



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DERZU OMAIA

CYPIRP - um processo de prototipagem rápida de produtos com uso de realidade aumentada e impressão 3D

Recife

2024

DERZU OMAIA

CYPIRP - um processo de prototipagem rápida de produtos com uso de realidade aumentada e impressão 3D

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências da Computação.

Área de Concentração: Mídia e Interação.

Orientador: Prof. Dr. Andre Luis de Medeiros Santos

Coorientador: Prof. Dr. Walter Franklin Marques Correia

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Omaia, Derzu.

CYPIRP - um processo de prototipagem rápida de produtos com uso de realidade aumentada e impressão 3D / Derzu Omaia. - Recife, 2024.

132f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação, 2024.

Orientação: Andre Luis de Medeiros Santos.

Coorientação: Walter Franklin Marques Correia.

Inclui referências e apêndices.

1. Realidade aumentada; 2. Realidade virtual; 3. Prototipagem rápida; 4. Protótipos interativos estruturais e funcionais; 5. Impressão 3D. I. Santos, Andre Luis de Medeiros. II. Correia, Walter Franklin Marques. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Derzu Omaia

“CYPIRP - Um processo de prototipagem rápida de produtos com uso de Realidade Aumentada e Impressão 3D”

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação. Área de Concentração: Mídia e Interação

Aprovada em: 23/04/2024.

Orientador: Prof. Dr. André Luís de Medeiros Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Walter Franklin Marques

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Geber Lisboa Ramalho
Centro de Informática / UFPE

Profa. Dra. Veronica Teichrieb
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Dino Lincoln Figueirôa Santos
Departamento de Design / UFRN

Prof. Dr. Andre Menezes Marques das Neves
Departamento de Design / UFPE

Prof. Dr. João Marcelo Xavier Natario Teixeira
Departamento de Eletrônica e Sistemas / UFPE

Prof. Dr. Lucas José Garcia
Núcleo de Design e Comunicação / UFPE – Campus Agraste

Dedico aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiro, gostaria de agradecer aos meus pais, Marluce Maia e Fábio Oliveira, por todo apoio e incentivo a estudar e a trabalhar duro, sempre.

Gostaria de agradecer a minha tia Hilda Maia e a minha madrinha Flávia Maia pelas revisões e apoio.

Aos meus professores que me inspiraram e que me ensinaram a crescer. Em especial, agradeço à professora Liliane dos Santos Machado, com quem fiz o meu primeiro PIBIC, e que me iniciou na pesquisa científica. Ao professor Leonardo Vidal Batista, que me orientou no mestrado e me ensinou bastante sobre processamento de sinais e de imagens. Ao professor Guido Lemos de Souza Filho, com quem trabalhei em vários projetos de pesquisa no Lavid, e com quem aprendi que pesquisa pode ser realizada em conjunto com o mercado.

Aos meus orientadores do doutorado, professor Walter Franklin e professor André Luís de Medeiros Santos que acreditaram e me apoiaram no meu tema de trabalho do doutorado.

À UFPE e ao Centro de Informática que proporcionaram que este trabalho pudesse ser realizado. À UFPB, instituição na qual trabalhei durante todo o doutorado.

"Só sabe quem fez" (MACHADO, 2003, p. 4).

RESUMO

No desenvolvimento de novos produtos pela indústria é recomendada uma etapa de prototipagem rápida, para que uma versão inicial do produto possa ser avaliada. Dessa forma, qualquer correção que seja necessária pode ser aplicada ainda na fase de prototipagem, prevenindo que algum erro de projeto chegue ao produto final. A Realidade Aumentada (AR) e a Impressão 3D são técnicas que vêm se popularizando bastante nos últimos anos devido a diminuição dos custos de seus equipamentos. Diversos trabalhos na área de prototipagem rápida vêm sendo desenvolvidos nessas áreas de forma isolada, alguns poucos tentaram unir essas duas ferramentas. Nesta tese, propõe-se um novo processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa (CYPIRP), combinando Impressão 3D e AR. Esse processo foi implementado através de um sistema que projeta um protótipo funcional, em Realidade Aumentada, sobre o protótipo estrutural impresso em 3D, e interpreta as ações do usuário sobre o protótipo físico, convertendo cliques e toques em ações a serem executadas no protótipo virtual da AR, tornando o protótipo funcional e interativo. O processo proposto foi avaliado por meio de estudos de caso e da aplicação do questionário de experiência do usuário (UEQ) a um grupo de 60 voluntários que experimentaram o sistema. A análise das respostas do UEQ apontam que o experimento com o protótipo foi bem recebido pelos voluntários atingindo as escalas de Excelente, Bom e Acima da média nos grupos do UEQ.

Palavras-chave: realidade aumentada; realidade virtual; prototipagem rápida; protótipos interativos estruturais e funcionais; impressão 3D.

ABSTRACT

In the development of new products by the industry, a rapid prototyping stage is recommended so that an initial version of the product can be evaluated. In this way, any necessary corrections can be applied while still in the prototyping stage, preventing design errors from reaching the final product. Augmented Reality (AR) and 3D Printing are techniques that have become very popular in recent years due to the reduction of equipment costs. Several works in the area of rapid prototyping have been developed in these areas in isolation; a few works have tried to unite these two tools. In this work, we propose a new functional rapid prototyping process, combining 3D Printing and Augmented Reality to create functional interactive prototypes. This process is accomplished by projecting the Augmented Reality onto the 3D-printed prototype. It interprets the user's gestures on the physical prototype, converting clicks and touches into actions to be executed on the Augmented Reality virtual prototype, making the prototype functional and interactive. The proposed system was evaluated by case studies and the application of a user experience questionnaire (UEQ) to a group of 60 volunteers who tried out the system. Analysis of the UEQ responses shows that the experiment with the prototype was well received by the volunteers, reaching the Excellent, Good and Above average scales in the UEQ groups.

Keywords: augmented reality; virtual reality; rapid prototyping; functional and interactive structural prototype; 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de protótipos	18
Figura 2 – Ciclo de desenvolvimento de um produto	27
Figura 3 – Tipos de protótipo: Físico (a), VR (b) e AR (c)	28
Figura 4 – Métodos de impressão 3D: FDM (a), SLA (b) e Cama de pó (c)	30
Figura 5 – Esquema de Máquina CNC com 5 graus de liberdade	32
Figura 6 – Fabricação subtrativa (CNC)	32
Figura 7 – Fabricação aditiva (Impressão 3D)	33
Figura 8 – Contínuo real-virtual	33
Figura 9 – Dispositivos de visualização HMD sem tela própria: Óculos Gear VR (a) e Google Cardboard (b)	36
Figura 10 – Dispositivos de visualização HMD com hardware próprio: Oculus Rift (a), Óculos Meta Quest (b) e Apple Vision Pro (c)	36
Figura 11 – Dispositivo de visualização para realidade aumentada de visão óptica direta: Google Glass (a) e IVAS (b)	37
Figura 12 – Sistema de visão óptica direta (<i>Optical see-through HMDs</i>)	37
Figura 13 – Sistema de visão direta por vídeo (<i>Video see-through HMDs</i>)	38
Figura 14 – Sistema de visão com base em monitor (<i>Monitor-based system</i>)	38
Figura 15 – Exemplo de um sistema de visão óptica por projeção	39
Figura 16 – Tipos de marcadores bidimensionais: QR Code do valor 100 (a), Marcador Fiducial do valor 100 (b) e Imagem da logo da UFPE (c)	40
Figura 17 – Elementos principais do marcador-imagem da logo da UFPE	41
Figura 18 – Rastreamento e Renderização de um objeto 3D sobre um marcador fiducial	41
Figura 19 – Processo de mapeamento de ambiente e renderização de um urso panda da biblioteca	42
Figura 20 – Mão real de uma pessoa ao interagir com um rádio virtual: Comportamento sem oclusão (a) e Comportamento com oclusão (b)	43
Figura 21 – Modelo 3D recomendado para ser utilizado como marcador (em verde) e modelos não recomendados (em vermelho)	44
Figura 22 – Botões virtuais, indicados nas regiões A, B e C, sobre o marcador-imagem da logo da UFPE	45

Figura 23 – Funil da extração de dados	50
Figura 24 – Ciclo de desenvolvimento de produto	61
Figura 25 – Processo cíclico proposto <i>Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping</i> (CYPIRP)	62
Figura 26 – Etapa de Especificação do Produto do CYPIRP	62
Figura 27 – Etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional do CYPIRP	63
Figura 28 – Arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo do CYPIRP	65
Figura 29 – Interação da mão do usuário com os protótipos: Comportamento inicial, onde a mão é sobreposta pelo protótipo funcional (a) e Comportamento final, onde a região de pele é detectada e sobreposta ao protótipo funcional (b)	67
Figura 30 – Processo de Segmentação: Imagem Original (a), Imagem com região de pele identificada (b) e Imagem segmentada (c)	68
Figura 31 – Modelo 3D do brinquedo de carro	78
Figura 32 – Protótipo Estrutural do brinquedo carro infantil	79
Figura 33 – Animação de rotação da porta: sem rotação (a), rotação de 45° (b) e rotação de 110° (c)	80
Figura 34 – Protótipo estrutural e marcadores AR: Foto frontal do protótipo estrutural (a), Marcador imagem sem marcações manuais e os elementos identificados pela Vuforia (b) e Marcador imagem com marcações manuais e os elementos identificados pela Vuforia (c)	81
Figura 35 – Interação com o protótipo: Protótipo estrutural (a) e Protótipo funcional sobrescrevendo o estrutural (b)	82
Figura 36 – Marcador-Imagem e os botões virtuais do brinquedo carro infantil	82
Figura 37 – Protótipo estrutural e funcional sendo experimentado: (a) Interação com o protótipo estrutural (a) e Interação com o protótipo funcional sobreposto ao estrutural (b)	83
Figura 38 – Modelo 3D do rádio-relógio	84
Figura 39 – Protótipo Estrutural do rádio-relógio	85
Figura 40 – Protótipo estrutural e marcadores AR: Foto frontal do protótipo estrutural (a) e Marcador imagem com marcações manuais e os elementos identifica- dos pela Vuforia (b)	87

Figura 41 – Interação com o protótipo: Protótipo estrutural (a) e Protótipo funcional sobrescrevendo o estrutural (b)	88
Figura 42 – Marcador-Imagem e os botões virtuais do rádio-relógio	88
Figura 43 – Protótipo estrutural e funcional sendo experimentado: Interação com o protótipo estrutural (a) e Interação com o protótipo funcional sobreposto ao estrutural (b)	89
Figura 44 – Gráficos Grupo Ótimo 1 para o Brinquedo Infantil Carro: Diagrama de Caixas e Histograma (b)	93
Figura 45 – Gráficos Grupo Ótimo 7 para o Brinquedo Infantil Carro: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)	94
Figura 46 – Média das respostas nos grupos e comparação ao <i>benchmark</i> para o Brinquedo Infantil Carro	95
Figura 47 – Gráficos Grupo Ótimo 1 para o rádio-relógio: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)	97
Figura 48 – Gráficos Grupo Ótimo 7 para o rádio-relógio: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)	98
Figura 49 – Média das respostas nos grupos e comparação ao <i>benchmark</i> para o rádio-relógio	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Termo de busca básico	47
Tabela 2 – Termo de busca ACM	48
Tabela 3 – Termo de busca IEEE	49
Tabela 4 – Termo de busca DBLP	49
Tabela 5 – Termo de busca Google Acadêmico	49
Tabela 6 – Ações e Reações do brinquedo carro infantil	79
Tabela 7 – Ações e Reações rádio-relógio	85
Tabela 8 – Resultado Completo do UEQ para o Brinquedo Infantil Carro	91
Tabela 9 – Resultado Simplificado Ordenado do UEQ para o Brinquedo Infantil Carro	92
Tabela 10 – Média das respostas nos grupos e comparação ao <i>benchmark</i> para o Brinquedo Infantil Carro	94
Tabela 11 – Resultado Completo do UEQ para o rádio-relógio	96
Tabela 12 – Resultado Simplificado Ordenado do UEQ para o rádio-relógio	97
Tabela 13 – Média das respostas nos grupos e comparação ao <i>benchmark</i> para o rádio-relógio	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AR	Realidade Aumentada
AV	Virtualidade Aumentada
CAAE	Certificado de Apresentação de Apreciação Ética
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CYPIRP	<i>Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping</i>
FDM	Modelagem por Fusão e Depósito
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
HMD	<i>Head-Mounted Display</i>
HSV	<i>Hue, Saturation, Value</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
MR	Realidade Misturada
NPM	<i>Node Package Manager</i>
PLA	Ácido Polilático
PRI	Prototipagem Rápida Interativa
PSSUQ	<i>Post-study System Usability Questionnaire</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SLA	Estereolitografia
SLAM	<i>Simultaneous Localization And Mapping</i>
SUMI	<i>Software Usability Measurement Inventory</i>

SUS	<i>Software Usability Scale</i>
TCLE	Termo de consentimento livre e esclarecido
UEQ	<i>User Experience Questionnaire</i>
UX	<i>User Experience</i>
VR	Realidade Virtual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	22
1.3	OBJETIVOS	23
1.4	METODOLOGIA	23
1.5	CONTRIBUIÇÕES	24
1.6	ESTRUTURA	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	PROCESSO DE DESIGN	25
2.2	PROTOTIPAGEM RÁPIDA	26
2.3	FABRICAÇÃO DIGITAL	28
2.3.1	Impressão 3D	29
2.3.2	Fresadoras <i>Computer Numerical Control</i> (CNC)	31
2.4	REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA	33
2.4.1	Realidade Virtual	34
2.4.2	Realidade Aumentada	35
2.4.3	Dispositivos de Visualização	35
2.4.4	Componentes de um sistema de desenvolvimento AR	39
2.4.4.1	<i>Rastreamento de pontos de interesse</i>	39
2.4.4.2	<i>Visualização e Renderização</i>	40
2.4.4.3	<i>Mapeamento ambiente real e detecção de superfícies</i>	41
2.4.4.4	<i>Gerenciamento de oclusão</i>	42
2.4.5	Ferramentas de desenvolvimento	43
3	MAPEAMENTO SISTEMÁTICO	46
3.1	PLANEJAMENTO DO MAPEAMENTO	46
3.1.1	Formulação das questões	46
3.1.2	Seleção das fontes e das publicações	47
3.2	EXTRAÇÃO DOS DADOS	50
3.2.1	Prototipagem Rápida Interativa de Produto	51
3.2.2	Prototipagem Rápida Interativa de Design 3D	56

3.2.3	Prototipagem Rápida Interativa de <i>Software</i>	57
3.2.4	Discussão	58
4	METODOLOGIA	60
4.1	PROCESSO CÍCLICO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA INTERATIVA - CY-PIRP	60
4.1.1	Especificação do Produto	62
4.1.2	Criação do Protótipo Estrutural e Funcional	63
4.1.3	Experimento do Protótipo	64
4.1.3.1	<i>Módulo detector de Ações</i>	66
4.1.4	Avaliação do Protótipo	68
4.2	AVALIAÇÃO DO PROCESSO CYPIRP	69
4.2.1	Definição do questionário	70
4.2.2	Estrutura do Experimento de Avaliação	72
4.2.2.1	<i>Recrutamento dos Participantes</i>	72
4.2.2.2	<i>Aspectos Éticos</i>	72
4.2.2.3	<i>Aplicação do Experimento</i>	74
4.2.3	Análise e Interpretação do Experimento	75
4.3	ESTUDOS DE CASO	77
4.3.1	Brinquedo Infantil Carro	77
4.3.1.1	<i>Especificação do Produto</i>	77
4.3.1.2	<i>Criação do Protótipo Estrutural e Funcional</i>	78
4.3.1.3	<i>Experimento do Protótipo</i>	80
4.3.2	Rádio-relógio	83
4.3.2.1	<i>Especificação do Produto</i>	84
4.3.2.2	<i>Criação do Protótipo Estrutural e Funcional</i>	84
4.3.2.3	<i>Experimento do Protótipo</i>	86
4.3.3	Avaliação do Protótipo	89
5	DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	90
5.1	INTRODUÇÃO	90
5.2	ESTUDO DE CASO	90
5.2.1	Brinquedo Infantil Carro	90
5.2.2	Rádio-relógio	95
5.3	CONCLUSÃO DOS RESULTADOS	99

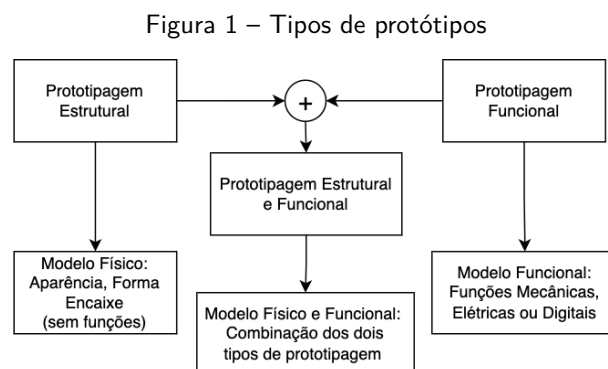
6	CONCLUSÃO	101
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	101
6.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	102
6.3	PRINCIPAIS DIFICULDADES	103
6.4	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE EXPERIÊNCIA DO USUÁ-	
	RIO (UEQ)	115
	APÊNDICE B – ARTIGO PUBLICADO	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo de fabricação de um produto pela indústria está cada vez mais automatizado e, dessa forma, menos dependente da intervenção humana. Contudo, para o desenvolvimento de um novo produto, geralmente, é realizada uma etapa de teste e avaliação de um protótipo do produto (NOORANI, 2006), a qual necessita de mediação humana. Nessa etapa, alguns usuários testam e avaliam uma versão inicial do produto, que pode ser funcional ou não. O resultado dessa avaliação é utilizado para melhorar o protótipo, de forma que qualquer correção necessária possa ser aplicada ainda na fase de prototipagem, prevenindo que algum erro de projeto chegue ao produto final. A duração do processo de desenvolvimento e aprovação do protótipo é proporcional ao custo dessa etapa, que pode durar dias ou meses; portanto, é conveniente minimizar sua duração, realizando uma prototipagem rápida, o que reduz o custo final de desenvolvimento do novo produto (TEIXEIRA et al., 2016; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

A prototipagem rápida pode ser classificada nas categorias estrutural, funcional e estrutural e funcional. Na estrutural, aparência, forma e encaixe são avaliados, através de um modelo físico. Na funcional, o produto é avaliado a partir de um modelo funcional, conforme suas funções, as quais podem ser mecânicas, elétricas ou digitais. Os protótipos estruturais e funcionais possuem características das duas categorias anteriores combinadas. Considera-se que o protótipo é interativo quando é possível que um usuário interaja com ele explorando suas funcionalidades (BAXTER, 1995; ZORRIASSATINE et al., 2003; ALEXANDER et al., 2009). A Figura 1 apresenta esses tipos de protótipos e suas características.



