as quais foi apresentado e explicado todo o processo de utilização desta funcionalidade. Foram demonstrados, em particular, os procedimentos de manutenção associados ao encartamento superior e à montagem de um patim de fibra longa. No final das demonstrações, os colaboradores manifestaram uma receção positiva em relação à ferramenta, salientando a sua interatividade, a facilidade de utilização e a clareza na apresentação das instruções, aspetos que contribuíram para uma perceção geral favorável da funcionalidade.

5.3 Discussão

Após a realização dos testes correspondentes à Fase 1 do projeto, foi aplicado um questionário com o objetivo de avaliar qualitativamente os resultados obtidos nesta fase. Os dados recolhidos demonstraram que a aplicação, além de apresentar uma utilização simples e intuitiva, possui uma baixa barreira de entrada, o que indica um elevado potencial de aceitação em contextos reais de utilização.

Com base nestes resultados, iniciou-se o desenvolvimento da Fase 2, aplicando os conhecimentos adquiridos à realidade do setor de fiação da fábrica da RIOPELE. Os resultados desta segunda fase evidenciaram diversos pontos positivos da utilização desta tecnologia, nomeadamente a sua praticidade na leitura de dados e o contributo significativo para a componente de formação de operadores, destacando-se assim o sucesso da implementação e a satisfação manifestada pelos utilizadores da aplicação. Foram também registadas algumas sugestões de melhoria, como a otimização da interação nos menus de Produções e Eventos, bem como um aprimoramento do design da interface. Estas recomendações deverão ser consideradas numa futura atualização ou nova versão do projeto.

A aplicação desenvolvida, designada "RioRA", apresentou resultados muito positivos, destacando-se em relação a outros sistemas semelhantes analisados, conforme ilustrado na Tabela 5.1. Um dos principais fatores diferenciadores reside na integração de dois tipos distintos de rastreamento, utilizados de forma estratégica e contextualizada, a utilização de três tipos diferentes de media (texto, vídeos e animações 3D), bem como na sua adaptação específica ao setor têxtil.

Tabela 5.1: Análise comparativa de sistemas.

Sistema	Contexto Inserido	Medias Utilizadas	Rastreamento
[3, 10]	Produção de Estampas em Metal	Texto, Vídeos, Animações 3D	Marcadores
[55]	Sem Indústria Definida	Texto, Animações 3D	Coordenadas Espaciais
[30]	Indústria Ferroviária	Texto, Animações 3D	Marcadores
[86]	Sem Indústria Definida	Texto, Vídeos	Modelos
[42]	Indústria Automóvel	Texto, Animações 3D	Modelos
[15]	Indústria Automóvel	Texto	Marcadores
"RioRA"	Indústria Têxtil	Texto, Vídeos, Animações 3D	Marcadores e Modelos

É possível verificar que muitos dos estudos apresentados se focam em setores mais genéricos, sem uma indústria definida como alvo, ou então em indústrias ligadas à montagem de equipamentos, como o setor automóvel. No que diz respeito aos tipos de media utilizados, observa-se que as aplicações tendem a recorrer apenas a vídeos ou a animações 3D, acompanhados por conteúdos textuais de apoio, sendo apenas verificada uma vez a utilização combinada de todos os formatos media. Por fim, relativamente ao rastreamento, observa-se que nenhum dos estudos analisados aborda mais do que um tipo de rastreamento em RA.

Mais concretamente, a aplicação "RioRA" distingue-se pela utilização de marcadores visuais para identificar as diversas máquinas do setor de fiação, o que permitiu ultrapassar desafios como a replicação de máquinas com aparência idêntica. Por outro lado, o recurso ao rastreamento por modelos 3D, aplicado a diferentes objetos de manutenção, assegura uma maior interatividade na apresentação dos conteúdos em RA, sem comprometer a estabilidade do rastreamento, uma vez que todas as máquinas deste setor partilham componentes comuns.

A aplicação integra ainda diversas funcionalidades, como a leitura de dados em tempo real e históricos, a visualização de procedimentos de manutenção através de vídeos e animações 3D em RA, bem como um *chatbot* para comunicação com um assistente virtual. Para além das funcionalidades atuais, a arquitetura da aplicação foi concebida de forma a permitir expansões futuras, tanto ao nível das tecnologias de rastreamento como da sua aplicação a outros setores da indústria têxtil.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Atualmente, tem emergido uma forte aposta na digitalização por parte das indústrias, que procuram, cada vez mais, aumentar a sua produtividade e qualidade, de modo a reforçarem a sua competitividade no mercado. Neste contexto, destaca-se a crescente aposta na tecnologia de Realidade Aumentada, devido à sua praticidade e facilidade de utilização, possibilitada pela parcial virtualização do mundo real.

O trabalho descrito nesta dissertação expõe o desenvolvimento de duas aplicações de RA aplicadas a sistemas de *Digital Twins*, divididas em duas fases de desenvolvimento distintas.

Na primeira fase, foram exploradas as possibilidades de integração desta tecnologia com funcionalidades como a leitura e visualização de dados, a orientação para formação na utilização e/ou manutenção de equipamentos e teleoperação. A aplicação "Coffee Twin", desenvolvida nesta fase incorporou estas funcionalidades com o objetivo de auxiliar na utilização e controlo de uma máquina de café, focando-se num dos seus processos principais.