Fonte: Adaptado de Baxter (1995).

A prototipagem estrutural é a mais simples das três categorias, visto que é necessário apenas o modelo 3D do produto, o qual é construído com software de auxílio ao design (*Computer Aided Design* - CAD) e produzido fisicamente através de alguma técnica de fabricação digital. Tamanho e forma do protótipo devem ser equivalentes aos mesmos do produto final (ALEXANDER et al., 2009).

Os protótipos puramente funcionais podem ser físicos ou virtuais. Quando físicos, tamanho e forma não precisam corresponder aos do produto final, contudo, funcionalidades devem estar presentes. Quando virtuais, podem fazer uso da Realidade Virtual (VR) ou da Realidade Aumentada (AR) para interação e exibição de suas funcionalidades (ZORRIASSATINE et al., 2003; ALEXANDER et al., 2009).

A prototipagem estrutural e funcional é a mais custosa, visto que funcionalidades precisam ser adicionadas a um protótipo físico. Essas funcionalidades podem ser mecânicas, elétricas ou digitais. Para funcionalidades mecânicas, a fabricação digital do protótipo deve possuir partes separadas, as quais necessitam ser encaixadas para a finalização do protótipo (ZORRIASSATINE et al., 2003; ALEXANDER et al., 2009). Quando as funcionalidades são elétricas ou digitais, processos específicos devem ser aplicados para a finalização do protótipo. Katakura e Watanabe (2018) utilizam botões físicos, nos quais os cliques geram sons que são detectados por um circuito. Simon (2012) utiliza sensores RFID em interfaces de controles. Já Macdonald et al. (2014) utilizam impressão 3D para produzir o protótipo integrado a um circuito, permitindo que o protótipo possua funcionalidades elétricas, como luzes. Para as funcionalidades digitais a VR e a AR podem ser utilizadas.

A Realidade Virtual (VR) é a simulação de um ambiente 3D por sistemas computacionais. Assim, é possível visualizar e manipular modelos 3D nesses ambientes. Na prototipagem rápida, a VR é utilizada principalmente para geração e visualização do protótipo, porém, alguns trabalhos, como o de Balcisoy et al. (2000), utilizam a VR na prototipagem funcional, em que é possível interagir com esses protótipos utilizando algum dispositivo de interação, como mouse ou teclado (BALCISOY et al., 2000; ZORRIASSATINE et al., 2003).

A Realidade Aumentada (AR) é um mecanismo de visualização, direta ou indireta, em tempo real, de um ambiente físico real, sobre o qual são adicionadas informações virtuais geradas por computador. A AR objetiva auxiliar o usuário, integrando elementos virtuais com a visão do mundo real, aumentando a percepção do usuário e sua interação com o ambiente (FURHT, 2011; KHAN; JOHNSTON; OPHOFF, 2019). Pode ser utilizada nas mais diversas áreas e aplicações, e vem sendo bastante utilizada na indústria, para a qual diversos trabalhos estão

sendo propostos na área de prototipagem (CHOI; CHAN, 2004; SIMÕES et al., 2016; PORTER et al., 2010; ABULRUB; ATTRIDGE; WILLIAMS, 2011).

Na AR, o modelo 3D do protótipo pode ser apresentado integrado ao ambiente real utilizando dispositivos de visualização, como óculos, viseiras ou capacetes especiais. Dessa maneira, é possível posicionar o protótipo sobre algum local do ambiente, ou nas mãos do usuário; embora, ao se utilizar somente a AR, essa presença é apenas virtual, não sendo possível tocar diretamente no protótipo. A maioria das aplicações AR tem uma manipulação limitada, permitindo apenas operações básicas de visualização, como rotação e escala do modelo 3D (TZIOUVARA, 2012). Contudo, é possível adicionar funcionalidades ao protótipo na AR, o que permite que sejam criados protótipos funcionais.

Outra ferramenta de prototipação rápida de produtos é a impressão 3D. Nos últimos anos, esse método vem se popularizando devido à diminuição dos custos de aquisição de impressoras 3D e de seus insumos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014; LEITE; TEIXEIRA; TEICHRIEB, 2016). Uma das vantagens desse método é a geração de um objeto 3D físico, no ambiente real, com o qual o usuário pode interagir não só visualmente, mas, também, com o sentido do tato. A aceitabilidade do protótipo depende bastante da sensação háptica que o usuário tem ao interagir com o protótipo (SIMON, 2012). Os protótipos gerados geralmente são apenas estruturais, contudo, partes móveis podem ser adicionadas, imprimindo-as separadamente e depois encaixando-as, tornando o protótipo estrutural e funcional. Outra característica da impressão 3D é que as impressoras mais populares, que usam a tecnologia de Modelagem por Fusão e Depósito (FDM), geralmente imprimem em uma única cor, não permitindo que superfícies sejam impressas em suas cores originais, fazendo com que alguns detalhes do produto não sejam percebidos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

Um problema encontrado na etapa de prototipagem é que a maioria dos protótipos utilizados são apenas estruturais, o que não permite uma avaliação detalhada do produto. Os protótipos estruturais e funcionais são minoria, e os que são produzidos geralmente não abrangem todas as funcionalidades do produto, muitos ficando restritos apenas a funcionalidades mecânicas. Dessa forma, alguns erros de projeto podem não ser notados nessa etapa, só sendo percebidos no produto final (ZORRIASSATINE et al., 2003; ALEXANDER et al., 2009). Poucos trabalhos se propõem a desenvolver protótipos estruturais e funcionais abrangendo a maioria das funcionalidades do produto (PARK; MOON; LEE, 2009). Assim, esse tipo de protótipo ainda é pouco explorado pela indústria, pois as técnicas propostas não são simples de serem implementadas e ainda não abrangem por completo as funcionalidades do produto.

Caso um protótipo já tenha sido modelado em 3D, o custo de prototipação utilizando AR ou impressão 3D é mínimo. Portanto, é possível combinar os dois métodos, aproveitando as vantagens de ambos. Dessa maneira, o usuário pode tocar no objeto físico impresso em 3D, tendo o sentido do tato imerso na experiência, e se beneficiar dos recursos da AR, o que permite que o protótipo tenha uma aparência e comportamento interativo como o de um produto final. Contudo, poucos trabalhos vêm sendo desenvolvidos combinando essas duas áreas (FERNANDES; WANG; SIMONS, 2015; GIESER et al., 2016; SIMÕES et al., 2016). Utilizando AR e Impressão 3D para geração de protótipos estruturais e funcionais e interativos foram encontrados apenas os trabalhos de Park, Moon e Lee (2009) e o de Verlinden (2014). Portanto, essa é uma área de pesquisa promissora, que ainda possui diversos desafios a serem explorados.

O trabalho de Park, Moon e Lee (2009) apresenta um sistema de prototipagem rápida para produtos portáteis utilizando modelos físicos e realidade aumentada. O modelo físico é impresso em 3D, então o modelo da AR é posicionado de forma a se sobrepor ao modelo físico. É possível interagir com o modelo através de um ponteiro físico, que possui um marcador para percepção na realidade aumentada. Utilizando o ponteiro, é possível realizar ações de cliques e toques no modelo 3D, e o resultado das ações é apresentado na AR. A visualização do sistema é feita em um PC, e uma webcam fica posicionada na cabeça do usuário. A principal contribuição é a possibilidade de interação diretamente com o protótipo físico e em AR. A desvantagem é que é necessário utilizar um ponteiro físico para interação (PARK; MOON; LEE, 2009).

Já o trabalho de Verlinden (2014) propõe uma metodologia de prototipagem em realidade aumentada, na qual a AR é sobreposta a um protótipo físico utilizando um projetor. O sistema, alimentado por uma câmera, ela localiza o protótipo e projeta alguma textura sobre o mesmo. É possível interagir com os protótipos movimentando-os diretamente sobre a mesa ou através de um controlador *touch screen* (VERLINDEN, 2014).

Esses dois trabalhos citados contribuem com abordagens que geram protótipos estruturais e funcionais e interativos, porém existem vários pontos a serem melhorados – como a necessidade de ponteiros físicos para interação, a utilização de mais de um dispositivo no ambiente de testes, entre outras –, visando a uma solução mais completa para o problema de experimentação de um protótipo estrutural e funcional na indústria.

O presente trabalho preenche lacunas encontradas nos trabalhos correlatos e apresenta um novo processo de prototipagem rápida, no qual os protótipos gerados são estruturais e funcionais e interativos, permitindo que funcionalidades do produto final sejam testadas ainda

na fase inicial de prototipagem.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

No desenvolvimento de novos produtos pela a industria, a etapa de prototipagem é essencial para que o produto possa ser testado antes dele entrar na linha de produção. Essa fase é fundamental para que o produto possa ser testado e avaliado antes de se tornar um produto final. Nela são verificadas suas características físicas, como tamanho, formato, encaixe, aparência, aspecto e cores, e, também, suas caraterísticas funcionais, como as atividades que o produto realiza e como se comporta durante a interação com o usuário. Deve-se analisar se essas características estão de acordo com o comportamento ou a reação esperados para o produto em questão (BAXTER, 1995; NOORANI, 2006).

Para o desenvolvimento de um protótipo estrutural e funcional, uma das formas é desenvolvê-lo como se fosse um produto final, isto é, utilizando a linha de produção para a construção de apenas um protótipo. O problema desse formato é que a linha de produção teria que ser parada, e matrizes ou moldes teriam que ser gerados para a produção de apenas um protótipo, fazendo com que seu custo de desenvolvimento se torne elevado. Outro ponto a se destacar é o alto tempo de projeto e elaboração para desenvolvimento do produto e sua solução completa até chegar à linha de produção (BAXTER, 1995).

Para contornar esse problema, pode ser utilizada a produção de protótipos mais simples, que não impactem na linha de produção principal da indústria, podendo ser desenvolvidos em paralelo. A impressão 3D vem sendo utilizada como umas das possibilidades para geração de protótipos; contudo, os protótipos impressos em 3D geralmente são apenas estruturais, não possuindo funcionalidades. Todavia, testar as funcionalidades de um protótipo é fundamental (BAXTER, 1995).

Protótipos funcionais podem ser desenvolvidos utilizando meios digitais, como a VR ou a AR; contudo, eles não são palpáveis, sendo possível apenas visualizá-los e manipulá-los através de dispositivos específicos.

Dessa forma, os protótipos apenas estruturais ou apenas funcionais não entregam uma experiência completa como a com um protótipo estrutural e funcional, que é mais próximo à experiência com um produto final.

Além disso, combinar a impressão 3D com a AR ou VR parece ser um caminho viável para unir os benefícios de cada uma delas, possibilitando que protótipos estruturais e funcionais

sejam desenvolvidos com custo e tempo mais baixos do que o de um produto final.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um processo cíclico de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa (CYPIRP) para o desenvolvimento de produtos, explorando as vantagens isoladas da Realidade Aumentada e da Impressão 3D, combinando-as de forma a gerar um processo sinérgico.

Os objetivos específicos do trabalho são apresentados abaixo:

- Levantar e analisar as soluções existentes na literatura científica, focando em trabalhos que utilizam AR, Impressão 3D e Prototipagem Rápida, através de uma revisão sistemática.
- Definir a arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo;
- Desenvolver um sistema que implemente a arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo;
- Desenvolver estudos de caso;
- Analisar os estudos de caso através de experimentos com usuários e aplicação de questionários;
- Validar e testar o processo.

1.4 METODOLOGIA

No presente trabalho, inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da área de prototipagem rápida interativa com AR e impressão 3D. Em seguida, foi proposto um processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa. Esse processo possui uma etapa de experimento do protótipo, a qual foi implementada em um sistema de AR de simples configuração.

Dois estudos de caso foram propostos e implementados. Para isso, os protótipos estruturais e funcionais foram produzidos e testados. Primeiramente, o protótipo físico foi impresso em 3D; em seguida, as funcionalidades foram implementadas na AR. Usuários experimentaram o

protótipo, e avaliaram através da aplicação do questionário de experiência do usuário (*User Experience Questionnaire* (UEQ)). Por fim, os resultados foram analisados.

Os experimentos realizados com usuários foram autorizados pelo Conselho de Ética em Pesquisa da UFPE.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho tem como principal contribuição o desenvolvimento de um processo cíclico de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa, junto a um sistema de experimentação dos protótipos de baixo custo. Isso permite que novos produtos sejam planejados, desenvolvidos e avaliados em um menor tempo de prototipagem.

As contribuições secundárias são listadas a seguir:

- Interação com o protótipo utilizando os dedos, sem necessidade de luvas, ou marcadores especiais;
- Sistema de prototipagem em um único dispositivo, com uma única câmera de vídeo, gerando um sistema de testes de simples configuração e uso;
- Rastreamento do objeto de interesse sem a necessidade de marcadores AR tradicionais.

1.6 ESTRUTURA

O presente trabalho está organizado conforme descrito a seguir. Neste primeiro capítulo, foi apresentada a introdução do trabalho. No Capítulo 2, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, são explicados os principais conceitos necessários para o embasamento desta pesquisa. No Capítulo 3, MAPEAMENTO SISTEMÁTICO, são apresentadas técnicas relacionadas ao presente trabalho. No Capítulo 4, METODOLOGIA, é apresentado o processo proposto e a metodologia utilizada. No Capítulo 5, DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS, são apresentados os resultados obtidos. No 6, CONCLUSÃO, são apresentados a conclusão e os trabalhos futuros. Por fim, tem-se o Apêndice I com uma cópia do artigo publicado e, anexo a este documento, tem-se o Anexo I, no qual é apresentado o questionário UEQ.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para uma melhor compreensão dos próximos capítulos é necessário embasar alguns dos métodos e conceitos que são utilizados durante este trabalho. Portanto, neste capítulo são introduzidos alguns conceitos básicos das áreas de Processo de Design, Prototipagem Rápida, Fabricação Digital, Impressão 3D, CNC, Realidade Virtual e Realidade Aumentada.

2.1 PROCESSO DE DESIGN

O processo de design de produto é a sequência de etapas ou atividades que um fabricante realiza para conceber, projetar e comercializar um produto. O objetivo é criar um produto que atenda às necessidades do usuário e do mercado, sendo funcional, agradável e viável para produção. Cada fabricante define suas próprias peculiaridades em seu processo de design, contudo é importante conter as etapas listadas a seguir (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).

- Pesquisa e Definição. Deve-se fazer a definição inicial do produto e decidir qual problema ele deve resolver. Nesta etapa devem ser realizadas pesquisas para entender o público-alvo e as tendências do mercado, as inovações e as soluções existentes. Também são estabelecidas as características principais do produto (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).
- Conceituação e Ideação. Neste momento, deve-se pensar sobre o problema a ser resolvido pelo produto e elaborar ideias e conceitos a ele relacionados. Geralmente é iniciado através de um *brainstorming* com a equipe, em que inovações são propostas. São feitos rascunhos sobre o projeto de design do produto para visualizar as sugestões. Também podem ser desenvolvidos protótipos iniciais de baixa fidelidade e fluxogramas para a definição do funcionamento do produto (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).
- Desenvolvimento do Conceito e Design. Nesta etapa, o conceito é refinado e se desenvolve o design detalhado do produto. São definidas especificações detalhadas do produto, utilizando sistemas *Computer Aided Design* (CAD), definindo sua estrutura física 3D e todo seu design visual. Também são definidas as inovações, os materiais e cores a serem utilizados (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).
- Prototipagem e Testes. Aqui, protótipos são criados para testar as funcionalidades dos produto e avaliar a experiência com o usuário. São construídos protótipos rápidos de

forma física ou digital, para testar os conceitos e funcionalidades. Testes com o usuário são realizados para avaliar a interação e identificar pontos de melhoria (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).

- **Fabricação e Produção.** Nesta fase, o projeto é preparado para entrar na linha de produção principal da indústria. São realizados os ajustes finais no design produto para que sua produção seja viável e eficiente. São definidos fornecedores e materiais e testes finais são finalizados para garantir o padrão de conformidade (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).
- **Lançamento e pós-lançamento.** Nesta etapa, o lançamento do produto é monitorado e campanhas de marketing são realizadas para a divulgação. Também são planejadas a logística de distribuição e o suporte ao cliente (ULRICH; EPPINGER; YANG, 2019).

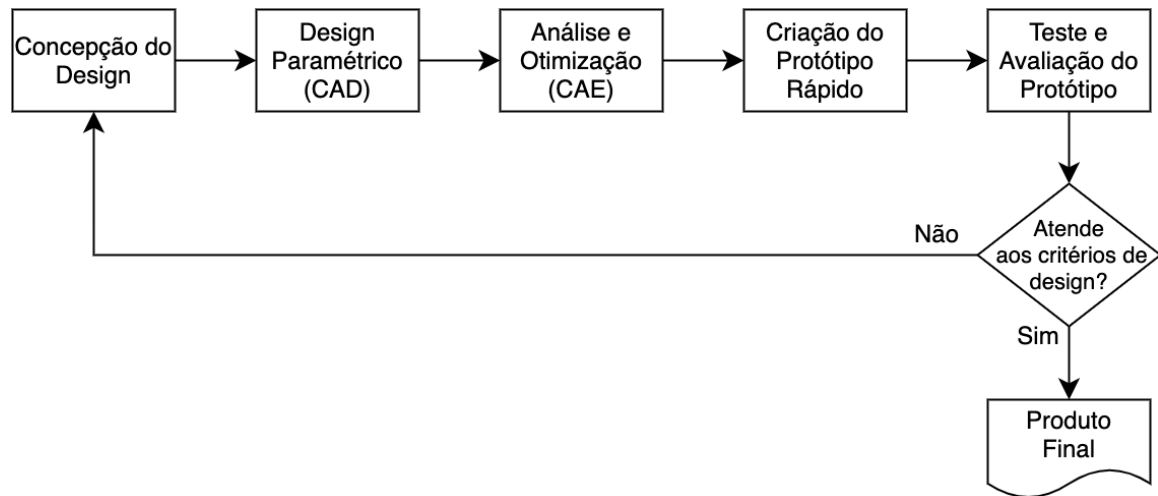
Neste trabalho, o foco está precisamente na etapa de prototipagem rápida, que se apresenta a seguir.