Já na segunda fase, foi apresentada a arquitetura de uma aplicação de RA orientada para a visualização de informações, para a comunicação com um AV através de um *chatbot* e para a formação de operadores no contexto da manutenção de equipamentos industriais, num ambiente fabril real. Enquanto, na primeira fase, o foco foi a validação de uma prova de conceito e a apresentação dos seus resultados, a segunda fase centrou-se na resposta a necessidades reais de uma fábrica da indústria têxtil.

Os resultados iniciais obtidos com a aplicação desenvolvida na Fase 2 ("RioRA") revelaram-se positivos, demonstrando a viabilidade da sua utilização em contexto industrial. Quando comparada com outros sistemas semelhantes, previamente analisados, esta aplicação destaca-se pela integração de dois tipos distintos de rastreamento, aplicados de forma estratégica consoante o contexto de utilização, pela integração de três tipos de media diferentes e também pela sua arquitetura versátil, permitindo a sua adaptação a diferentes secções da indústria têxtil. Tal adaptação pode ser facilmente concretizada através da substituição e/ou adição de marcadores e da introdução de novos modelos animados.

Assim sendo, é possível concluir que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado. Espera-se que todo o conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento deste projeto possa servir de base e apoio para futuros desenvolvimentos e investigações na área de aplicações de RA, com o objetivo de facilitar o controlo de informação e otimizar os processos de manutenção e formação de operadores industriais.

Todas as etapas da metodologia adotada, descrita na Secção 1.3, foram seguidas durante o desenvolvimento deste trabalho e apresentadas ao longo das diferentes secções: a Identificação do Problema e Motivação está presente na Secção 1.1 e no Capítulo 3; a Definição dos Objetivos para uma Solução encontra-se na Secção 1.2; as atividades de Design, Desenvolvimento e Demonstração estão descritas no Capítulo 4; o processo de Avaliação surge no Capítulo 5; e, por fim, a Comunicação é evidenciada através da publicação de artigos científicos em conferências internacionais, indicadas no Apêndice A.

6.2 Trabalho Futuro

Após a conclusão deste projeto, começaram já a ser estudadas e discutidas possíveis melhorias, bem como o próximo passo a seguir, mesmo tendo em conta que todos os requisitos iniciais definidos pela fábrica foram plenamente alcançados.

Uma melhoria de fácil implementação seria a otimização do design geral da interface da aplicação destinada à fábrica têxtil, uma vez que esta foi uma das sugestões apontadas pelos operadores durante a fase de testes.

Outra implementação a ter em conta é a introdução de uma base de dados dedicada ao armazenamento dos processos de manutenção, bem como dos respetivos conteúdos multimédia associados, permitindo uma gestão mais eficiente da informação relativa às diferentes tarefas do setor de fição. Para esta abordagem deverá ser tida em conta a atual preferência na fábrica pela animação e modelação utilizando a ferramenta Blender.

Adicionalmente, uma evolução possível seria a introdução das funcionalidades do rastreamento de área disponibilizadas pelo Vuforia. Esta tecnologia permite o reconhecimento de ambientes físicos inteiros, através da digitalização prévia de espaços tridimensionais, como a secção de fição da fábrica. Permitindo a disponibilização de conteúdos aumentados sem necessidade da utilização de deteção de marcas ou modelos.

Paralelamente, será também pertinente considerar o desenvolvimento de planos de formação dedicados aos operadores, com o objetivo de promover uma adoção mais eficaz da tecnologia e garantir que os colaboradores tiram o máximo partido das funcionalidades disponíveis. Estes planos deverão ser discutidos em conjunto com a fábrica, podendo incluir documentação de apoio à utilização da aplicação, sessões práticas de formação e introdução a conceitos básicos de RA.

Por fim, será também importante considerar a exploração de diferentes dispositivos de RA, com o objetivo de aumentar a praticidade e facilidade de utilização da aplicação, bem como permitir a introdução de novas funcionalidades adaptadas a diferentes contextos industriais.