2.2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

No processo de desenvolvimento de um produto pela indústria estão envolvidas várias etapas, de acordo com Noorani (2006) tem-se 5 etapas. No fluxograma da Figura 2 é possível visualizar todas elas e sua ordem de execução. A primeira etapa é a Concepção do Design, onde configurações gerais do produto a ser desenvolvido são definidas. A segunda etapa é a de Design Paramétrico (CAD), onde o design do produto é especificado e definido, geralmente utilizando um Programa de Auxílio ao Design (CAD - *Computer Aided Design*). A terceira etapa é a de Análise e Otimização, onde o design é analisado e caso possível, otimizado, geralmente utilizando um Programa de auxílio a Engenharia (CAE - *Computer Aided Engineering*). A quarta etapa é a de Criação do Protótipo Rápido, na qual o protótipo deve ser produzido. Na quinta etapa o protótipo é testado e avaliado (NOORANI, 2006).

Esse é um processo cíclico, a quinta etapa deve responder a pergunta: “Atende aos critérios de design?”. Caso a resposta seja negativa todo o processo é repetido, em busca de algum problema que tenha causado o não atendimento aos critérios. Caso o critério tenha sido atendido, o protótipo é aprovado e o produto final é produzido (NOORANI, 2006, pp. 22–23).

Figura 2 – Ciclo de desenvolvimento de um produto



Fonte: Adaptado de Noorani (2006, p. 22).

As etapas de criação do protótipo rápido e de teste e avaliação são críticas, visto que, nela, uma versão inicial do produto, normalmente ainda não funcional, é testada e avaliada. O resultado dessa avaliação é utilizado para melhorar o protótipo, de forma que qualquer correção necessária possa ser aplicada ainda na fase de prototipagem, prevenindo que algum erro de projeto chegue ao produto final. A duração do processo de desenvolvimento e aprovação do protótipo é proporcional ao custo desta etapa, o qual pode durar dias ou meses, portanto, é conveniente minimizar sua duração, realizando uma prototipagem rápida, o que reduz o custo final de desenvolvimento do novo produto (TEIXEIRA et al., 2016; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

Pode-se definir prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* (RP)) como um processo de produção de objetos físicos, chamados modelos RP, utilizando alguma técnica de Fabricação Digital, sem utilização da linha de produção industrial tradicional. Um modelo de RP geralmente é utilizado na produção do primeiro exemplar de um produto. Serve ao propósito de demonstrar idéias, e pode suportar vários tipos de experimentos e interações que fornecem um *feedback* rápido e crítico para o desenvolvimento e avaliação do produto, antes de sua produção em série (PARK; MOON; LEE, 2009).

Contudo, outras maneiras de realizar a prototipagem rápida vem sendo propostas, sem a necessidade da produção de um modelo físico. Com o uso de tecnologias virtuais como a VR, modelos podem ser visualizados na tela de um computador em um ambiente totalmente virtual, ou utilizando a AR, onde o modelo pode aparecer de forma virtual sobre um ambiente real (PORTER et al., 2010; MARNER et al., 2011; PARK; MOON; LEE, 2009; VERLINDEN, 2014).

Figura 3 – Tipos de protótipo: Físico (a), VR (b) e AR (c)



Fonte: (PARK; MOON; LEE, 2009).

A Figura 3 apresenta protótipos físicos e virtuais de um videogame portátil. Na Figura 3.(a) é apresentado um protótipo físico impresso em 3D, em (b) tem-se um protótipo em Realidade Virtual, e em (c) tem-se o protótipo em Realidade Aumentada, posto virtualmente sobre uma mesa real.

Conforme apresentado no Capítulo I, Introdução, a prototipagem rápida pode ser classificada nas categorias estrutural, funcional e estrutural e funcional. E, quando um usuário pode interagir com o protótipo este ainda é considerado interativo.

A seguir, são apresentadas algumas técnicas de fabricação digital.

2.3 FABRICAÇÃO DIGITAL

A fabricação digital é a produção de objetos físicos, a partir de modelos 3D, de forma automatizada, permitindo que diversos objetos, independente da complexidade geométrica sejam produzidos através de um mesmo processo. Existem diversas tecnologias de fabricação digital, os mais populares são a Impressão 3D e as Fresadoras CNC (WEICHEL, 2016; SCOPIGNO et al., 2017).

A fabricação digital revolucionou a forma como os produtos são projetados e fabricados, pois com seu fácil acesso hoje em dia, é possível que o cidadão comum possa, finalmente, produzir os seus próprios objetos com tecnologia e precisão similar a das grandes companhias (FOLLMER, 2011).

A seguir, serão explicados algumas técnicas de impressão 3D e CNC.

2.3.1 Impressão 3D

A Impressão 3D, ou fabricação aditiva (*Additive Manufacturing - Additive Manufacturing (AM)*), também era conhecida, há alguns anos, como Prototipagem Rápida, visto que esta era sua principal aplicação. Contudo, atualmente o termo Prototipagem Rápida é utilizado de forma mais abrangente envolvendo suas várias modalidades. (WONG; HERNANDEZ, 2012; CHOI; CHAN, 2004; WILLIS; SPEICHER; COOPER, 2007).

Existem vários tipos de impressoras 3D que utilizam diferentes tecnologias e materiais. Todos têm em comum que eles começam do zero e constroem objetos tridimensionais camada por camada.

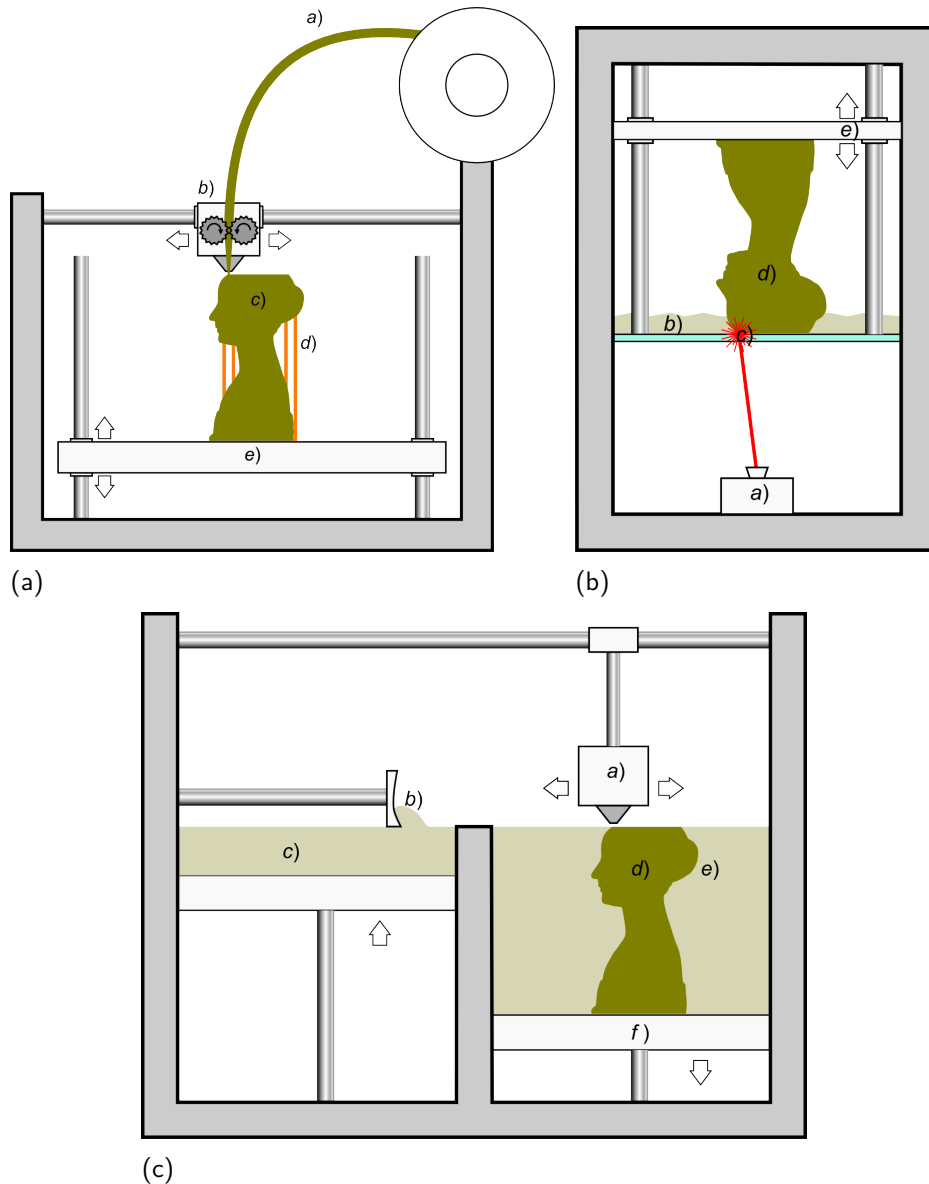
Está é uma área que teve uma grande expansão nos últimos anos. Diversos fabricantes de impressoras 3D surgiram no mercado, diminuindo significativamente o custo de aquisição desses equipamentos, e várias tecnologias diferentes de impressão são empregadas. Contudo, todas são baseadas em um mesmo princípio básico, a sobreposição ou adição de camadas de impressão, daí o termo de fabricação aditiva. Os métodos mais utilizados são o da Modelagem por Fusão e Depósito (*Fused deposition modeling - FDM*) ou Fabricação por Filamento Fundido (*Fused Filament Fabrication - FFF*), o da Estereolitografia (SLA) e os baseados em Cama de Pó (*Powder bed*) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

O FDM e o FFF são tecnologias equivalentes, contudo, o FDM é marca registrada do fabricante Stratasys Inc. Este método de impressão 3D é o mais popular por ser de baixo custo, nele são utilizados filamentos, geralmente plásticos, como Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) ou Ácido Polilático (PLA), que são fundidos e aplicados sobre um plano formando uma camada, sucessivas camadas vão sendo sobrepostas de forma a gerar um objeto 3D no ambiente real (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

A Figura 4.(a) apresenta um esquema do funcionamento deste método. Um rolo com filamento (a) alimenta o extrusor (b) que aquece o filamento, derretendo-o, possibilitando que o mesmo seja depositado na posição desejada formando o objeto (c). Dependendo do formato do objeto pode haver a necessidade do uso de material de suporte (d) para dar sustentação às camadas que serão depositadas. A mesa de impressão (e) vai descendo a medida que as camadas são depositadas (SCOPIGNO et al., 2017).

O SLA é baseado em uma resina líquida que é solidificada através da aplicação de um laser sobre os pontos desejados. Essa técnica é apresentada na Figura 4.(b), onde um emissor de laser (a) emite o raio ultra-violeta para uma fina camada de resina líquida (b) na posição (c)

Figura 4 – Métodos de impressão 3D: FDM (a), SLA (b) e Cama de pó (c)



Fonte: (SCOPIGNO et al., 2017).

onde deseja-se solidificar a resina de forma a construir o objeto (d). À medida que as camadas vão se solidificando a mesa de impressão (e) vai subindo, e a resina líquida vai sendo repostada. Desta forma, o objeto vai sendo construído de cabeça para baixo, visto que a resina líquida precisa sempre ficar na parte de baixo da impressora (SCOPIGNO et al., 2017).

O SLA utiliza um material de impressão monocromático, gerando um modelo impresso em resina plástica, geralmente transparente. A impressão FDM tradicional também é monocromática, mas diferentes cores podem ser utilizadas, uma por vez, bastando para isso trocar a cor do filamento que alimenta a impressora. Contudo, algumas impressoras FDM possuem mais de um extrusor, cada extrusor pode ser alimentado por um filamento de cor diferente,

possibilitando a impressão de peças em mais de uma cor, porém, as cores permanecem sólidas sem se misturarem (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

A impressão de Cama de pó (*powder bed*), utiliza algum material em pó fino, como gesso, madeira ou metal. A Figura 4.(c) demonstra esse processo, o material em pó (c) é espalhado em uma cama (f) formando uma fina camada que preenche a cama por completo, em seguida, uma cabeça de impressão (a) injeta um líquido (*binder*) na região que fará parte da peça impressa (d), tornando o pó firme nessa região, as demais regiões (e) permanecem com o pó seco e solto (SCOPIGNO et al., 2017). Algumas impressoras de Cama de Pó possibilitam que o pó seja colorido a cada camada, utilizando um sistema similar ao das impressoras jato de tinta convencionais. Ao término da impressão o objeto impresso fica totalmente envolto pelo pó, mas é facilmente retirado, visto que o pó fica seco e solto, e a peça impressa fica rígida (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

Esses são os três métodos de impressão 3D mais utilizados atualmente no mercado. Na próxima seção será apresentado um método de gerar objetos físicos a partir de modelos 3D, mas que não é considerado impressão 3D.

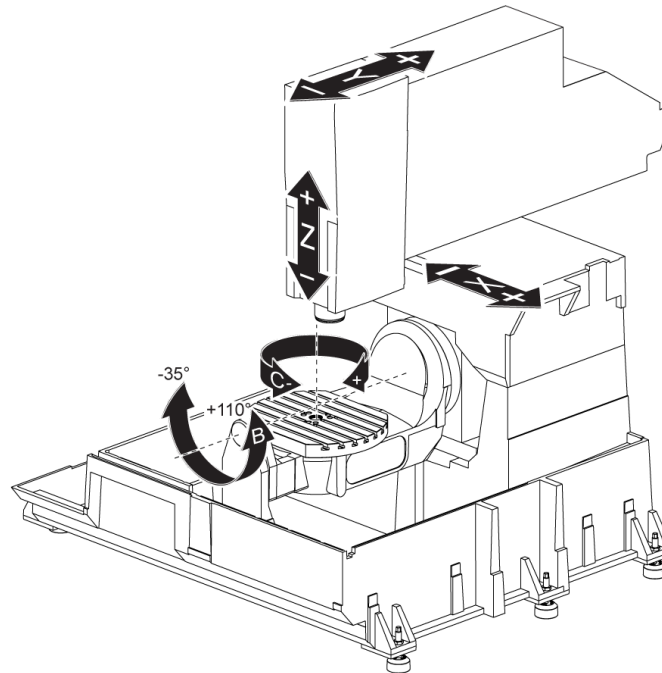
2.3.2 Fresadoras CNC

A fabricação subtrativa molda o objeto através da remoção de material: dada uma folha ou bloco de material, a maior parte é removida até que a forma desejada tenha sido esculpida. Dentre as técnicas de fabricação subtrativa as fresadoras CNC (*Computer Numerical Control*) são as mais utilizadas para modelagem 3D, podendo ser utilizadas em ambientes amadores e industriais. As formas que podem ser reproduzidas dependem dos graus de liberdade com os quais a ferramenta de corte pode ser articulada (WEICHEL, 2016).

A Figura 5 apresenta uma máquina CNC com 5 graus de liberdade. Além dos 3 eixos x,y,z básicos ela ainda possui rotação no eixo Z e no eixo Y, totalizando 5 tipos de movimentos. Este é o esquema de funcionamento da Fresadora industrial Haas UMC-750 da empresa Haas Automation (HAAS AUTOMATION, 2020).

As fresadoras CNC podem operar em praticamente qualquer tipo de material, como madeira, pedra e metal. No entanto, a maioria das fresadoras CNC possui um grande número de restrições geométricas que reduzem significativamente o domínio da aplicação, visto que dependem dos graus de liberdade da ferramenta de corte. Já a impressão 3D, por se tratar de um processo aditivo tem menos restrições do que as fresadoras (GIBSON; ROSEN; STUCKER,

Figura 5 – Esquema de Máquina CNC com 5 graus de liberdade

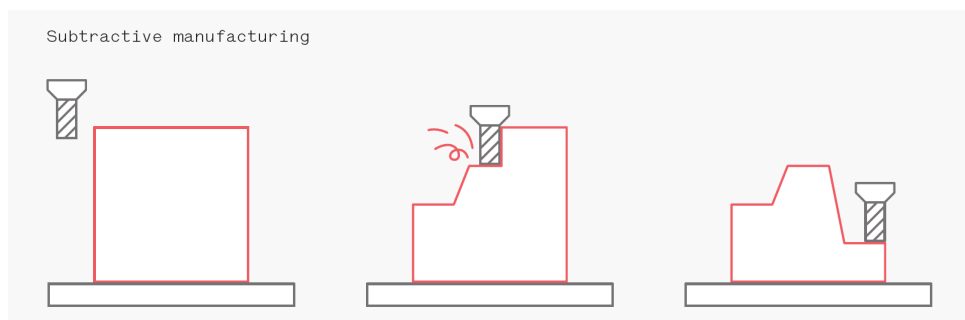


Fonte: (HAAS AUTOMATION, 2020).

2014; SCOPIGNO et al., 2017).

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam o processo de usinagem para um determinado modelo utilizando um processo subtrativo e um processo aditivo respectivamente. No primeiro, a peça é esculpida de um bloco e no segundo a peça é criada através da adição de várias camadas que se sobrepõem.

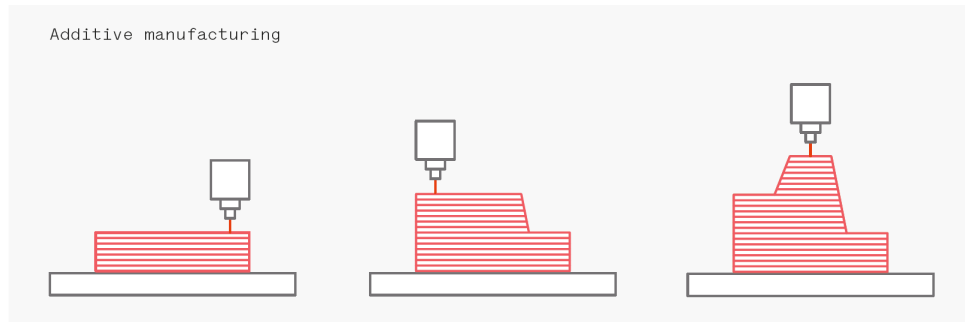
Figura 6 – Fabricação subtrativa (CNC)



Fonte: (3D HUBS, 2020).