Referências

- [1] Ihsane Abouzid e Rajaa Saidi. Proposal of bpmn extensions for modelling manufacturing processes. Em *2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, páginas 1–6, 2019.
- [2] Adobe. Adobe illustrator. <https://www.adobe.com/pt/products/illustrator.html>. Versão 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [3] Filipe Alves, Hasmik Badikyan, H.J. António Moreira, João Azevedo, Pedro Miguel Moreira, Luís Romero, e Paulo Leitão. Deployment of a smart and predictive maintenance system in an industrial case study. Em *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, páginas 493–498, 2020.
- [4] Nikolaus Angel, Horst Orsolits, e Jose Garcia. Developing an ar based tool for teaching motion analysis on assembly tasks. Em *2022 8th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, páginas 1–7, 2022.
- [5] AlphaCephei. Vosk. <https://alphacephei.com/vosk/>, 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [6] Mike Bayer. Alembic: Ferramenta de migração de banco de dados para sqlalchemy. <https://alembic.sqlalchemy.org/en/latest/>, 2025. Consultado em: 14 de junho de 2025.
- [7] Z M Bi e Lihui Wang. Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 26(5):403–413, outubro 2010.
- [8] Alexander Büchner, Gioele Micheli, Julian Gottwald, Linda Rudolph, Dorothea Pantförder, Gudrun Klinker, e Birgit Vogel-Heuser. Human-centered augmented reality guidance for industrial maintenance with digital twins: A use-case driven pilot study. Em *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, páginas 74–76, 2022.
- [9] Ana Cachada, Jose Barbosa, Paulo Leitão, Carla A.S. Geraldcs, Leonel Deusdado, Jacinta Costa, Carlos Teixeira, João Teixeira, António H.J. Moreira, Pedro Miguel Moreira, e Luís Romero. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture. Em *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, volume 1, páginas 139–146, 2018.
- [10] Ana Cachada, David Costa, Hasmik Badikyan, José Barbosa, Paulo Leitão, Osmano Morais, Carlos Teixeira, João Azevedo, Pedro Miguel Moreira, e Luís Romero. Using ar interfaces to support industrial maintenance procedures. Em *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, páginas 3795–3800, 2019.

- [11] Gustavo Caiza e Ricardo Sanz. Digital twin for monitoring an industrial process using augmented reality. Em *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, páginas 1–5, 2022.
- [12] Julie Carmigniani, Borko Furht, Marco Anisetti, Paolo Ceravolo, Ernesto Damiani, e Misa Ivkovic. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimed. Tools Appl.*, 51(1):341–377, janeiro 2011.
- [13] Jack Cheng, Keyu Chen, e Weiwei Chen. Comparison of marker-based ar and markerless ar: A case study on indoor decoration system. Em *2017 Lean Computing in Construction Congress (LC3)*, volume 2, 2017.
- [14] Heungjae Cho, Sungkun Lee, e Jaeil Park. Time estimation method for manual assembly using modapts technique in the product design stage. *International Journal of Production Research*, 52(12):3595–3613, 2014.
- [15] Amal Chouchene, Adriana Ventura Carvalho, Fernando Charrua-Santos, e Walid Barhoumi. Augmented reality-based framework supporting visual inspection for automotive industry. *Applied System Innovation*, 5(3), 2022.
- [16] Baidu AI Cloud. Baidu ai cloud. <https://cloud.baidu.com/>. Versão 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [17] SQLite Consortium. Sqlite. <https://www.sqlite.org/>. Versão 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [18] Microsoft Corporation. Mixed reality toolkit. <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk3-overview/>. Versão 3. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [19] Microsoft Corporation. Mixedreality-webrtc. <https://microsoft.github.io/MixedReality-WebRTC/>. Versão 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [20] André Costa, João Miranda, Duarte Dias, Nuno Dinis, Luís Romero, e Pedro Miguel Faria. Smart maintenance solutions: Ar- and vr-enhanced digital twin powered by fiware. *Sensors*, 25(3), 2025.
- [21] Ahmad Ali Hakam Dani e Suhono Harso Supangkat. Combination of digital twin and augmented reality: A literature review. Em *2022 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, páginas 1–6, 2022.
- [22] Gabriel Evans, Jack Miller, Mariangely Iglesias Pena, Anastacia MacAllister, e Eliot Winer. Evaluating the microsoft hololens through an augmented reality assembly application. Em *Degraded environments: sensing, processing, and display 2017*, volume 10197, páginas 282–297. SPIE, 2017.
- [23] Vallentina Wahyu Febrihartanti, Bimo Sunarfri Hantono, e Ahmad Nasikun. Analysis of marker factors effect on the detection process of image-based tracking in web augmented reality. Em *2024 16th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, páginas 380–385, 2024.
- [24] Fernando Fernandez, William Oñate, Morelva Saeteros, e Gustavo Caiza. Control and maintenance system with augmented reality for a stone counter. Em *2021 8th International*

- Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)*, páginas 1–5, 2021.
- [25] M. Fiala. Artag, a fiducial marker system using digital techniques. Em *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 2, páginas 590–596 vol. 2, 2005.
- [26] Blender Foundation. Blender - a 3d modeling and rendering package. <https://www.blender.org>. Versão 4.3. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [27] FIWARE Foundation. Fiware generic enablers catalogue. <https://www.fiware.org/developers/catalogue/>, 2024. Consultado em: 25 de junho de 2024.
- [28] FIWARE Foundation. Orion context broker quick start guide. https://fiware-orion.readthedocs.io/en/master/quick_start_guide.html, 2025. Consultado em: 14 de junho de 2025.
- [29] OpenJS Foundation. Node-red. <https://nodered.org/>. Versão 4.0.9. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [30] Clara Garcia, Mario Ortega, Eugenio Ivorra, Manuel Contero, Pau Mora, e Mariano L. Alcañiz. Holorailway: an augmented reality system to support assembly operations in the railway industry. *Advances in Manufacturing*, 12(4):764 – 783, 2024. Cited by: 4.
- [31] Liang Gong, Åsa Fast-Berglund, e Björn Johansson. A framework for extended reality system development in manufacturing. *IEEE Access*, 9:24796–24813, 2021.
- [32] Michael Grieves. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *ResearchGate*, 2014.
- [33] Francisco Gutiérrez, M. Antonieta Abud, Fernando Vera, e J. Alfredo Sánchez. Application of contextual qr codes to augmented reality technologies. Em *CONIELECOMP 2013, 23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing*, páginas 264–269, 2013.
- [34] Ryan C. Heitz. *Hello Raspberry Pi!: Python programming for kids and other beginners*. Manning, 2016.
- [35] Anders Hejlsberg, Scott Wiltamuth, e Peter Golde. *C# language specification*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2003. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [36] Autodesk Inc. Autodesk fusion. <https://www.autodesk.com/pt/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. Versão 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [37] Autodesk Inc. Fbx. <https://www.autodesk.com/products/fbx/overview>. Versão 2024. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [38] Autodesk Inc. Maya. <https://www.autodesk.com/maya>. Versão 2024. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [39] PTC Inc. Vuforia. <https://www.ptc.com/en/products/vuforia>, 2024. Consultado em: 16 de junho de 2025.