A usinagem CNC, geralmente, pode remover o material mais rápido do que as Impressoras Aditivas adicionam um volume semelhante de material. No entanto, as máquinas aditivas podem ser utilizadas para produzir uma peça em um único estágio. As máquinas CNC requerem considerável configuração e planejamento de processos, principalmente quando as peças se tornam mais complexas em sua geometria. Portanto, a velocidade deve ser considerada em

Figura 7 – Fabricação aditiva (Impressão 3D)



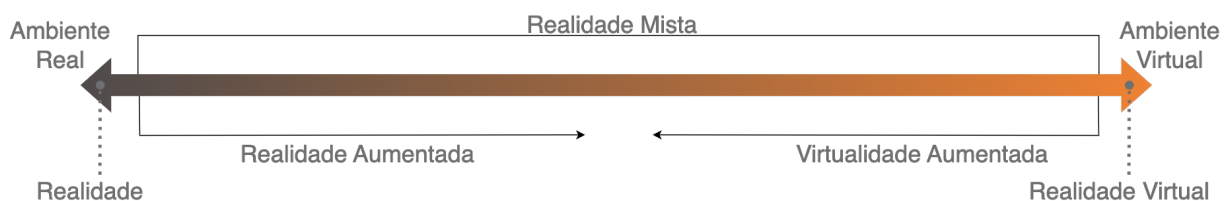
Fonte: (3D HUBS, 2020).

termos de todo o processo, e não apenas na interação física do material da peça. É provável que o CNC seja um processo de fabricação de vários estágios, exigindo o reposicionamento ou a realocação de peças em uma máquina ou o uso de mais de uma máquina. Já em no processo aditiva a configuração do equipamento é simples e a peça pode ser impressa de uma única vez em algumas horas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014).

2.4 REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA

Vivemos em um mundo com três dimensões espaciais, o qual chamamos de ambiente real ou realidade. Já em um ambiente 3D, dentro de um computador, tem-se um ambiente virtual, quando o ambiente é completamente virtual, ele é chamado de Realidade Virtual (VR) (TORI; HOUNSELL, 2020). Todo o espectro entre o ambiente real e a VR é chamado de Realidade Mista (*Mixed Reality* - Realidade Misturada (MR)). Esse conceito foi proposto por Milgram e Kishino (1994) e é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Contínuo real-virtual



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Dentro desse espectro, encontra-se a Realidade Aumentada (AR) e a Virtualidade Aumentada (AV). A AR é a visualização do mundo real com a adição de algumas informações virtuais; enquanto a AV é um ambiente virtual com alguns componentes da realidade inseridos nele (TORI; HOUNSELL, 2020). A VR e a AR são detalhadas nas próximas seções.

2.4.1 Realidade Virtual

A Realidade Virtual (VR) é uma tecnologia que simula ambientes e situações reais ou imaginárias com um alto grau de realismo e interatividade em um sistema computacional (WYK; VILLIERS, 2009).

Os usuários podem interagir com o ambiente virtual através de uma variedade de dispositivos de *hardware*, como, por exemplo, mouse, teclado, joysticks e luvas de dados. Em sistemas não imersivos, o usuário visualiza o ambiente em uma tela ou monitor de computador. Já em sistemas imersivos, o usuário pode ter a sensação de estar realmente no mundo virtual (imersão), por meio do uso de dispositivos ópticos e de áudio especiais, como displays montados na cabeça (*Head-Mounted Display* - HMD) e fones de ouvido (WYK; VILLIERS, 2009). Alguns desses dispositivos ópticos são apresentados na seção 2.4.3, "FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA".

A VR possui diversas aplicações, sendo amplamente utilizada em treinamento militar, projetos automotivo e aeroespacial, treinamento médico e entretenimento. As tecnologias digitais 3D são frequentemente um tópico de pesquisa aplicada e já estão sendo adotadas para aplicações comerciais (ABULRUB; ATTRIDGE; WILLIAMS, 2011).

Tecnologias de realidade virtual vêm sendo utilizadas como ferramenta educacional e de treinamento, com as vantagens de serem seguras, economicamente viáveis e totalmente controláveis. Além disso, os ambientes de realidade virtual aumentam significativamente a experiência de aprendizagem, pois fornecem ao aluno realismo e interatividade (ABULRUB; ATTRIDGE; WILLIAMS, 2011).

A VR também é utilizada em atividades de fabricação, fornecendo aos usuários um meio intuitivo de estar imerso em um ambiente sintético, permitindo a simulação de algumas tarefas envolvidas no processo de fabricação. Engenheiros podem interagir diretamente com os elementos do mundo da manufatura simulada. A cena virtual será atualizada em tempo real de acordo com as mudanças no ponto de vista dos usuários. Portanto, os usuários podem sentir e experimentar algum comportamento físico no ambiente virtual. Esse recurso fornece um espaço de trabalho ideal para inúmeras aplicações de engenharia. A VR vem sendo aplicada em muitas atividades de fabricação, como planejamento e projeto, prototipagem, operações, usinagem, treinamento, manutenção, montagem e desenvolvimento de produtos. O sucesso da VR em aplicações de fabricação depende, em grande parte, do nível da sensação imersiva e do grau de fidelidade dos ambientes virtuais (ONG; YUAN; NEE, 2008).

2.4.2 Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada (*Augmented Reality* - AR) é a visualização, direta ou indireta, em tempo real, de um ambiente físico real, sobre o qual são adicionadas informações virtuais geradas por computador. A AR visa a auxiliar o usuário, integrando informações virtuais com a visão do mundo real, aumentando a percepção do usuário e interação com o ambiente (FURHT, 2011).

A AR pode ser aplicada nas mais diversas áreas, já sendo utilizada em aplicações militares, industriais, médicas, comerciais, educacionais, de navegação, ou no universo do entretenimento e do design de produto. Como a AR adiciona informações ao mundo que vemos, de forma a tentar auxiliar o usuário, ela pode ser aplicada praticamente em qualquer atividade que um ser humano vá realizar (FURHT, 2011).

No ramo industrial, diversos trabalhos utilizam a AR na área de prototipagem – alguns deles são apresentados no capítulo 3, "MAPEAMENTO SISTEMÁTICO" (BALCISOY et al., 2000; PORTER et al., 2010; MARNER et al., 2011; SHEN; ONG; NEE, 2010; PARK, 2011).

2.4.3 Dispositivos de Visualização

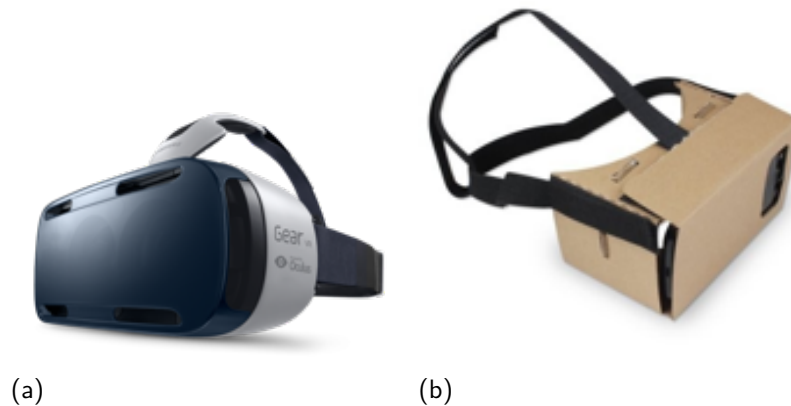
A AR e a VR se popularizaram bastante devido à difusão de dispositivos de visualização de baixo custo. Aparelhos celulares e tablets podem ser utilizados como dispositivos ópticos, na palma da mão ou integrados a dispositivos vestíveis, como os *Head-Mounted Display* (HMD) (TORI; HOUNSELL, 2020).

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam dispositivos HMDs que podem ser utilizados na VR imersiva e na AR. Eles são dispositivos imersivos que são acoplados na cabeça do usuário, de forma que uma tela fique na frente de seus olhos.

Na Figura 9 são apresentados dois dispositivos, de baixo custo, que não possuem tela própria. Para seu funcionamento, é necessário acoplar um aparelho celular que funciona como tela e dispositivo de processamento. O Google CardBoard (Figura 9.(b)) é produzido em papelão, sendo, dessa forma, de baixíssimo custo.

A Figura 10 apresenta três HMDs que possuem tela acoplada e hardware para processamento no próprio dispositivo. O Óculos Rift (Figura 10.(a)) foi desenvolvido pela Oculus VR, e foi o primeiro óculos de VR a proporcionar uma experiência realista e com um valor acessível – ele foi descontinuado em 2021. A Oculus VR foi comprada pelo Facebook em 2014

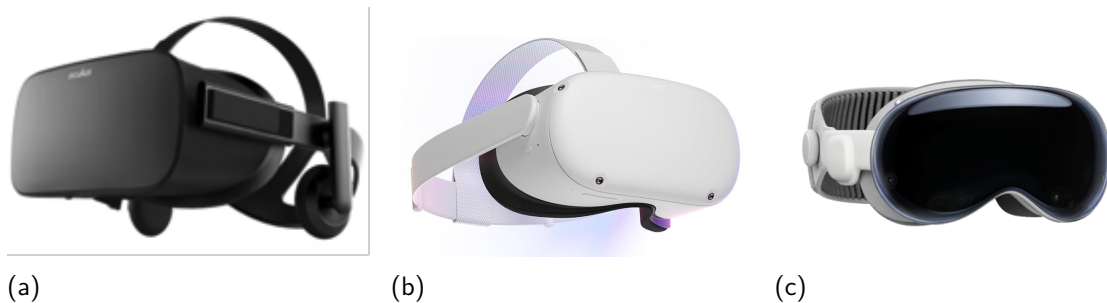
Figura 9 – Dispositivos de visualização HMD sem tela própria: Óculos Gear VR (a) e Google Cardboard (b)



Fonte: (GEAR..., 2024; GOOGLE..., 2024).

e depois rebatizada para *Reality Labs* (NAGTA et al., 2022). O Meta Quest 2 foi desenvolvido pelo *Reality Labs*, que é uma unidade de pesquisa do grupo Meta (NAGTA et al., 2022). O Apple Vision (Figura 10.(c)) foi lançado pela Apple em 2024.

Figura 10 – Dispositivos de visualização HMD com hardware próprio: Oculus Rift (a), Óculos Meta Quest (b) e Apple Vision Pro (c)



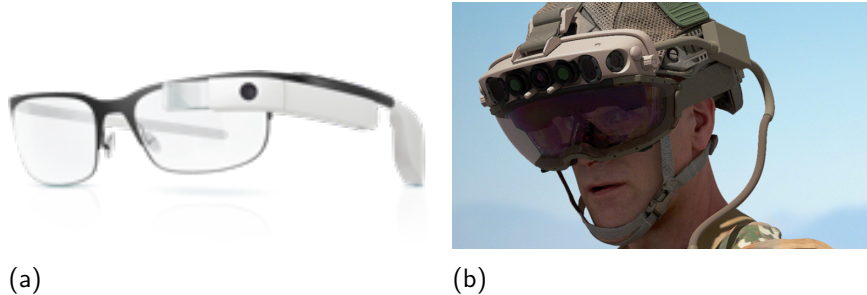
Fonte: (OCULUS..., 2024; META..., 2024; APPLE..., 2024).

Os HMDs também podem ser utilizados na AR, desde que possibilitem que o usuário visualize o ambiente real. Dessa forma, mesmo os óculos completamente fechados podem ser usados na AR, desde que possuam uma câmera de vídeo que filme o ambiente. Esse tipo de HMD é chamado dispositivo de visão através de vídeo (*video see-through*), visto que só é possível visualizar o ambiente externo por meio de um vídeo em tempo real (KIM; DEY, 2010; FURHT, 2011). Os dispositivos apresentados nas Figuras 9 e 10 possuem câmera de vídeo que permite a exibição do ambiente externo, assim também podem ser usados em aplicações de AR.

Os HMDs baseados em óculos abertos permitem a visualização do mundo real através de lentes comuns, e a AR é projetada por intermédio de microtelas integradas. Exemplos dessa categoria são apresentados na Figura 11. O Óculos Google Glass foi desenvolvido pelo

Google e atualmente está descontinuado. O IVAS (Integrated Visual Augmentation System) é utilizado pelo exercito dos Estados Unidos. Ele foi desenvolvido pela Microsoft em parceria com o governo americano, o qual adquiriu 120 mil unidades do IVAS (SANTOS et al., 2022).

Figura 11 – Dispositivo de visualização para realidade aumentada de visão óptica direta: Google Glass (a) e IVAS (b)

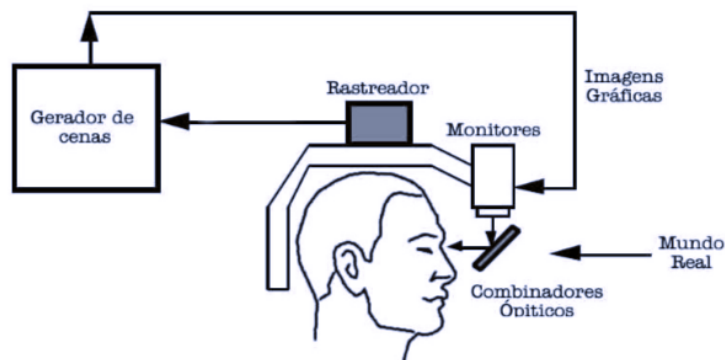


Fonte: (GOOGLE..., 2020; U..., 2024).

As formas de visualização em um sistema de realidade aumentada podem ser classificadas de quatro maneiras: sistema de visão óptica direta, sistema de visão direta por vídeo, sistema de visão com base em monitor e sistema de visão óptica por projeção (ACIOLY, 2016).

No sistema de visão óptica direta (*Optical see-through*), apresentado na Figura 12, o usuário visualiza o mundo externo através de lentes transparentes comuns, e a informação da realidade aumentada é projetada nessa lente por meio de um monitor ou projetor. Nessa configuração, o mundo real está sempre sendo visto (ACIOLY, 2016). Um exemplo de dispositivo que é utilizado nesse sistema é o *Google Glass* (Figura 11).

Figura 12 – Sistema de visão óptica direta (*Optical see-through HMDs*)

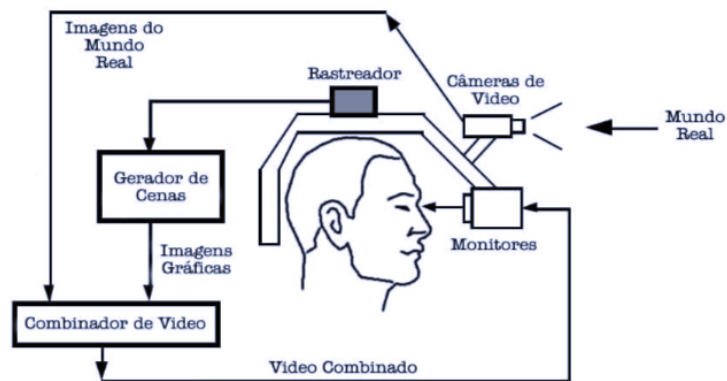


Fonte: (KIRNER; ZORZAL, 2005).

No sistema de visão direta por vídeo (*Video see-through HMDs*), conforme apresentado na Figura 13, a visão do usuário do mundo real é bloqueada e ele enxerga por intermédio de uma tela que apresenta o ambiente físico que está sendo filmado por uma câmera de vídeo em tempo real. Sobre a tela é renderizada a informação aumentada que se deseja apresentar

(ACIOLY, 2016). Exemplos de dispositivos utilizados para esse sistema são os *Google Cardboard* (Figura 9.(c)) e os Óculos Gear VR (Figura 9.(b)).

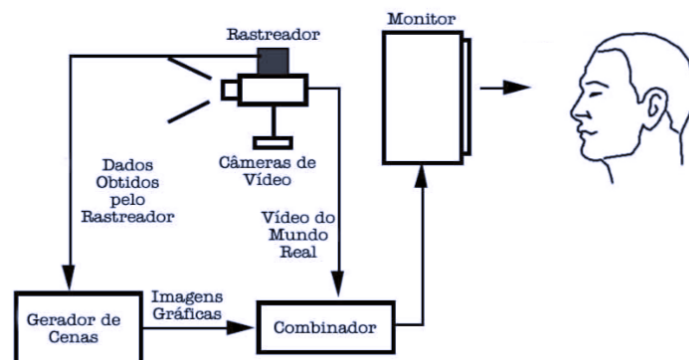
Figura 13 – Sistema de visão direta por vídeo (*Video see-through HMDs*)



Fonte: (KIRNER; ZORZAL, 2005).

Já no sistema de visão com base em monitor (*Monitor-based system*), nesse sistema o ambiente externo é filmado e apresentado em tempo real em um monitor ou tela, já com a informação da realidade aumentada incorporada, conforme apresentado na Figura 14. Contudo, o usuário não sente a sensação de imersão, pois o monitor e a câmera de vídeo geralmente estão fixos e o usuário não precisa vestir algum dispositivo em seus olhos; embora seja opcional o uso de óculos para visão estéreo 3D. Nesse sistema não há necessidade de um dispositivo específico, apenas um monitor e uma webcam são necessários (ACIOLY, 2016).

Figura 14 – Sistema de visão com base em monitor (*Monitor-based system*)

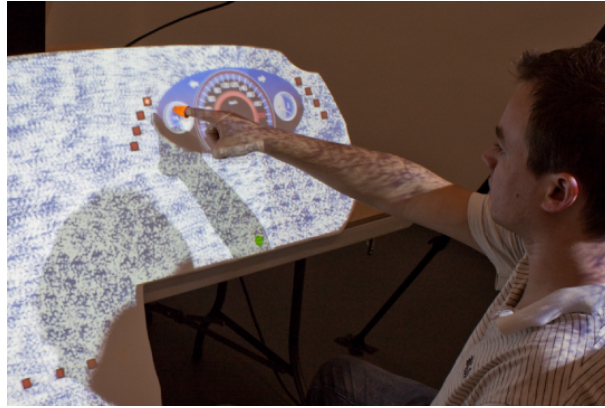


Fonte: (KIRNER; ZORZAL, 2005).

O sistema de visão óptica por projeção utiliza projetores, como *data shows*, para apresentar a informação aumentada sobre superfícies reais, nas quais o usuário pode visualizar diretamente sem a necessidade de vestir algum equipamentos ou acessório. Esse sistema visão é um dos mais simples de se implementar, podemos considerar que uma aula onde o professor projeta seus *slides* em uma parede, já é um tipo de visualização AR. Outro exemplo desse sistema de

visão foi utilizado no trabalho de Porter et al. (2010) para projetar um protótipo de um painel de carro em uma superfície, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de um sistema de visão óptica por projeção



Fonte: (PORTER et al., 2010).

2.4.4 Componentes de um sistema de desenvolvimento AR

Um sistema de desenvolvimento Realidade Aumentada pode possuir alguns componentes que possibilitam o desenvolvimento de aplicativos em AR. Os principais componentes são: rastreamento de pontos de interesse, visualização e renderização de informações, detecção de superfícies e gerenciamento de oclusão (EASYAR, 2020; VUFORIA, 2020; VIRO MEDIA, 2020). A seguir, cada um desses componentes são explicados.