- [40] Tanvi Khonde, Sneha Patle, Shreya Talvekar, e Jahnavi Hajbe. Building a smart virtual chatbot assistant with html, css, and javascript. Em *2025 International Conference on Machine Learning and Autonomous Systems (ICMLAS)*, páginas 1534–1539, 2025.
- [41] Sebastian Knopp, Philipp Klimant, e Christoph Allmacher. Industrial use case - ar guidance using hololens for assembly and disassembly of a modular mold, with live streaming for collaborative support. Em *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, páginas 134–135, 2019.
- [42] Fotios K. Konstantinidis, Ioannis Kansizoglou, Nicholas Santavas, Spyridon G. Mouroutsos, e Antonios Gasteratos. Marma: A mobile augmented reality maintenance assistant for fast-track repair procedures in the context of industry 4.0. *Machines*, 8(4), 2020.
- [43] Juraj Kováč, Peter Malega, Vladimír Rudy, e Jozef Svetlík. Vumark’s method of production layout designing. *Applied Sciences*, 13(3), 2023.
- [44] Zoran Kunkera, Ivana Željковиć, Ratko Mimica, Boris Ljubenkovic, e Tihomir Opetuk. Development of augmented reality technology implementation in a shipbuilding project realization process. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 2024.
- [45] Jay Lee, Behrad Bagheri, e Hung-An Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23, 2014.
- [46] Jiewu Leng, Weinan Sha, Baicun Wang, Pai Zheng, Cunbo Zhuang, Qiang Liu, Thorsten Wuest, Dimitris Mourtzis, e Lihui Wang. Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65:279–295, 2022.
- [47] Fei Li. The direction and way of ar technology promoting the cultivation of animation talents in colleges and universities in the information age. Em *2021 International Symposium on Advances in Informatics, Electronics and Education (ISAIEE)*, páginas 129–132, 2021.
- [48] Yongchun Liu e Juan Li. Research on the application of computer virtual reality technology in animation software modeling production. Em *2023 International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics (ICTEI)*, páginas 810–813, 2023.
- [49] Yuhan Liu, Qian Sun, Yong Tang, Ying Li, Weiqi Jiang, e Jianing Wu. Virtual reality system for industrial training. Em *2020 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV)*, páginas 338–339, 2020.
- [50] Google LLC. Android. <https://www.android.com>, 2025. Consultado em: 2 de janeiro de 2025.
- [51] Jesper Lundbäck. FlipBookMeshBaker: Bake alembic data to mesh arrays for unity. <https://github.com/snorulf/FlipBookMeshBaker>, 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [52] Microsoft. Hololens – documentação microsoft. <https://learn.microsoft.com/pt-pt/hololens/>, 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [53] Adolph Kapoko Mojapelo e Mfundo Andrew Maneli. Lidar-based augmented reality implementation for library tours. Em *2024 IST-Africa Conference (IST-Africa)*, páginas 1–9, 2024.

- [54] Luciano C. S. Moreira e Renato C. Ruschel. A realidade aumentada auxiliando a manutenção da edificação. Em *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI)*, 2018.
- [55] Dimitris Mourtzis, Vasileios Siatras, e John Angelopoulos. Real-time remote maintenance support based on augmented reality (ar). *Applied Sciences*, 10(5), 2020.
- [56] Ndala Yves Mulongo. Industry 5.0 a novel technological concept. Em *2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, páginas 1–6, 2024.
- [57] Esron Rikardo Nainggolan, Hasta Herlan Asymar, Aloysius Rangga Aditya Nalendra, Anton, Fajar Sulaeman, Sidik, Ummu Radiyah, e Susafa’ati. The implementation of augmented reality as learning media in introducing animals for early childhood education. Em *2018 6th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, páginas 1–6, 2018.
- [58] OpenAI. Chatgpt: Chatbot baseado no modelo de linguagem gpt-4. <https://chat.openai.com>, 2023. Consultado em: 14 de junho de 2025.
- [59] Oracle Corporation. Mysql. <https://www.mysql.com/>, 2024. Consultado em: 29 de junho de 2025.
- [60] Matthew J Page, Joanne E McKenzie, Patrick M Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C Hoffmann, Cynthia D Mulrow, Larissa Shamseer, Jennifer M Tetzlaff, Elie A Akl, Sue E Brennan, Roger Chou, Julie Glanville, Jeremy M Grimshaw, Asbjørn Hróbjartsson, Manoj M Lalu, Tianjing Li, Elizabeth W Loder, Evan Mayo-Wilson, Steve McDonald, Luke A McGuinness, Lesley A Stewart, James Thomas, Andrea C Tricco, Vivian A Welch, Penny Whiting, e David Moher. The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, página n71, 3 2021.
- [61] C Sundara Paripooranan, R Abishek, D C Vivek, e S Karthik. An implementation of ar enabled digital twins for 3-d printing. Em *2020 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (Formerly iNiS)*, páginas 155–160, 2020.
- [62] Ken Peffers, Tuure Tuunanen, Marcus A. Rothenberger, e Samir Chatterjee. A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24:45–77, 12 2007.
- [63] Michael Rath, Aymen Gannouni, Daniel Luetticke, e Thomas Gries. Digitizing a distributed textile production process using industrial internet of things: A use-case. Em *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, páginas 315–320, 2021.
- [64] André Rodrigues, Nuno Correia, e Fernando Birra. Mobile augmented reality as a field-assistance tool in urban maintenance. Em *2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, páginas 268–273, 2021.
- [65] Scott D Roth. Ray casting for modeling solids. *Computer graphics and image processing*, 18(2):109–144, 1982.
- [66] Rajko Rubeša, Nikša Fafandjel, e Damir Kolić. Procedure for estimating the effectiveness of ship modular outfitting. *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala*

- i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva*, 31(1):55–62, 2011.
- [67] Abirami Santhi e Padmakumar Muthuswamy. Industry 5.0 or industry 4.0s? introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. Em *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, volume 17, páginas 947–979, 02 2023.
- [68] Jeff Sauro. Recent advances with the system usability scale. MeasuringU, novembro 2017. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [69] Erik Schmidtberg, Lauren Goff, Alastair Moubray, e Greg Toy. Utilizing virtual reality to enhance the digital twin. Em *2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, páginas 1–5, 2022.
- [70] Dassault Systèmes. Catia: 3d cad, cam, cae e plm. <https://www.3ds.com/products/catia>, 2025. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [71] Unity Technologies. Ar foundation. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@6.1/manual/index.html>. Versão 6.1.0. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [72] Unity Technologies. Assetbundles - introduction. <https://docs.unity3d.com/6000.1/Documentation/Manual/AssetBundlesIntro.html>. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [73] Unity Technologies. Prefabs - unity manual. <https://docs.unity3d.com/6000.1/Documentation/Manual/Prefabs.html>. Versão 6000.1. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [74] Unity Technologies. Unity. <https://unity3d.com/unity/>. Versão 2022.3.18f1. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [75] TEXP@CT. Sobre – texp@ct: Pacto de inovação para a transição digital do stv. <https://texpact.pt/sobre/>, 2025. Consultado em: 23 de junho de 2025.
- [76] Arnav Tyagi, Dev Rajpal, Annie David, Jagendra Singh, Hardeo Kumar Thakur, e Kamal Upreti. Object detection with augmented reality. Em *2023 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, páginas 162–167, 2023.
- [77] Guido Van Rossum e Fred L Drake Jr. *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- [78] Birgit Vogel-Heuser, Simon Ziegltrum, Joachim Frank, Freihold Hasselfeld, Herbert Gröbl, Claus Botzenhardt, e Bernhard Werner. Assisted safety test execution linking e-cad and test management with augmented reality. Em *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, volume 1, páginas 196–202, 2020.
- [79] Jan Vom Brocke, Alan Hevner, e Alexander Maedche. Introduction to design science research. *Design science research. Cases*, páginas 1–13, 2020.
- [80] PTC Inc. (Vuforia). Model target guide view – vuforia engine library. <https://developer.vuforia.com/library/vuforia-engine/images-and-objects/model-targets/guide-views/model-target-guide-view/>, 2025. Consultado em: 29 de junho de 2025.