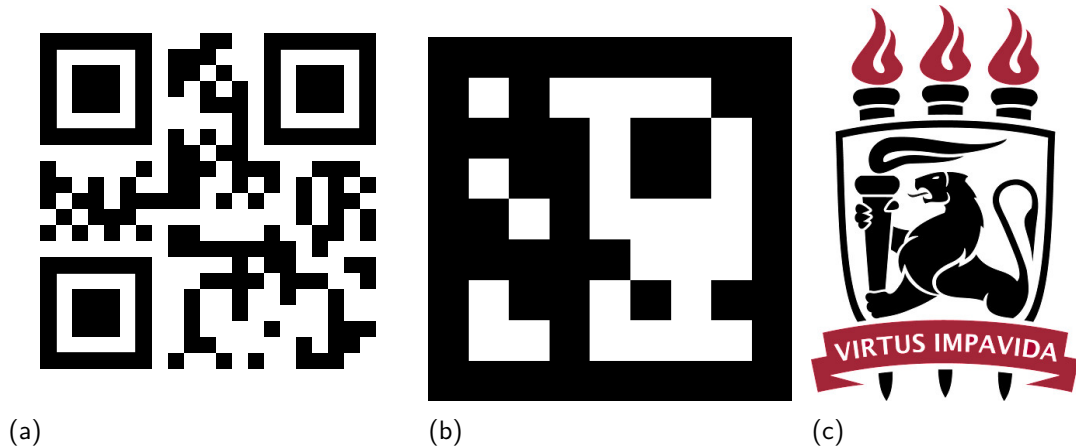
2.4.4.1 Rastreamento de pontos de interesse

Em uma aplicação AR, o ponto de interesse é o local onde alguma informação vai ser renderizada sobre o ambiente real. Esse local pode ser um ponto fixo no espaço tridimensional, ou ser definido por meio de um marcador bidimensional ou tridimensional que tem sua posição variável.

O marcador bidimensional pode ser um QR Code (HARA et al., 1998), um marcador fiducial (Bose; Amir, 1990) ou uma imagem. A Figura 16 apresenta exemplos desses três marcadores; na Figura 16.(a), tem-se um QR code armazenando o valor 100; na Figura 16.(b), tem-se um marcador fiducial também com o valor 100; e, na Figura 16.(c), tem-se uma imagem da logo da UFPE.

Os marcadores tridimensionais são objetos reais que estão presentes na cena e são confi-

Figura 16 – Tipos de marcadores bidimensionais: QR Code do valor 100 (a), Marcador Fiducial do valor 100 (b) e Imagem da logo da UFPE (c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

gurados a partir do modelo 3D desses objetos.

A operação de rastreamento localiza o marcador, obtendo a posição tridimensional de vários pontos do marcador na cena. Dessa forma, é possível monitorar a posição, a angulação e o tamanho do marcador. Essa posição continua sendo monitorada enquanto o marcador estiver sendo visualizado na cena.

Para o rastreamento, geralmente, é realizado um pré-processamento no marcador e é extraído dele os elementos principais que são utilizados para a detecção dos marcadores. Na biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020), é possível visualizar esses elementos e já prever se o marcador terá uma boa perceptividade ou não. A Figura 17 mostra os elementos principais do marcador-imagem da logo da UFPE, indicados pelo sinal de mais na cor amarela. Esse marcador foi classificado com cinco estrelas pela Vuforia, em uma escala que varia de um a cinco estrelas.

2.4.4.2 Visualização e Renderização

O componente de Visualização e Renderização é responsável por exibir alguma informação sobre o ponto de interesse. Essa informação pode ser exibida em qualquer formato; contudo, são mais comuns imagens 2D, vídeos, e objetos 3D (KALKOFEN et al., 2011).

A Figura 18 apresenta o processo de rastreamento de um marcador fiducial e a renderização de um objeto 3D sobre o marcador. O objeto 3D pode ser substituído por uma imagem ou vídeo, dependendo da necessidade do aplicativo.

A renderização possibilita também a exibição de animações em 3D, possibilitando que os

Figura 17 – Elementos principais do marcador-imagem da logo da UFPE



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 18 – Rastreamento e Renderização de um objeto 3D sobre um marcador fiducial



Fonte: (KALKOFEN et al., 2011).

objetos 3D sejam animados e efeitos de iluminação e brilho possam ser aplicados.

2.4.4.3 Mapeamento ambiente real e detecção de superfícies

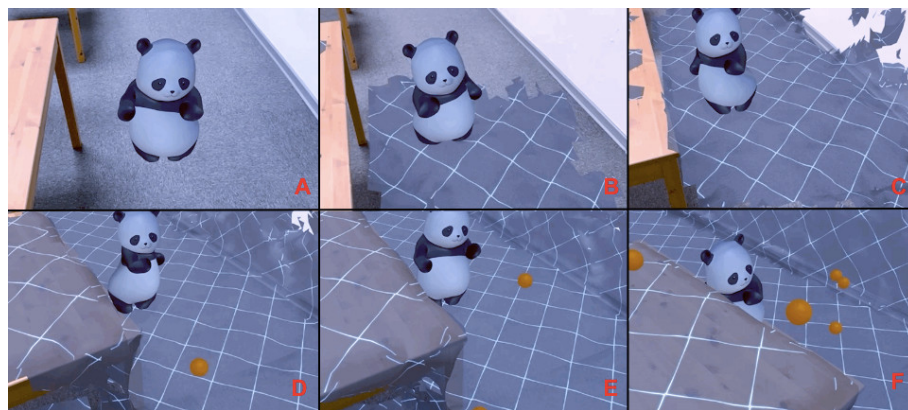
O mapeamento 3D do ambiente real possibilita identificar seu relevo e forma 3D, gerando uma representação virtual do ambiente real. Em sua forma mais simples, o mapeamento detecta superfícies planas, através do escaneamento do ambiente real, e gera suas representações no ambiente virtual (BARROS et al., 2022). Esse mapeamento é útil para situações em que se deseja detectar possíveis colisões com essas superfícies ou realizar o gerenciamento de oclusão dos elementos virtuais (EASYPAR, 2020).

As técnicas que fazem esse mapeamento são chamadas de técnicas de Localização e Mapeamento Simultâneos (*Simultaneous Localization And Mapping - Simultaneous Localization*

And Mapping (SLAM)). Elas permitem a criação simultânea de um mapa e a estimativa da posição da câmera em um ambiente desconhecido. Atualmente, pode-se fazer esse mapeamento em tempo real, utilizando sensores e dispositivos de baixo custo, como aparelhos celulares com câmeras *Red, Green, Blue* (RGB) comuns (BARROS et al., 2022). Isso é possível, uma vez que as técnicas de SLAM podem realizar o mapeamento baseado apenas em imagens 2D e, se disponível, nas informações inerciais da câmera (obtidas dos sensores de giroscópio e acelerômetro).

Na Figura 19, é possível perceber esse processo de mapeamento do ambiente e sua evolução; na Figura 19.(a), tem-se o ambiente real com um urso panda virtual posicionado no chão; em seguida, nas imagens B, C, D, E e F, o mapeamento do ambiente vai sendo realizado e é possível perceber sua progressão (EASYAR, 2020).

Figura 19 – Processo de mapeamento de ambiente e renderização de um urso panda da biblioteca



Fonte: (EASYAR, 2020).

2.4.4.4 Gerenciamento de oclusão

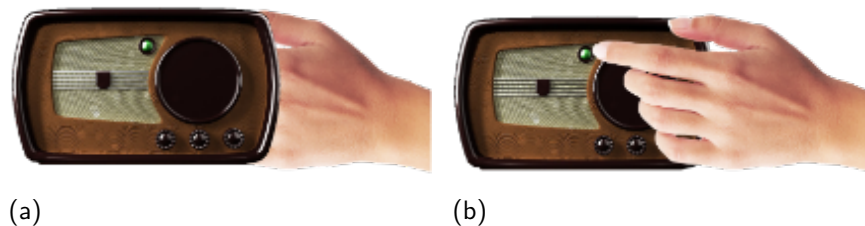
A oclusão parcial da informação virtual da AR por elementos reais do ambiente é importante para tornar a experiência de interação mais fidedigna. Para tal, é necessário conhecer os elementos que estão presentes no ambiente real e seu posicionamento, para, desta maneira, a oclusão dos elementos virtuais poder acontecer. Uma das formas para identificar o ambiente real é a partir do mapeamento 3D deste (KALKOFEN et al., 2011).

Existem duas principais situações em que a oclusão é necessária. A primeira é quando a informação virtual apresentada pela AR fica ou deveria ficar por trás de algum elemento fixo da cena real, como uma mesa. A segunda é quando algum elemento do ambiente real, como as mãos de uma pessoa, tenta interagir com a informação virtual (YAN, 2022).

A primeira situação é demonstrada na Figura 19.(f). Nela, é possível perceber um ambiente real mapeado no virtual e um urso panda virtual sendo parcialmente oculto pela mesa identificada. Ela é implementada pelo módulo de renderização, o qual renderiza apenas a regiões do objeto virtual que devem permanecer visíveis.

A segunda situação é apresentada na Figura 20, em que a mão do usuário, que é um elemento do mundo real, interage com um rádio virtual. A Figura 20.(a) mostra o comportamento sem a implementação da oclusão, o que produz uma sensação de estranhamento e não de naturalidade ao tentar interagir com o rádio. Já na Figura 20.(b), a oclusão foi implementada e a interação com o rádio é mais natural. A implementação dessa oclusão geralmente é realizada redesenhando o elemento real que está interagindo por cima da informação virtual. No caso de mãos, um algoritmo de detecção de mãos ou de pele segmenta a região e, em seguida, ela é redesenhada na mesma posição onde a mão real está localizada (YAN, 2022).

Figura 20 – Mão real de uma pessoa ao interagir com um rádio virtual: Comportamento sem oclusão (a) e Comportamento com oclusão (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

2.4.5 Ferramentas de desenvolvimento

Existem diversas ferramentas para desenvolvimento de aplicações de AR no mercado. Elas podem funcionar como bibliotecas ou *frameworks* de desenvolvimento. Essas ferramentas já possuem os componentes básicos de AR, como o rastreamento do marcador ou objeto de interesse através da câmera do dispositivo, e a exibição de alguma informação 3D sobre o marcador rastreado.

A seguir, são apresentadas as principais ferramentas de desenvolvimento disponíveis para dispositivos móveis Android, as quais possuam uma versão de desenvolvimento gratuita. Foram analisadas: ARCore, Vuforia, Easy AR, ViroMedia.

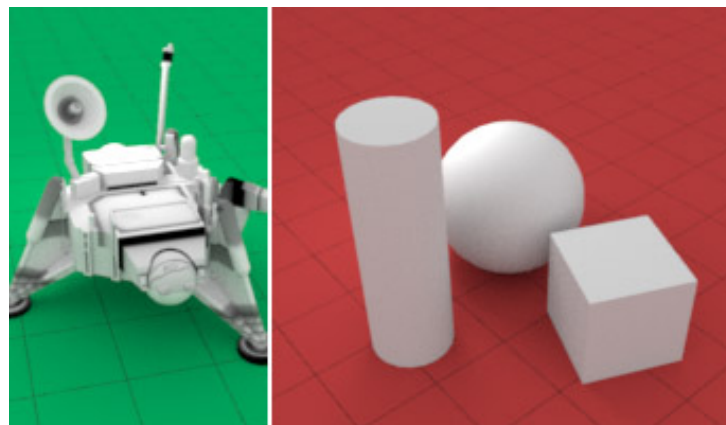
A ARCore (ARCORE GOOGLE, 2024) é um SDK de desenvolvimento para AR da Google. Ele é utilizado pelas bibliotecas de AR como base para o desenvolvimento de suas funcionalidades,

geralmente sendo um pré-requisito dessas bibliotecas (ARCORE GOOGLE, 2024). As bibliotecas Vuforia, Easy AR e ViroMedia utilizam a ARCore. Desenvolvedores comuns também podem utilizar diretamente a ARCore; porém, o uso das bibliotecas que utilizam a ARCore possuem recursos que são mais simples de serem implementados (VUFORIA, 2020; EASYAR, 2020; VIRO MEDIA, 2020).

A Vuforia (VUFORIA, 2020) é um Kit de Desenvolvimento de Software (*Software Development Kit - Software Development Kit (SDK)*) multiplataforma para desenvolvimento de aplicativos com AR. Com a Vuforia é possível gerar aplicativos para Android, iOS ou PC Windows, podendo ser utilizada em conjunto com as *Integrated Development Environment (IDE)s* Android Studio, Unity ou Visual Studio, sendo programável nas linguagens Java (Android), C++ (Windows) ou C# (Unity). Possui todos os recursos de AR descritos na seção anterior (VUFORIA, 2020), além de alguns recursos especiais, como marcadores baseados em modelos 3D e botões virtuais.

O marcador baseado em modelo 3D busca reconhecer um objeto 3D do ambiente real, a partir de um modelo 3D virtual, podendo ter sido gerado em algum aplicativo de CAD ou a partir de escaneamento 3D. A complexidade geométrica é fundamental para distinguir um objeto de outras formas no ambiente. Conforme apresentado na Figura 21, as formas simples, como cubos, esferas ou formas simples muito alongadas, podem ser facilmente confundidas com outros objetos no ambiente do utilizador. Além disso, o modelo deve possuir uma geometria rígida e uma textura colorida ou com detalhes, para possibilitar o reconhecimento. Dessa forma, esse tipo de marcador é bem sensível e só funciona com alguns tipos específicos de modelos (VUFORIA, 2020).

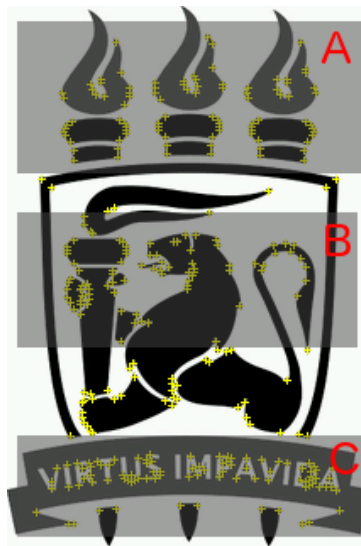
Figura 21 – Modelo 3D recomendado para ser utilizado como marcador (em verde) e modelos não recomendados (em vermelho)



Fonte: (VUFORIA, 2020).

Os botões virtuais da Vuforia detectam toques sobre regiões específicas do Marcador-Imagem. Essa detecção é realizada por meio da identificação de quais elementos principais do marcador estão sendo ocultados no momento, de acordo com a posição dos dedos do usuário (VUFORIA, 2020). A Figura 22 apresenta o marcador-imagem da logo da UFPE com seus principais elementos destacados em amarelo e com três botões virtuais, destacados em cinza claro e rotulados com as letras A, B e C. Quando a maior parte dos elementos principais de uma das regiões indicadas (A, B ou C) são ocultados, é considerado que o botão virtual foi pressionado ou selecionado.

Figura 22 – Botões virtuais, indicados nas regiões A, B e C, sobre o marcador-imagem da logo da UFPE



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A EasyAR (EASYAR, 2020) também é um SDK multiplataforma compatível com Android e iOS, podendo ser utilizada em conjunto com a IDE Android Studio nas linguagens Java e Kotlin, e na IDE Unity com a linguagem C#. Possui todos os componentes de AR, entretanto, no desenvolvimento em Java, a renderização funciona apenas com imagens e vídeos, não havendo um exibidor de objetos 3D por padrão para Android, apenas para Unity (EASYAR, 2020).

A Viro Media (VIRO MEDIA, 2020) também é compatível com Android e iOS, podendo ser programada nas linguagens Java, Javascript e *React Native*. O SDK não é compatível com Unity, mas pode ser programada em qualquer IDE, como o Android Studio, entre outras. O processo de compilação da versão Javascript e *React Native* é feito via o Gerenciador de Pacotes Node (*Node Package Manager - Node Package Manager (NPM)*) (VIRO MEDIA, 2020).

3 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

No presente trabalho, é proposta uma nova metodologia de Prototipagem Rápida Interativa (PRI) para desenvolvimento de produtos, para isto são combinados métodos de Realidade Aumentada (AR) e Impressão 3D (3DP). Para compreender melhor essa área de pesquisa foi realizado um mapeamento sistemático em prototipagem rápida interativa.

3.1 PLANEJAMENTO DO MAPEAMENTO

Nesta fase, são definidos os objetivos da pesquisa e a maneira pela qual o mapeamento será executada, incluindo tanto as formulações de questões de pesquisa quanto o planejamento de como a seleção de fontes e publicações será realizada.

3.1.1 Formulação das questões

Nesta seção, os objetivos do mapeamento sistemático devem ser claramente definidos. O foco da questão é identificar os trabalhos mais relevantes centrados no desenvolvimento de processos que lidam com prototipagem rápida interativa.

A questão que será abordada por nossa pesquisa é a seguinte: **Quais iniciativas foram realizadas para desenvolver processos de prototipagem rápida interativa?** Essas iniciativas devem possuir pelo menos uma das seguintes palavras-chave e conceitos relacionados:

- Impressão 3D
- Realidade Virtual
- Realidade Aumentada

As propostas de processos de prototipagem rápida interativa serão observadas, analisadas e comparadas. O resultado esperado ao final deste mapeamento sistemático é a identificação de processos relacionadas a prototipagem rápida interativa. Também serão gerados os números de iniciativas identificadas agrupadas por área e a principal proposta. O principal campo de aplicação que se beneficiará dos resultados desse mapeamento sistemático é a própria indústria de produtos, além de acadêmicos e pesquisadores ou profissionais interessados nesta área.

3.1.2 Seleção das fontes e das publicações

O objetivo desta seção é descrever o processo e os critérios de seleção das publicações e das fontes de publicações onde as pesquisas de trabalhos serão realizadas.

Os critérios de seleção para avaliar as fontes baseiam-se na opinião dos autores deste trabalho, e fundado em suas experiências em pesquisa. Além disso, essas fontes devem estar disponíveis na Web e possuir mecanismos de pesquisa usando palavras-chave. Os estudos devem ser escritos em inglês. A seguinte lista de fontes foi considerada: ScienceDirect, biblioteca digital ACM, biblioteca digital IEEE, DBLP e Google Acadêmico. Os resultados serão aperfeiçoados e poderão incluir outras obras que não foram recuperadas nessas fontes.

Uma vez definidas as fontes, é necessário descrever o processo e os critérios de seleção e avaliação das publicações.

O procedimento para seleção de trabalhos consiste em adaptar nosso termo de busca à sintaxe de cada mecanismo de busca e executá-lo. Em seguida, obtemos um conjunto de resultados aos quais os critérios de inclusão são aplicados para obter os estudos relevantes. Finalmente, os critérios de exclusão são aplicados ao conjunto de estudos relevantes para obter o nosso conjunto de estudos primários.

Os critérios de inclusão e exclusão dos estudos baseiam-se na questão de pesquisa, encontrando propostas que contribuam para processos de prototipagem rápida interativa. Os critérios de inclusão são focados na análise de títulos, palavras-chave e resumos dos estudos, enquanto os critérios de exclusão analisam principalmente resumos, conclusões e outras seções.

Adicionalmente, as referências bibliográficas dos trabalhos originalmente identificados por meio da busca por palavras-chave foram examinadas com o objetivo de localizar estudos mais relevantes.

Foram pesquisados trabalhos publicados entre 2010 até julho de 2019. A termo básico de busca utilizado é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 – Termo de busca básico

(Rapid OR Fast OR Interactive)
AND
(prototyping OR prototype)
AND
("Augmented Reality" OR "Virtual Reality" OR "Mixed Reality" OR 3D)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Esse termo foi adaptado para cada fonte de publicação, de acordo com a forma de busca

avançada que é disponibilizada.

No *Science Direct*, biblioteca digital ACM e biblioteca digital IEEE, inicialmente, foi feita uma busca que incluísse os resumos dos trabalhos, contudo, centenas de trabalhos foram encontrados, 625, 499 e 571 respectivamente, totalizando 1695 trabalhos. Por isso, foi realizada uma nova busca realizada apenas no título dos trabalhos, visando encontrar resultados mais precisos, desta forma, foram encontrados 21, 39 e 19 artigos trabalhos respectivamente.

Já na biblioteca DBLP e no Google Acadêmico não há opção de busca apenas no resumo para a janela temporal definida, no Google Acadêmico há opção de busca em qualquer local dos trabalhos, mas esta opção retorno aproximadamente 480 mil resultados para o termo de busca básico. Portanto, na DBLP e no Google Acadêmico, a busca também foi realizada apenas nos títulos dos trabalhos, sendo encontrados 13 e 44 trabalhos respectivamente. Os detalhes de configuração da busca em cada uma dessas plataformas é detalhada a seguir.

O *Science Direct* recebeu o termo de busca básico sem nenhuma alteração, ou seja, da forma que está definido na Tabela 1. Na biblioteca digital ACM foi adicionada a palavra chave "acmdlTitle" para a realização da busca apenas no título. O termo de busca ficou da seguinte forma:

Tabela 2 – Termo de busca ACM

```
acmdlTitle:((Rapid OR Fast OR Interactive)
AND (prototyping OR prototype)
AND ("Augmented Reality" OR "Virtual Reality" OR "Mixed Reality"
OR 3D))
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na biblioteca digital IEEE, o termo de busca alterado para indicar o local onde a busca é realizada a cada termo booleano, ficando da seguinte forma:

Na biblioteca DBLP, o termo de busca foi alterado substituindo os operadores booleanos OR por ' | ' e AND por um espaço, ficando da seguinte forma:

Para realizar a busca no Google Acadêmico apenas no título foi adicionada a palavra reservada "allintitle", o operador booleano AND foi substituído por espaço e foi desativada a busca em citações. Nesta plataforma, palavras entre aspas duplas são buscadas pelas palavras próximas uma das outras e não exatamente em sequencia. Por isso, o termo de busca "Augmented Reality" OR "Virtual Reality" OR "Mixed Reality" foi substituído por ((Augmented OR Virtual OR Mixed) Reality). O termo de busca final utilizado foi:

Tabela 3 – Termo de busca IEEE

```

("Document Title":Rapid OR "Document Title":Fast
OR "Document Title":Interactive)
AND
("Document Title":prototyping OR "Document Title":prototype)
AND
("Document Title":"Augmented Reality"
OR "Document Title":"Virtual Reality"
OR "Document Title":"Mixed Reality"
OR "Document Title":3D)

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 4 – Termo de busca DBLP

```

(Rapid | Fast | Interactive) (prototyping | prototype)
("Augmented Reality" | "Virtual Reality" | "Mixed Reality" | 3D)

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 5 – Termo de busca Google Acadêmico

```

allintitle: (Rapid OR Fast OR Interactive) (prototyping OR
prototype) (((Augmented OR Virtual OR Mixed) Reality) OR 3D)

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

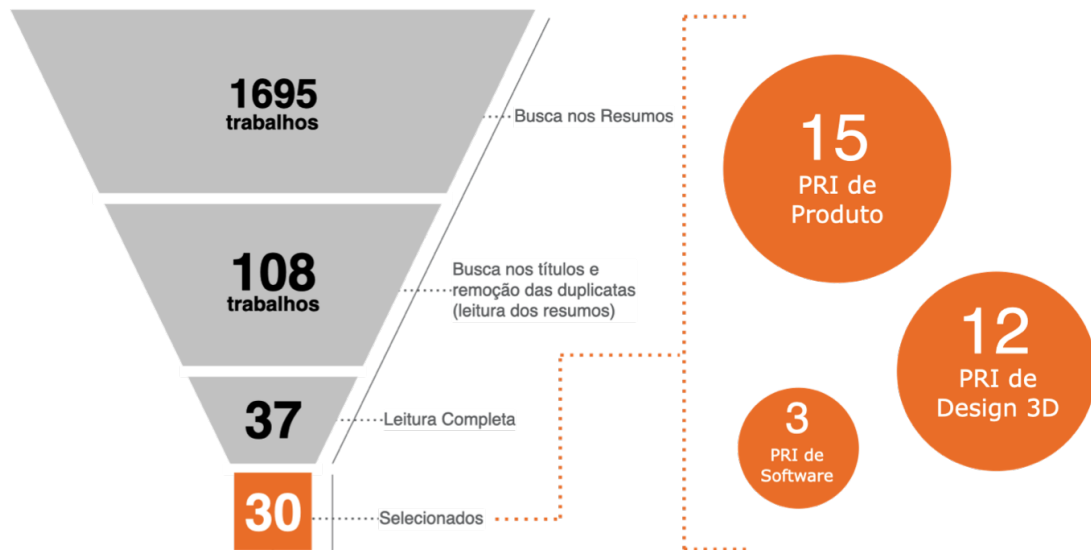
Foram encontrados no total 136 trabalhos, dos quais 21 foram do ScienceDirect, 39 na biblioteca digital ACM, 19 da biblioteca digital IEEE, 13 da DBLP e 44 Google Acadêmico. Desses trabalhos 28 eram repetidos, removendo as duplicatas ficaram 108 trabalhos para serem inicialmente avaliados.

A Figura 23 apresenta um resumo desse processo de filtragem, inicialmente obteve-se 1695 artigos a partir da busca nos resumos dos trabalhos. Em seguida, foi feita uma busca apenas nos títulos, a qual, depois da remoção das duplicadas, obteve-se 108 trabalhos.

Cada trabalho identificado, dentre os 108, foi avaliado para decisão acerca da seleção. Os estudos que atenderam as seguintes critérios de inclusão foram inicialmente selecionados:

- Propor um processo de prototipagem rápida interativa;
- Utilizar Realidade Virtual, Realidade Aumentada ou Impressão 3D no processo.

Figura 23 – Funil da extração de dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

E os estudos que atenderam as seguintes critérios de exclusão foram excluídos:

- Não ser incluído nas categorias de prototipagem rápida de Produto, de Design 3D ou de Software;
- Trabalhos não completos, como resumos de congressos ou pôsteres que não fornecem dados suficientes para análise;
- Trabalhos que não foram escritos nos idiomas português, ou inglês ou espanhol.

3.2 EXTRAÇÃO DOS DADOS

Durante esta fase, a pesquisa nas fontes definidas deve ser executada e os trabalhos obtidos devem ser avaliados de acordo com os critérios estabelecidos. Em seguida, as informações relevantes para a questão de pesquisa devem ser extraídas dos 108 trabalhos inicialmente selecionados. Através da análise do resumo desses trabalhos foram excluídos os que não se encaixam em todos os critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Após essa exclusão ficaram 28 trabalhos, os quais foram analisados profundamente para confirmação se realmente obedeciam aos critérios, destes apenas 21 permaneceram. Durante a leitura destes trabalhos, algumas referências foram analisadas e mais 9 trabalhos foram adicionados baseados nas referências citadas. Totalizando 37 trabalhos analisados de forma completa, dos quais 30 estão

sendo analisados neste capítulo. Esses valores também são apresentados no final do funil da Figura 23.

Durante a análise dos trabalhos percebeu-se diferentes tipos Prototipagem Rápida Interativa (PRI), as quais foram agrupadas em 3 categorias: PRI de Produto, PRI de Design 3D, PRI de *Software*. A PRI de Produto é voltada para produtos físicos e podem ser produzidos pela indústria. A PRI de Design 3D gera protótipos virtuais em 3D. Já a PRI de *Software* envolve processos interativos para geração de protótipos de aplicativos.

Um resumo comparativo das principais contribuições dos trabalhos é apresentado nos próximos tópicos, de acordo com sua categoria de Prototipagem Rápida Interativa e em ordem cronológica.

3.2.1 Prototipagem Rápida Interativa de Produto

A seguir, são apresentados alguns trabalhos de Prototipagem Rápida Interativa de Produto.

Balcisoy et al. (2000) propõe um *framework* em AR para geração de protótipos virtuais interativos, controlados por um avatar virtual. O protótipo e o avatar são posicionados em um ambiente de VR, ou em um ambiente de AR. Um usuário virtual realiza ações sobre o protótipo, essas ações são pre-configuradas, o usuário da AR apenas assiste, sem participar diretamente da interação (BALCISOY et al., 2000).

O trabalho de Balcisoy et al. (2000) tem como principal contribuição ter sido o primeiro trabalho proposto na área de prototipagem rápida interativa utilizando VR e AR. Propuseram como trabalho futuro uma análise do conforto e possíveis lesões que o usuário poderia sofrer ao interagir com o produto proposto. Contudo, esse trabalho futuro proposto não é explorado nesta tese.

Em Lee e Park (2005) é proposto um sistema para auxiliar designers a testarem seus protótipos. Um objeto 3D é modelado e então é produzido seu modelo físico, através de uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*) usando como material base espuma de poliuretano. Sobre o modelo físico é colocado um marcador, o qual possibilita que o modelo 3D seja projetado sobre o modelo físico através da AR, permitindo que cor e textura sejam alterados e visualizados (LEE; PARK, 2005).

O trabalho de Lee e Park (2005) tem como principal inovação a projeção do modelo na AR sobre o modelo físico. Como trabalho futuro, foi sugerido uma melhoria no rastreamento do marcador que é utilizado pela AR aceitando marcadores parcialmente oclusos. Essas duas

funcionalidade foram implementadas no presente trabalho.

Park, Moon e Lee (2009) apresenta um sistema de prototipagem rápida para produtos portáteis utilizando modelos físicos e AR. O modelo físico é impresso em 3D, em seguida, o modelo na AR é posicionado de forma a se sobrepor ao modelo físico. É possível interagir com o modelo através de um ponteiro físico que possui um marcador que é percebido na realidade aumentada. Utilizando o ponteiro é possível realizar ações de cliques e toques no modelo 3D e o resultado das ações é apresentado na AR. Sobre a cabeça do usuário é posicionada uma webcam, a qual filma a interação física. O sistema adiciona a essa interação a AR e as exibe em um monitor.

No trabalho de Park, Moon e Lee (2009), a principal contribuição é a possibilidade de interação diretamente com o protótipo físico e na AR, contudo, é necessário utilizar um ponteiro físico. São propostos como trabalho futuro o a interação sem o ponteiro, diretamente com os dedos e o uso de dispositivos HMD para visualização. Essas duas propostas foram implementadas no presente trabalho.

No trabalho de Akaoka, Ginn e Vertegaal (2010) é apresentado um *workbench* de prototipagem rápida que utiliza interfaces funcionais projetadas sobre protótipos físicos. A projeção é realizada utilizando projetores multimídia (*datashow*), o que permite que o usuário visualize a AR sem necessidade óculos ou HMD. Os protótipos físicos são monocromáticos e são objetos reais reutilizados, como latas, globos terrestres, e caixas, os quais são pintados com uma cor sólida. A interação é realizada através de toques com os dedos, contudo, há a necessidade de colar um marcador no dedo para que ele seja reconhecido. A projeção da AR sobre o protótipo físico é realizada utilizando um projetor. O ambiente de teste possui oito câmeras que fazem a detecção dos marcadores e dois projetores que projetam a interface sobre o protótipo (AKAOKA; GINN; VERTEGAAL, 2010).

Em Porter et al. (2010), são utilizados projetores multimídia (*datashow*) para integrar a realidade aumentada à realidade existente. O objetivo é avaliar protótipos de painéis de controle de carros, o projetor projeta ele sobre uma superfície plana, e um módulo de detecção de dedos é utilizado para detectar os movimentos do usuário e permitir a interação com o protótipo. A detecção dos dedos necessita que o usuário vista um dedal laranja no dedo indicador. Um questionário é aplicado para avaliar a experiência do usuário (PORTER et al., 2010; MARNER et al., 2011).

Em Akaoka, Ginn e Vertegaal (2010) e Porter et al. (2010) a principal inovação é o uso de projetores para um sistema de prototipagem interativo. Akaoka, Ginn e Vertegaal

(2010) propõe como trabalhos futuro melhorar o rastreamento com marcadores parcialmente oclusos, melhorar a qualidade das câmeras e projetores utilizados, interação sem necessidade de marcadores nos dedos e simplificação do ambiente de configuração do *workbench* proposto (AKAOKA; GINN; VERTEGAAL, 2010). Já Porter et al. (2010) propõe como trabalho futuro uma maior rapidez no processo de interação entre o usuário e o protótipo. O presente trabalho utiliza uma configuração simples do ambiente de interação, interação com os dedos sem marcadores, e aplicação de questionários para validação do processo proposto.

Em Stöcklein et al. (2010) é apresentado o MiReAS, um *framework* interativo de prototipagem em um ambiente de realidade mista. Este *framework* possui um sistema iterativo de refinamento baseado no padrão *Model-View-Control-Environment* (MVCE). Foi realizado um estudo de caso com um dirigível aéreo para ambiente interno, este é controlado através de um controle remoto, obstáculos virtuais podem ser adicionados na cena para testar a mobilidade do dirigível (STÖCKLEIN et al., 2010).

A principal inovação no trabalho de Stöcklein et al. (2010) é o uso do padrão de projeto MVCE (*Model View Controller Environment*) (Stocklein et al., 2009) na etapa de refinamento iterativo do protótipo. É proposto como trabalho futuro uma padronização na forma de descrição dos modelos utilizados no processo de prototipagem rápida (STÖCKLEIN et al., 2010). O presente trabalho propõe um processo cíclico de prototipagem que também possui um refinamento iterativo.

O método de prototipagem rápida IRIS (ZAMPELIS et al., 2012) permite utilizar telas interativas em protótipos estáticos. O estudo de caso utilizou um protótipo estático que possui alguns botões, esses botões enviam comandos via *bluetooth* para um computador, onde a tela interativa é localizada. Um dos problemas desse sistema é que a tela fica separada do protótipo, o que pode causar uma má experiência de uso. Foi sugerido como trabalho futuro aumentar a resolução da tela utilizada (ZAMPELIS et al., 2012). Nenhum destaque do trabalho de Zampelis et al. (2012) foi explorado no trabalho proposto nessa tese.

Na Tese de doutorado de Simon (2012), é proposto o IntelliTIO (*Intelligent Tangible Input Object*), um sistema de prototipagem rápida em um ambiente de AR para painéis de controle. A interação com o usuário é realizada através objetos tangíveis (*tangible input objects*), como painéis de controle físicos, os quais possuem também uma versão na AR. A esses painéis são acoplados sensores que possibilitam a obtenção de dados do ambiente real. Os sensores se comunicam via RFID (*Radio-Frequency IDentification*) com o sistema que gerencia a interação. Foi sugerido como trabalho futuro o uso de diferentes modelos de antenas de captação do

sinal e otimizar o sistema de RFID (SIMON, 2012).

Verlinden (2014), em sua tese de doutorado, propõe uma metodologia de prototipagem em realidade aumentada, esta metodologia possui cinco etapas: modelagem, preparação, *deployment*, revisão e reflexão. Na etapa de modelagem o modelo 3D é gerado através de uma ferramenta CAD ou de um escaneamento de algum objeto já existente; na preparação são configuradas as interações pretendidas com o modelo; no *deployment* o ambiente onde o modelo 3D ficará na AR é preparado; na revisão, a experiência é testada e modificações podem ser propostas; na reflexão as interações são re-analisadas e decisões sobre o design podem ser alteradas. É realizado um estudo de caso, no qual alguns objetos, impressos em 3D, são dispostos sobre uma mesa, e a realidade aumentada é aplicada através de um projetor. O sistema, alimentado por uma câmera, localiza os objetos e projeta alguma textura sobre eles. É possível interagir com os protótipos movimentando-os diretamente sobre a mesa ou utilizando de um controlador *touch screen* (VERLINDEN, 2014).

No trabalho de Verlinden (2014), a principal inovação é o processo cíclico de prototipagem, são propostos como trabalhos futuros a integração de todas funcionalidades do experimento de prototipagem em um único dispositivo como um *tablet*, e também a produção de protótipos físicos baseados em materiais maleáveis como argila (VERLINDEN, 2014). O presente trabalho utiliza um processo cíclico e o experimento é realizado em um único dispositivo.

No trabalho de Simões et al. (2016) são gerados dois protótipos rápidos, de naturezas diferentes para um mesmo produto. O primeiro é um protótipo físico impresso em 3D e o segundo é um protótipo virtual em realidade aumentada. Esses dois protótipos são comparados e passam por um série de testes e questionários com usuários leigos e especialistas em prototipagem, onde as experiências são avaliadas e são apontadas as vantagens e desvantagens de cada protótipo para a aplicação na fase de análise do projeto de um produto (SIMÕES et al., 2016).

O principal destaque do trabalho de Simões et al. (2016) é a comparação entre protótipos físicos e em realidade aumentada para a análise de um produto. São propostos como trabalhos futuros a execução dos experimentos com um grupo de usuários que melhor representem uma amostra do mercado consumidor, a prototipação de produtos ainda não conhecidos pelos usuários e a utilização de AR sem marcadores tradicionais (fiduciais ou QR code) (SIMÕES et al., 2016). No presente trabalho, a AR é utilizada sem os marcadores tradicionais.