- [81] PTC Inc. (Vuforia). Vumarks – vuforia engine library. <https://developer.vuforia.com/library/vuforia-engine/images-and-objects/vumarks/vumarks/>, 2025. Consultado em: 29 de junho de 2025.
- [82] W3Schools. Sql tutorial. <https://www.w3schools.com/sql/>, 2023. Consultado em: 16 de junho de 2025.
- [83] Rohidatun Mahmud Wahab, Afiqah Izzati Taharudin, Abdul Rahman Hemdi, Nurul Muthmainnah Mohd Noor, Ahmad Faiz Zubair, e Nurul Nadiyah Azmi. Interactive visualization to enhance learning experienced on machining process of edm wire cut through augmented reality (ar). Em *2023 IEEE 12th International Conference on Engineering Education (ICEED)*, páginas 1–6, 2023.
- [84] Jean Walrand. Tracking—a. Em *Probability in Electrical Engineering and Computer Science: An Application-Driven Course*, páginas 264–269, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [85] Santichai Wicha, Punnarumol Temdee, Chayapol Kamyod, Rounsang Chaisricharoen, Jean-Marc Thiriet, e Hamed Yahoui. Industrial requirements analysis for excellence center setting-up and curriculum design in industry 4.0 context. Em *2023 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT NCON)*, páginas 423–426, 2023.
- [86] Zizhuo Yan, Yong Wang, Yan Li, Mingsong Bai, Yan Tang, e Yajun Li. Design of an industrial workshop equipment maintenance system based on hololens. Em *2023 4th International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction (ICHCI)*, páginas 99–105, 2023.
- [87] Manjola Zeneli e Galia Marinova. Navigating the future: Digital twin in maritime industry. Em *2024 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*, páginas 1–6, 2024.
- [88] Chengyi Zhao, Xinhao Xu, Dongxing Zhang, e Yimin Wei. Intelligent human-machine interaction based on digital twin and virtual reality. Em *2023 5th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence (RICAI)*, páginas 374–378, 2023.
- [89] Zexuan Zhu, Chao Liu, e Xun Xu. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality. *Procedia CIRP*, 81:898–903, 2019. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019.

Anexo A

Trabalho Publicado

Revolutionizing Industrial Maintenance: Virtual and Augmented Reality Meets Digital Twin

João Miranda

*Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Viana do Castelo, Portugal
joao.miranda@ipvc.pt*

Luís Romero

*Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Viana do Castelo, Portugal
romero@estg.ipvc.pt*

André Costa

*Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Viana do Castelo, Portugal
afilipecosta@ipvc.pt*

Pedro Faria

*Instituto Politécnico de Viana do Castelo
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Viana do Castelo, Portugal
pfaria@estg.ipvc.pt*

Abstract—The optimization of processes, cost reduction, and increased efficiency stand as primary objectives within the textile industry. With the advancement of technologies, the digital twin concept — a digital representation model of the processes and physical objects within the manufacturing environment — has been extensively employed. This paper aims to examine and investigate how it is possible to integrate the use of augmented and virtual reality technologies with a digital twin model, in order to enhance equipment maintenance within this industry. In addition to a review of the current state of the art in this field, several articles related to the topic were studied, complemented by the results of a small-scale experiment. These findings indicate that the utilization of these technologies is indeed advantageous in supporting equipment maintenance and managing the flow of data generated by real physical objects and processes.

Index Terms—Digital Twin, Augmented Reality, Virtual Reality, Textile Industry

I. INTRODUCTION

Nowadays, due to the significant development and advancement of technologies, there is a strong initiative for industry updates, particularly in the realm of information technologies. These innovations play a crucial role in transforming the industry, driving efficiency, and fostering innovation. The new technologies optimize processes, reduce costs, and facilitate logistics. The intelligent adoption of these innovations is essential to boost competitiveness. With the goal of monitoring, analyzing, understanding, and predicting the performance/results achieved by a manufacturing system, the digital twin concept emerges. This concept represents a dynamic model allowing the digital representation of an entire manufacturing system. However, at times, managing the vast amount of data generated by the model can be challenging for a significant number of users. Thus, virtual and augmented reality come into play, aiming to be the link between both technologies, providing a more intuitive experience for the user, according to [1]. Indeed, the use of these technologies has increasingly become a significant ally in this sector. According to opinions in [2],

augmented and virtual reality together play crucial roles in enhancing user experiences and efficiency in the ever-evolving landscape of digitized industries. The purpose of this article is to examine the useful uses of augmented and virtual reality technologies, particularly as they relate to equipment maintenance in an actual manufacturing environment. These devices are a component of a larger system that a digital twin model represents digitally. In order to accomplish this, a selection of IEEE approved publications will be made first, and then a cutting-edge analysis of the key themes and ideas covered will be conducted. Finally, the paper will conclude with a small-scale experiment aimed at evaluating the effectiveness of an augmented reality application for digital twin model equipment maintenance. The goal of this, is to not only highlight the potential of these technologies but also to offer insightful information about how they actually affect industrial operations and maintenance procedures in the real world.

II. SYSTEMATIC REVIEW

To obtain a list of related works, a systematic review was conducted. Initially, the review included all papers published on IEEE within the last 5 years, emphasizing the keywords "Digital Twin," "Augmented Reality," and "Virtual Reality" as the central theme. However, this resulted in an enormous quantity of articles. To narrow down the results by only including papers published in the last five years and with the keyword "Manufacturing", resulting in 31 different articles. In the end, this systematic review was used to select 14 papers as an initial research base. Additionally, brief summaries were provided for some of these articles.

Figura A.1: Artigo publicado na conferência *CISTI 2024*.



sensors



Article

Smart Maintenance Solutions: AR- and VR-Enhanced Digital Twin Powered by FIWARE

André Costa ¹, João Miranda ¹, Duarte Dias ¹, Nuno Dinis ², Luís Romero ¹  and Pedro Miguel Faria ^{1,*}

¹ IPVC—Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal; afilipecosta@ipvc.pt (A.C.); joao.miranda@ipvc.pt (J.M.); duartedias@ipvc.pt (D.D.); romero@estg.ipvc.pt (L.R.)