Arrighi e Mougenot (2019) introduzem uma ferramenta que permite aos usuários finais visualizarem o protótipo virtual do produto em 3D, e participarem do processo de design,

manipulando-o e modificando-o diretamente de forma intuitiva. A interação com o protótipo é realizada através de blocos com marcadores. Os blocos podem ser manipulados gerando um reposicionamento do objeto virtual dentro do ambiente. É realizado um estudo de caso para a decoração de um quarto, onde cada bloco é um móvel, o qual pode ser movido pela cena (ARRIGHI; MOUGENOT, 2019).

A principal inovação do artigo de Arrighi e Mougenot (2019) é a aplicação do método na área de arquitetura e design de interiores. Como trabalho futuro foi proposto fazer uma avaliação da usabilidade do experimento e seu impacto no processo de design do ambiente (ARRIGHI; MOUGENOT, 2019). A presente tese avalia a experiência do usuário através da aplicação de questionários.

O trabalho de An et al. (2017) propõe um *workflow* para prototipagem batizado de CEPVR. O processo é interativo e colaborativo, permitindo a criação de modelos 3D a partir de esboços. São testados e avaliados em um ambiente de AR, onde mais de uma pessoa pode participar da interação. Foi realizado um estudo de caso para um automóvel, no qual a direção do automóvel era projetada e testada, dois usuários interagem, o motorista e um passageiro (AN et al., 2017).

O principal destaque do artigo de An et al. (2017) é o uso de múltiplos usuários para teste do protótipo, e a possibilidade de experimentos com produtos grandes, como carros. Como trabalho futuro foi proposto o uso de pessoas para ajudar a gerenciar o experimento (AN et al., 2017). Nenhum dos destaques nem o trabalho futuro foram aplicados na presente tese.

Katakura e Watanabe (2018) propõem um processo de prototipagem rápida utilizando protótipos impressos em 3D e interativos chamado ProtoHole. A interatividade é realizada através de um sistema elétrico e acústico que é instalado dentro do objeto impresso, buracos no objeto são utilizados como botões, sendo possível detectar os buracos que o usuário apertou, através da variação da frequência sonora. O sistema foi testado utilizando alguns objetos diferentes como *joystick*, controlador de lâmpadas e um cachorro de brinquedo (KATAKURA; WATANABE, 2018), cada clique nos botões gera uma ação diferente, dependendo do objeto.

O principal diferencial do trabalho de Katakura e Watanabe (2018) é o uso de buracos como botões, e a utilização de sensores sonoros para detectar o clique. Como trabalho futuro é proposto a utilização de buracos com formatos distintos, para que o som ressoado seja diferente, facilitando a detecção de qual botão foi acionado (KATAKURA; WATANABE, 2018). Nem o diferencial nem o trabalho futuro foram aplicados na presente tese.

Morozova, Rheinstädter e Wallach (2019) propõem o MixedUX um *framework* que possibilita a combinação de modelos 3D com interfaces de interação 2D, que são telas de dispositivos

móveis. O intuito é facilitar a manipulação com o protótipo através da tela de interação. No estudo de caso demonstrado, o modelo 3D é projetado utilizando AR em um local fixo e um dispositivo móvel é posicionado sobre a projeção. As interações no celular são refletidas no modelo 3D projetado. Foi utilizado como dispositivo de visualização AR o Microsoft HoloLens e a tela de interação é um celular comum com *touchscreen* (MOROZOVA; RHEINSTÄDTER; WALLACH, 2019).

O principal destaque do artigo de Morozova, Rheinstädter e Wallach (2019) é a tela de interação, que permite uma manipulação simples do protótipo. Como trabalho futuro foi proposto interações com outras partes do protótipo e não apenas com a tela (MOROZOVA; RHEINSTÄDTER; WALLACH, 2019). Nem o destaque nem o trabalho futuro foram aplicados na presente tese.

3.2.2 Prototipagem Rápida Interativa de Design 3D

Shen, Ong e Nee (2010) propõe uma forma colaborativa de fazer design de produto em que mais de um usuário pode fazer alterações no modelo 3D do produto em um ambiente interativo de AR (SHEN; ONG; NEE, 2010).

Na área de Realidade Aumentada e Impressão 3D existem estudos com abordagens diversas. Uma proposta comum encontrada foi gerar objetos 3D virtuais modelando-os de forma interativa através de um sistema em AR. Isto é realizado interagindo com o ambiente virtual através de gestos manuais. Em seguida, os modelos podem ser enviados diretamente a uma impressora 3D (YEE; NING; LIPSON, 2009; WEICHEL et al., 2014; WEICHEL, 2016; ZHANG; KWOK, 2018; JAILUNGKA; CHAROENSEANG, 2018; PENG et al., 2018).

Outros trabalhos comparam a percepção humana de objetos na Realidade Aumentada em relação aos mesmos objetos impressos em 3D (FERNANDES; WANG; SIMONS, 2015; GIESER et al., 2016; SIMÕES et al., 2016). No artigo de Fernandes, Wang e Simons (2015), em um ambiente são dispostos objetos reais impressos em 3D e objetos virtuais através da AR. O usuário visualiza o ambiente apenas através de um monitor onde está sendo exibido o vídeo do ambiente real sobreposto com a AR, e, desta forma, objetos impressos em 3D e objetos da AR ficam em uma mesma cena. Em seguida, é aplicado um questionário sobre a percepção da natureza dos objetos encontrados na cena, inclusive indicando se foram percebidos como reais ou virtuais (FERNANDES; WANG; SIMONS, 2015).

Já em Gieser et al. (2016) é realizado o teste da Caixa de Blocos (*Box and blocks test*),

que ocorre em dois ambientes. Inicialmente em um ambiente real com os blocos impressos em 3D, e depois em um ambiente virtual, onde a interação com os blocos é realizada através de um dispositivo de controle manual, o Leap Motion (MOTION, 2015). Em seguida, as duas formas de execução do teste são avaliadas e comparadas através de questionários aplicados aos usuários (GIESER et al., 2016).

Na dissertação de mestrado de Hughes-Ward (2016) são apresentados diversos cenários onde a AR é utilizada para explicar algum objeto ou trecho de livro. Para isto, um modelo 3D, em AR, é utilizado para descrever alguma coisa, melhorando a imersão da experiência do usuário. Protótipos de modelos 3D também pode ser gerados automaticamente a partir das imagens do livros, fazendo que essas imagens saltem dos livros em 3D (HUGHES-WARD, 2016).

No trabalho de Nebeling e Madier (2019) é proposto uma ferramenta de prototipagem de modelos 3D a partir de desenhos feitos em papel, chamada de 360proto. Esta é composta por 3 elementos: a câmera que captura as imagens, um estúdio que automaticamente gera os modelos 3D e o aplicativo que exibe o modelo 3D gerado (NEBELING; MADIER, 2019) .

3.2.3 Prototipagem Rápida Interativa de *Software*

Kim e Dey (2010) apresentam um *framework* genérico para prototipagem interativa de aplicativos voltados para AR. O *framework* possui 4 elementos essenciais: marcadores a serem rastreados, conteúdo AR a ser exibido, módulo de rastreamento dos marcadores, e um sistema de exibição. O *framework* foi validado através de 3 estudos de caso, em cada um deles uma aplicação protótipo foi gerada (KIM; DEY, 2010).

Em Park (2011) é realizada uma pesquisa sobre os *framework* e *toolkits* existentes atualmente, e é proposto novo *framework* para desenvolvimento de aplicações em AR, batizado como *AR-Room*, composto por quatro componentes principais: Manipulador de Interação, Rastreador, Gerenciador de Cenários, Renderizador. O Manipulador de Interação gerencia a câmera e os dispositivos de entrada; o Rastreador localiza o marcador dos gestos manuais e movimentos; o Gerenciador de Cenários controla o comportamento dos objetos na AR; e o Renderizador é responsável pela exibição da AR. Seu uso é bem genérico, e é considerada uma ferramenta de prototipagem rápida de aplicações AR (PARK, 2011).

No trabalho de Sá e Churchill (2012) são propostas 3 técnicas de prototipagem de *software* para aplicativos de dispositivos móveis. A primeira é um protótipo de baixa fidelidade, implementado a partir de um esboço (*mockup*), o segundo é um protótipo de fidelidade mista,

que utiliza vídeo para demonstração do *software* e a terceira é um protótipo de alta fidelidade, utilizando um dispositivo móvel interativo. Foram realizados experimentos com pessoas e o terceiro protótipo foi o que apresentou maior aceitação (Sá; CHURCHILL, 2012).

3.2.4 Discussão

Foram analisadas características positivas e negativas das diversas pesquisas descritas. O trabalho proposto tenta suprir lacunas encontradas, implementando destaques e trabalhos futuros de alguns estudos. Os principais pontos que precisam ser melhorados ou adicionados são listados a seguir e devem ser incorporados ao método proposto na presente tese.

- Projeção do modelo do protótipo na AR sobre o modelo físico (LEE; PARK, 2005).
- Rastreamento de marcadores parcialmente oclusos (LEE; PARK, 2005; AKAOKA; GINN; VERTEGAAL, 2010).
- Interação do usuário do sistema com o protótipo (PARK; MOON; LEE, 2009).
- Visualização da interação através de dispositivos HMD (PARK; MOON; LEE, 2009).
- Interação com o protótipo utilizando os dedos, sem necessidade de um ponteiro ou marcador (PARK; MOON; LEE, 2009; AKAOKA; GINN; VERTEGAAL, 2010).
- Aplicação de questionários para validação do processo proposto e da experiência do usuário (PORTER et al., 2010; ARRIGHI; MOUGENOT, 2019).
- Ambientes de teste com configuração simples (AKAOKA; GINN; VERTEGAAL, 2010).
- Esquema de padronização dos testes para modelos diferentes (STÖCKLEIN et al., 2010).
- Processo cíclico de prototipagem (VERLINDEN, 2014).
- Experimento de prototipagem em um único dispositivo (VERLINDEN, 2014).
- Rastreamento AR sem os marcadores tradicionais (SIMÕES et al., 2016).

Esses pontos mostram que a área de pesquisa em prototipagem rápida interativa ainda possui muitos problemas a serem resolvidos. O presente trabalho propõe-se a suprir grande

parte dessas lacunas. Todos esses pontos destacados do mapeamento sistemático foram implementados na presente tese, visando o desenvolvimento de um processo de prototipagem completo e robusto.

4 METODOLOGIA

A investigação realizada sobre os métodos de prototipagem rápida proporcionou uma compreensão desta área e de seus processos. Procedimentos que eram poucos explorados foram localizados, e possíveis melhorias foram detectadas. Desta forma, foi proposto um novo processo cíclico de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa. O processo foi implementado através de um sistema, o qual permite que diversos produtos sejam configurados e prototipados.

Dois estudos de caso foram desenvolvidos para validar o processo e o sistema, visando demonstrar a viabilidade teórica e prática. Os estudos de caso foram aplicados um grupo de usuários distintos, os quais experimentaram o processo através do sistema desenvolvido, e, em seguida, responderam ao questionário de experiência do usuário UEQ para avaliarem a experiência de utilização do sistema.

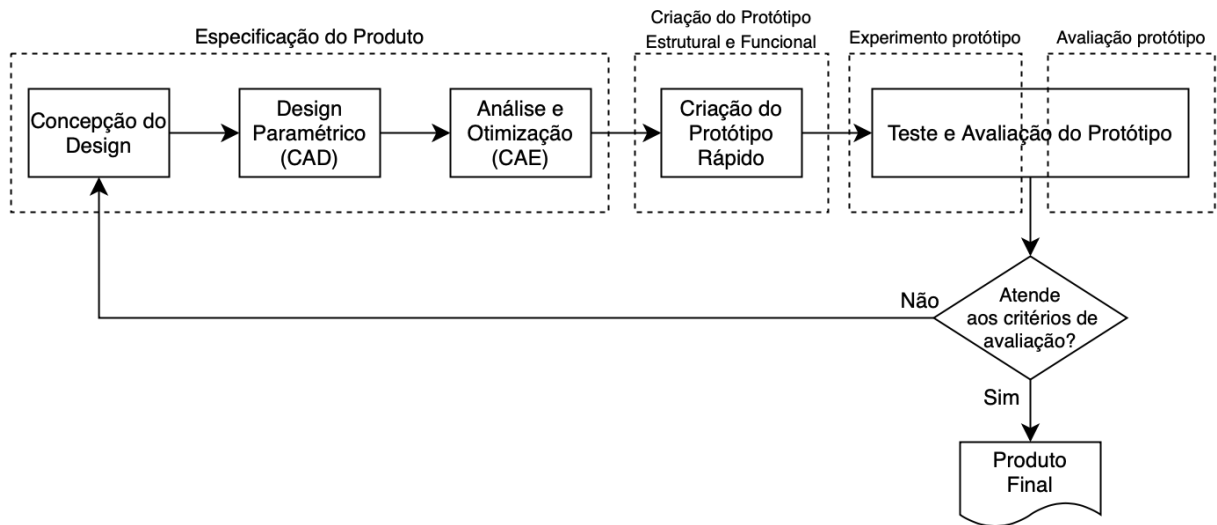
Neste capítulo são apresentados o processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa proposto, a implementação de seu sistema, o estudo de caso e sua forma de avaliação.

4.1 PROCESSO CÍCLICO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA INTERATIVA - CYPIRP

O presente trabalho propõe um processo cíclico para desenvolvimento rápido de protótipos estruturais e funcionais e interativos combinando Realidade Aumentada e Impressão 3D. Este processo foi batizado como CYPIRP (*Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping*). O protótipo é estrutural pois possui um modelo físico e é funcional, visto que, possui suas funcionalidades implementadas na AR. O protótipo é considerado interativo, uma vez que é possível que um usuário realize ações no protótipo que geram reações referentes às suas funcionalidades. Desta forma, um usuário pode interagir com o protótipo explorando suas funcionalidades de maneira mais próxima a natural.

O processo proposto é baseado no ciclo de desenvolvimento de um produto proposto por Noorani (2006), contudo, algumas etapas foram agrupadas, outras particionadas, algumas modificadas. A Figura 24 apresenta o processo proposto por Noorani, representado pelas linhas contínuas. Também é indicado a equivalência entre o processo de Noorani e o processo proposto no presente trabalho, representado pelas linhas pontilhadas. As três primeiras etapas de

Figura 24 – Ciclo de desenvolvimento de produto



Fonte: Adaptado de (NOORANI, 2006).

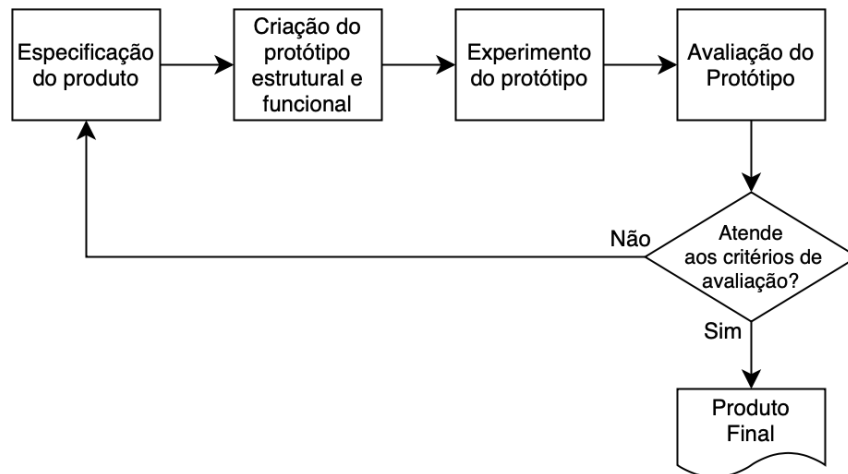
Noorani, Concepção do Design, Design Paramétrico e Análise e Otimização, foram agrupadas na etapa Especificação do Produto do CYPIRP. A etapa de Criação do Protótipo Rápido de Noorani foi modificada para Criação do Protótipo Estrutural e Funcional e engloba a criação do protótipo funcional, além da produção do protótipo físico. A etapa Teste e Avaliação do Protótipo foi segmentada em duas etapas, a de Experimento do protótipo e a de Avaliação do Protótipo.

Dada essas equivalências, o processo proposto é apresentado na Figura 25, ele é constituído por quatro etapas, e cada uma delas é composta por diversos módulos. De maneira geral, o processo cíclico proposto é uma extensão do ciclo de desenvolvimento de produto de Noorani. O CYPIRP simplifica as 3 etapas iniciais (Concepção do Design, Design Paramétrico e Análise e Otimização) de Noorani e detalha a etapa de Teste e Avaliação do protótipo.

A etapa inicial é a de Especificação do Produto onde o produto é concebido e especificado; é gerado como saída o modelo 3D do produto. A etapa de Criação do Protótipo Funcional e Estrutural, recebe, como entrada, o modelo 3D do produto, e então as funcionalidades que serão testadas no protótipo são definidas e é gerado um protótipo virtual funcional, e também é produzido o protótipo físico. Em seguida, tem-se a etapa de Experimento do Protótipo, onde o protótipo estrutural e funcional é testado através de sistema que permite a interação com o protótipo. Por fim, passa-se para a etapa de Avaliação do Protótipo, onde o protótipo é avaliado e podem ser propostos ajustes e alterações ao protótipo. Esse processo é cíclico e deve-se repetir enquanto a pergunta: “Atende aos critérios de avaliação?” for negativa, quando positiva, o protótipo está pronto para seguir para linha de montagem e o produto final pode

ser produzido.

Figura 25 – Processo cíclico proposto CYPIRP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

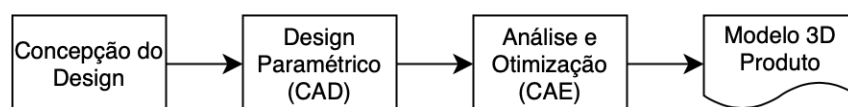
Processos cíclicos de prototipagem já foram utilizados de forma similar em trabalhos como os de Stöcklein et al. (2010), Marner et al. (2011) e Verlinden (2014), portanto não traz inovação de forma isolada, contudo, a inovação proposta neste trabalho está nas etapas de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional, Experimentação do Protótipo, e no processo como um todo do CYPIRP.

As etapas do CYPIRP, e seus módulos internos, são detalhados a seguir.

4.1.1 Especificação do Produto

A etapa de Especificação do Produto é composta pelas três primeiras etapas do ciclo de desenvolvimento do produto proposto por Noorani (2006): Concepção do Design, Design Paramétrico e Análise e Otimização. Ao final dessas etapas é gerado o modelo 3D do produto o qual será utilizados pelas próximas etapas do CYPIRP. A Figura 26 apresenta o fluxograma desta etapa.