² RIOPELE, 4770-405 Vila Nova de Famalicão, Portugal; nuno.dinis@riopele.pt

* Correspondence: pfaria@estg.ipvc.pt

Abstract: In the modern era of industrial digitalization, the convergence of the Internet of Things (IoT), advanced data analysis, augmented reality (AR) and virtual reality (VR) is significantly transforming various industrial sectors. This research aimed to study and develop a proposal for an integrated system that combines IoT, data analysis, AR and VR for the monitoring and maintenance of industrial equipment. The importance of this research lies in its potential to contribute to the implementation of predictive maintenance solutions, which can significantly reduce machine downtime in an industrial environment and thus reduce or prevent operational failures. The central research question of this work was the following: how can the integration of IoT, data analysis and augmented and virtual reality contribute to optimizing industrial maintenance? We tested the combination of technologies to enable the creation of an effective predictive maintenance system, capable of alerting operators to anomalous conditions and providing detailed visual instructions for maintenance tasks. As a result, a prototype system was developed and tested, and it has shown the potential to evolve into a real system in an industrial environment.

Keywords: internet of things; data analysis; augmented reality; virtual reality; predictive maintenance; industrial digitization; system integration; operational efficiency



Received: 15 December 2024
Revised: 9 January 2025
Accepted: 27 January 2025
Published: 30 January 2025

Citation: Costa, A.; Miranda, J.; Dias, D.; Dinis, N.; Romero, L.; Faria, P.M. Smart Maintenance Solutions: AR- and VR-Enhanced Digital Twin Powered by FIWARE. *Sensors* **2025**, *25*, 845. <https://doi.org/10.3390/s25030845>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In the modern era of industrial digitalization, technologies such as the Internet of Things (IoT), FIWARE, visualization platforms like Grafana, advanced databases, APIs, artificial intelligence (AI), augmented reality (AR) and virtual reality (VR) are profoundly transforming various industrial sectors. These technologies have been extensively studied for their ability to optimize industrial processes and reduce operational costs, driving the progress of Industry 4.0. Recent studies emphasize the relevance of these approaches. For instance, Ref. [1] explored a framework based on a digital twin for predictive maintenance in industrial environments, highlighting the integration between physical systems and their digital twins to enhance the maintenance efficiency and improve the failure prediction accuracy.

Digital twins (DTs) have emerged as a key solution in Industry 4.0, offering real-time simulations and performance predictions for physical systems. Ref. [2] discusses how DTs can integrate operational, environmental and sensor data to build robust predictive models, minimizing unplanned equipment and machinery downtime, thereby boosting business competitiveness. Technologies associated with the Internet of Things (IoT) and machine learning provide unique opportunities for the real-time monitoring and efficient

AN APPROACH TO TEXTILE INDUSTRIAL EQUIPMENT MAINTENANCE ASSISTANCE USING AN AUGMENTED REALITY APPLICATION

João Miranda
Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal
joao.miranda@ipvc.pt

Nuno Dinis
Riopele, Vila Nova de Famalicão, Portugal
nuno.dinis@riopele.onmicrosoft.com

Luís Romero
Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal
romero@estg.ipvc.pt

Pedro Miguel Faria
Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal
pfaria@estg.ipvc.pt

ABSTRACT

Industries are increasingly striving for digitalization to integrate predictive maintenance systems into their equipment. However, these interventions are becoming more challenging due to the growing complexity of industrial machinery. In response, technologies such as Augmented Reality (AR) have emerged as valuable tools, providing real-time support and guidance to operators during maintenance processes. This paper presents the development and implementation of a prototype AR application designed to assist in the maintenance of equipment within a real textile factory. The primary goal is to enable operators to use the application for training purposes, as an interactive guide during actual maintenance procedures, and/or to access real-time equipment data. The ongoing development of this project has demonstrated the potential of AR applications to enhance industrial data visualization, improve operator training, and streamline maintenance tasks. The findings in this work contribute to the broader digital transformation of the manufacturing sector and lay the groundwork for future advancements in AR assisted maintenance across various industries.

KEYWORDS

Augmented Reality, Textile Industry, Equipment Maintenance, Digital Twin, Mobile Application

1. INTRODUCTION

In recent years, we have witnessed a rapid advancement in information technologies, which has motivated a strong initiative for modernization within industries. These innovations are fundamental to the transformation of the industry, promoting efficiency and innovation. The intelligent adoption of these technologies not only optimizes processes and reduces costs but also facilitates logistics, making it essential to boost companies' competitiveness. Among these innovations, Augmented Reality has emerged as a powerful tool for modernizing industrial processes. According to the authors of (Caiza and Sanz, 2022), AR functions as an intuitive link between the physical and digital worlds, facilitating the interpretation and interaction with data. The ability to overlay digital information into the physical environment in real-time (Gong, L. et al., 2021) makes this technology particularly useful in applications aimed at industrial maintenance, inspection, and training. The application of AR in industrial equipment maintenance enables more efficient assistance, reducing diagnostic and failure correction times (Zhu, Z. et al., X., 2019). Technicians can visualize detailed instructions directly on machines, access operational information, and receive step-by-step guidance,

Figura A.3: Artigo aceite para publicação na conferência *DTIM 2025 - MCCSIS*.

Anexo B

Algoritmos

Algoritmo B.1: Controlo bidirecional da máquina de café - Fase 1

Data: URLs da API para ações da máquina e do café

1 Variáveis globais:

2 url_cafe_curto, url_cafe_longo, url_ligar, url_desligar ←
 definidos com base em IpDefiner.url

3 Função PostRequestCafeCurtoVoz ()

4 Atualiza URL cafe_curto

5 Chama SendPostRequest (url_cafe_curto, "RA VOZ")

6 Função PostRequestCafeCurtoRA ()

7 Atualiza URL cafe_curto

8 Chama SendPostRequest (url_cafe_curto, "RA")

9 Função PostRequestCafeLongoVoz () e PostRequestCafeLongoRA () seguem
 lógica idêntica

10 Função PostRequestLigarMaquinaVoz ()

11 Atualiza URL ligar

12 Atualiza estado da máquina para ligado

13 Chama SendPostRequest (url_ligar, "RA VOZ")

14 Função PostRequestDesligarMaquinaVoz ()

15 Atualiza URL desligar

16 Atualiza estado da máquina para desligado

17 Chama SendPostRequest (url_desligar, "RA VOZ")

18 Função PostRequestLigarDesligarMaquinaRA ()

19 Altera o estado atual da máquina

20 **if** máquina está ligada **then**

21 | Chama SendPostRequest (url_ligar, "RA")

22 **end**

23 **else**

24 | Chama SendPostRequest (url_desligar, "RA")

25 **end**

26 Função SendPostRequest (url, origem)

27 Cria corpo do pedido em formato JSON com origem

28 Configura UnityWebRequest do tipo POST com headers e corpo

29 Aguarda resposta

30 **if** erro **then**

31 | Mostrar erro no log

32 **end**

33 **else**

34 | Mostrar sucesso e resposta

35 **end**

Algoritmo B.2: Obtenção de medias de um processo - Fase 1

Data: URL da API, ID da máquina, campos de texto, listas de dados

```
1 Inicializar índice atual  $\leftarrow$  0
2 Inicializar listas: subprocessos, bundleUrls, mediaDescricoes

3 Função LoadBundleUrlsFromAPI ()
4   Fazer pedido à API com o ID da máquina
5   foreach subprocesso obtido do
6     Obter URL e descrição do media associado
7     if media válida then
8       Adicionar URL a bundleUrls
9       Adicionar descrição a mediaDescricoes
10    end
11  end
12  if bundleUrls não está vazia then
13    currentIndex  $\leftarrow$  0
14    Chamar LoadModelAtIndex (currentIndex)
15  end

16 Função LoadModelAtIndex (index)
17  if índice inválido then
18    return
19  end
20  Destruir modelo atual, se existir
21  Chamar DownloadAndLoadAssetBundle (bundleUrls [index])
22  Atualizar nomeLabel e descricaoLabel com dados da lista

23 Função DownloadAndLoadAssetBundle (url)
24  Fazer download do bundle
25  if falha no download then
26    Mostrar erro e terminar
27  end
28  Obter primeiro asset do bundle
29  Instanciar prefab na cena com posição, rotação e escala padrão
30  Libertar memória do bundle
```

Algoritmo B.3: Ligação com a API da fábrica para dados em tempo real - Fase 2

Data: IDs de máquina, VuMark, URLs da API, chave de autenticação

- 1 Obter ID da máquina pela VuMark
- 2 Agendar execução de `StartGetMachineData` e `StartGetMachineGroupData` a cada 5 segundos
- 3 Atualizar ID da máquina ao detetar novo VuMark
- 4 **Função** `GetMachineData()`: Enviar pedido HTTP com API key
- 5 **if** *resposta válida* **then**
- 6 Processar JSON recebido
- 7 Atualizar campos da interface (estado, material, lote, etc.)
- 8 Atualizar slider de percentagem
- 9 Atualizar cores dos materiais
- 10 **end**
- 11 **Função** `GetMachineGroupData()`: Enviar pedido HTTP
- 12 **if** *resposta válida* **then**
- 13 Processar JSON recebido
- 14 Atualizar nome, posição e código completo da máquina
- 15 **end**

Algoritmo B.4: Chat com ligação ao assistente virtual - Fase 2

Data: Campo de texto, botão enviar, ligação à API de chat e síntese de voz

- 1 Quando o utilizador submete uma mensagem:
- 2 Instanciar "bolha" com a mensagem do utilizador
- 3 Criar bolha temporária "A aguardar resposta..."
- 4 Enviar mensagem para o chatbot via API
- 5 **if** *resposta válida* **then**
- 6 Substituir bolha de espera por resposta do AV
- 7 Atualizar modo atual na interface
- 8 **if** *som ativado* **then**
- 9 Solicitar áudio com resposta sintetizada
- 10 Reproduzir resposta sonora
- 11 **end**
- 12 **end**
- 13 **else**
- 14 Apresentar mensagem de erro
- 15 **end**