Figura 26 – Etapa de Especificação do Produto do CYPIRP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

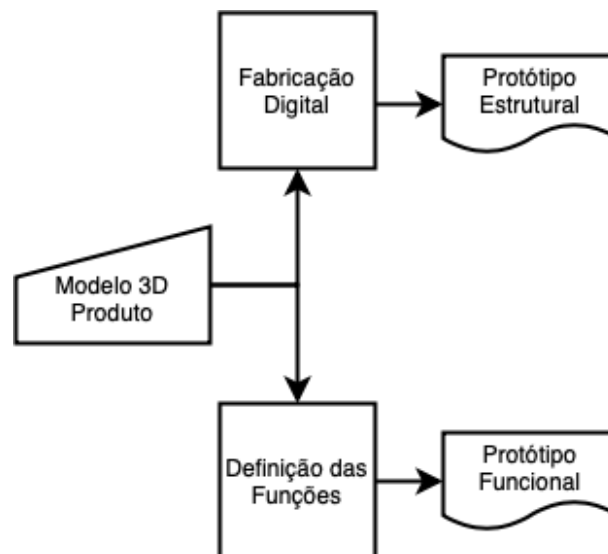
Na etapa de Concepção do Design configurações gerais do produto a ser desenvolvido são definidas. Na etapa de Design Paramétrico, o design do produto é especificado e definido,

geralmente utilizando um Programa de Auxílio ao Design (CAD - *Computer Aided Design*). A terceira etapa é a de Análise e Otimização, onde o design é analisado e caso possível, otimizado, geralmente utilizando um Programa de auxílio a Engenharia (CAE - *Computer Aided Engineering*). Essas três etapas não sofreram alterações quando comparadas com a proposta de Noorani (2006), e devem seguir o processos específicos de cada indústria.

4.1.2 Criação do Protótipo Estrutural e Funcional

A etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional, deve gerar um protótipo estrutural e funcional para ser utilizado na etapa de Experimento do Protótipo. A Figura 27 apresenta o fluxograma dessa etapa, ela recebe como entrada o Modelo 3D do Produto, gerado na etapa de Especificação do Produto, o qual é utilizado nos dois módulos principais, o primeiro é a Fabricação Digital e o segundo módulo é a Definição das Funções.

Figura 27 – Etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional do CYPIRP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Fabricação Digital, o modelo 3D é enviado para algum equipamento de FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA para a geração de um protótipo estrutural do modelo 3D, neste trabalho foi utilizada uma impressora 3D. Após a impressão do modelo, o que geralmente leva várias horas, o protótipo estrutural impresso está pronto para ser utilizado pelo sistema. O protótipo estrutural produzido nesse módulo é uma das saídas dessa etapa.

No módulo de Definição das Funções toda a experiência com o usuário (UX - *User Experience*) deve ser planejada. É definido quais as funcionalidades do produto serão testadas,

e são configuradas as ações e reações que podem ser realizadas sobre o protótipo interativo. Cada função do protótipo deve ser dividida em pares de ações e reações que podem acontecer no protótipo, e cada ação e reação deve ser associada a uma região espacial no modelo 3D. Desta forma, cada região do modelo 3D que será passível de alguma interação deve ser definida juntamente com a ação e reação esperada. Ação a ser realizada pode ser um clique ou um toque com movimento sobre o objeto. Já o objeto pode reagir às ações com as seguintes reações:

- Animações e Movimentos;
- Alteração de cor ou Iluminação;
- Reprodução de som;

Essas ações e reações devem ser configuradas gerando um protótipo funcional, o qual poderá ser utilizado com a Realidade Aumentada. Neste trabalho, o protótipo foi configurado utilizando a ferramenta de desenvolvimento *Unity Engine* (UNITY, 2022). O procedimento para a produção desse protótipo varia de acordo com as funcionalidades envolvidas e será apresentado junto a cada estudo de caso desenvolvido.

Após a geração do Protótipo Estrutural e do Protótipo Funcional, estes são utilizados e combinados em um protótipo único Estrutural e Funcional na etapa de Experimento do Protótipo.

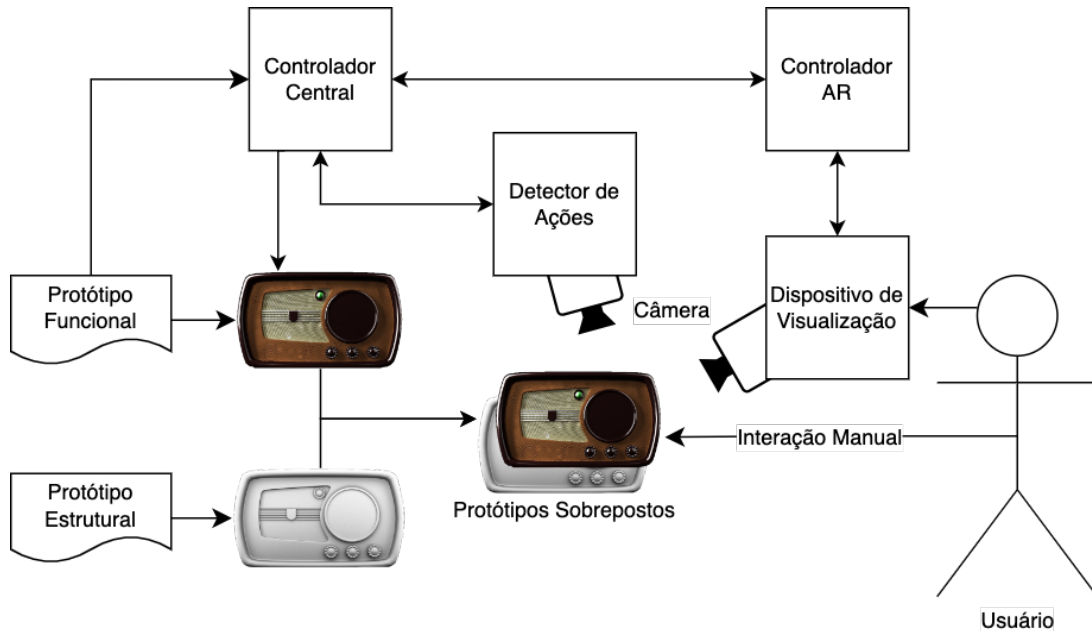
4.1.3 Experimento do Protótipo

A etapa de Experimento do Protótipo é responsável por realizar o experimento de uso do protótipo estrutural e funcional. O usuário a realizar o experimento pode ser da própria equipe de desenvolvimento de produto ou algum usuário externo. Esta etapa recebe como entrada as saídas da etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional, isto é, o protótipo estrutural e o protótipo funcional. Estes serão combinados de forma a gerar um protótipo único estrutural e funcional.

Para a execução do experimento é proposta uma arquitetura para um sistema de Experimento do Protótipo Interativo, a qual é apresentada na Figura 28, e utiliza um rádio portátil como exemplo de protótipo a ser fabricado e avaliado.

O Protótipo Funcional com suas ações e reações é enviado ao módulo Controlador Central. Este módulo gerencia o Controlador AR e o Detector de Ações. Fazendo a interpretação das ações e a geração dos comandos que devem ser executados pelo Controlador AR.

Figura 28 – Arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo do CYPIRP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O módulo Controlador AR é responsável por gerar e controlar a informação em Realidade Aumentada e exibi-la em um dispositivo de visualização. O cerne desse módulo é uma biblioteca ou *engine* de AR, nesta tese foi utilizada a biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020). O presente módulo recebe o modelo 3D do protótipo funcional, e o projeta, renderizado, sobre um marcador AR localizado no Protótipo Estrutural. Desta maneira, o Protótipo Funcional e o Protótipo Estrutural ficam conectados e sobrepostos com as mesmas configurações de rotação e escala. Este processo é possível, visto que o Dispositivo de Visualização possui uma câmera de vídeo, a qual rastreia o marcador e detecta sua posição no vídeo.

O Dispositivo de Visualização possui três componentes básicos, uma tela de visualização, um sistema de som e uma câmera de vídeo. A Visualização pode ser tanto através de um dispositivo visão óptica direta (*Optical see-through*) quanto através de um dispositivo de visão direta por vídeo (*Video see-through*), permitindo ao usuário visualizar a AR no ambiente real. O sistema de som permite ouvir sons resultantes da interação com o protótipo. A câmera de vídeo é utilizada para capturar o ambiente real, e permite que o Controlador AR rastreie o ponto de interesse. No presente trabalho está sendo utilizado um dispositivo de visão direta por vídeo, que é um aparelho celular, o qual possui um sistema de som e uma câmera de vídeo

integradas.

Essa configuração do experimento permite que o usuário, ao segurar o Protótipo Estrutural Impresso (monocromático), visualize o protótipo renderizado em cores, e manipule-o de forma básica, através das operações de rotação e escala, aproximando-o ou afastando-o.

Para possibilitar que as funcionalidades do protótipo sejam ativadas de forma interativa, a câmera do Detector de Ações filma a interação do usuário com o Protótipo Estrutural. O vídeo capturado é processado, em tempo real, no módulo Detector de Ações, o qual reconhece os movimentos realizados pela mão do usuário sobre o objeto impresso (protótipo estrutural) de forma a reconhecer toques e cliques. Essas ações são passadas para o módulo Controlador Central que as converte para as reações correspondentes a serem aplicadas no Protótipo Funcional, de acordo com as possibilidades que o protótipo pode executar. Uma vez identificadas, as reações são executadas pelo Controlador AR, no Protótipo Funcional, e o usuário as perceberá através da Realidade Aumentada.

As mais diversas ações podem ser executadas, por exemplo, caso seja realizada uma ação de ligar o rádio, uma luz verde será acesa no Protótipo Funcional do rádio e um som de alguma radiodifusora irá começar a tocar.

A arquitetura apresentada permite que os quatro módulos presentes nesta etapa sejam integrados em um único dispositivo, com uma única câmera, ou configurados em dispositivos separados utilizando 1 ou 2 câmeras independentes. No presente trabalho eles estão integrados em um único dispositivo.

4.1.3.1 Módulo detector de Ações

O módulo detector de ações é responsável por identificar os movimentos realizados pelas mãos do usuário, e convertê-los em cliques ou toques a serem realizados no protótipo. Desta forma, é possível interagir com o protótipo diretamente com as mãos, não sendo necessário utilizar luvas ou marcadores nas mãos ou dedos.

Este módulo pode ser implementado usando algum algoritmo específico para o reconhecimento de mãos e gestos (SHEN; ONG; NEE, 2011) ou utilizando alguma ferramenta disponível nas plataformas de desenvolvimento. Neste trabalho foi utilizado a ferramenta botão virtual da Vuforia (VUFORIA, 2020).

O botão virtual da Vuforia (VUFORIA, 2020) é aplicado sobre uma região do marcador da AR, e funciona através da detecção da oclusão dessa região por um dedo ou outro objeto

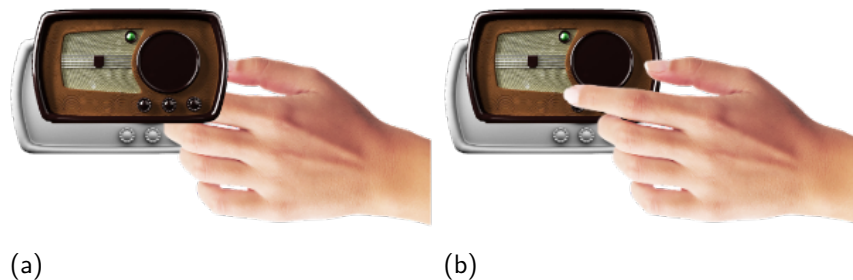
que esteja a interagir com o marcador. Este processo tem algumas limitações, se o marcador for muito simples, ou se o objeto de interação for pequeno. Desta forma, é recomendado que o marcador possua elementos suficientes que possam ser detectados quando ocultos e um objeto de interação que tenha um tamanho suficiente para gerar a oclusão desses elementos. Nas experiências realizadas neste trabalho, o botão virtual teve um desempenho satisfatório.

Com o uso do botão virtual da Vuforia (VUFORIA, 2020), foi considerado que a ação de toque, do usuário no protótipo estrutural, pode ser um toque normal, ou apenas uma oclusão da região do botão, sem necessidade de realmente encostar no protótipo.

As ações detectadas nos botões virtuais são enviados ao módulo Controlador Central, o qual converte essas ações em reações que são executadas no Protótipo Funcional.

No decorrer do desenvolvimento do presente módulo, foi detectado um comportamento não desejado durante a interação das mãos do usuário com o protótipo. No processo de sobreposição do protótipo funcional ao estrutural, a mão do usuário também ficava sobreposta pelo protótipo funcional, visto que, a oclusão da informação virtual não estava acontecendo. A Figura 29.(a) apresenta um exemplo desse comportamento.

Figura 29 – Interação da mão do usuário com os protótipos: Comportamento inicial, onde a mão é sobreposta pelo protótipo funcional (a) e Comportamento final, onde a região de pele é detectada e sobreposta ao protótipo funcional (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

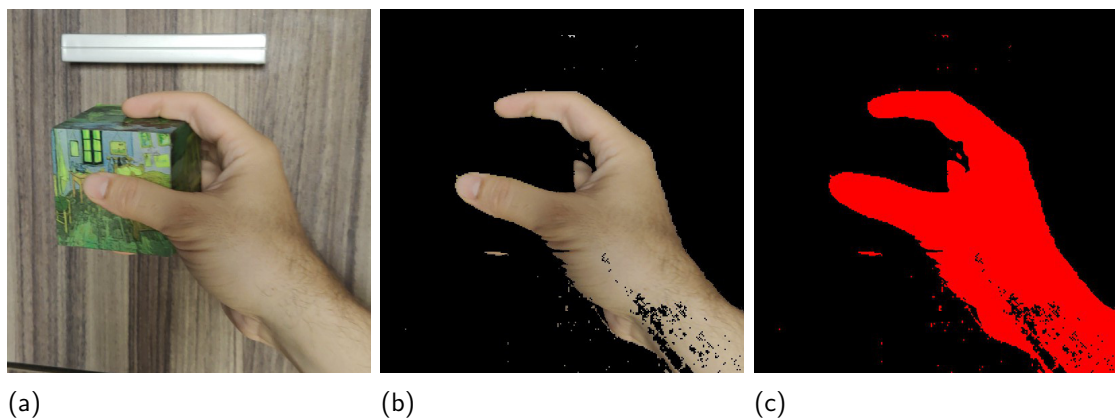
Para corrigir esse comportamento foi implementado um algoritmo de detecção de pele, que segmenta, localiza e sobrepõe a mão do usuário ao protótipo funcional, atingindo o comportamento esperado, que é de parte do protótipo virtual ficar ocluído pela mão do usuário. Esse comportamento é indicado na Figura 29.(b).

Para a segmentação da mão do usuário do *background* da cena, é utilizado um algoritmo de detecção de tom de pele. Um dos requisitos para a escolha do algoritmo é que ele tivesse baixo custo computacional para não impactar no desempenho do sistema de AR. Por tanto, foi escolhido um algoritmo baseado em pixels isolados e limiar, pois segundo Naji, Jalab e Kareem (2019) esta é a forma com menor custo computacional para detecção de pele. Seguindo

esses critérios foram analisados os trabalhos de Kovac, Peer e Solina (2003) e de Gupta e Chaudhary (2016), ambos considerados com relevantes pelo *survey* de Naji, Jalab e Kareem (2019). Kovac, Peer e Solina (2003) faz o reconhecimento de pele utilizando intervalos de cores no sistema RGB, Gupta e Chaudhary (2016) utiliza exatamente o mesmo limiar RGB utilizado por Gupta e Solina, mas também adiciona filtros nos sistemas de cores *Hue, Saturation, Value* (HSV) e YCbCr. Essas duas técnicas obtiveram resultados similares, e foi escolhida a técnica de Kovac, Peer e Solina (2003) para ser utilizada no sistema final de segmentação por ser a de menor custo computacional, sendo possível sua aplicação em tempo real em dispositivos móveis (KOVAC; PEER; SOLINA, 2003; VEZHNEVETS; SAZONOV; ANDREEVA, 2003).

A Figura 30 apresenta um exemplo do processo de segmentação através da detecção de pele. Na Figura 30.(a) temos a imagem sem segmentação onde a mão do usuário interage com um cubo, na Figura 30.(b) a região de pele é identificada, na Figura 30.(c) temos a região de pele segmentada.

Figura 30 – Processo de Segmentação: Imagem Original (a), Imagem com região de pele identificada (b) e Imagem segmentada (c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a segmentação da região de pele, os pixels desta região são pintados novamente na tela de visualização que apresenta os protótipos, de forma que, esses pixels fiquem sobrepostos ao protótipo funcional e posicionados exatamente na mesma posição em que estavam na mão do usuário. Desta forma consegue-se atingir o resultado indicado na Figura 29.(b).

4.1.4 Avaliação do Protótipo

A última etapa do CYPIRP é a Avaliação do Protótipo. O usuário que realizou o experimento com o Protótipo Estrutural e Funcional deve reportar as falhas ou necessidades

percebidas durante a utilização do protótipo. Estas informações devem ser passadas e analisadas pela a equipe de desenvolvimento do protótipo para que um refinamento possa ser realizado com as sugestões geradas pelo usuário, as quais podem ser aceitas ou não, caso seja necessário o protótipo será adaptado gerando um novo protótipo e todas as etapas são novamente realizadas.

Essa etapa faz parte da macro etapa de Teste e Avaliação do Protótipo de Noorani (2006), e a parte da Avaliação segue sem alterações quando comparada a proposta de Noorani (2006), e deve seguir processos específicos de cada indústria.

Após esta etapa deve-se responder a pergunta: “Atende aos critérios de avaliação?”. Caso não atenda, o protótipo deve ser ajustado e as etapas devem ser executadas novamente. Caso atenda, o protótipo está pronto para seguir para linha de montagem e o produto final pode ser produzido.

4.2 AVALIAÇÃO DO PROCESSO CYPIRP

Avaliar um processo por completo é uma tarefa complexa, uma vez que o processo pode variar de acordo com o contexto ou pessoa que o avalia, isso porque: precisa atender necessidades e expectativas do cliente; possui uma mensuração subjetiva, por depender de critérios não quantificáveis como criatividade e comodidade; apresenta uma dificuldade na obtenção de métricas precisas para cada critério avaliado; além disso, sofre influência de fatores externos, como mudanças de mercado ou tecnológicas, que podem afetar a avaliação (COOPER, 2011; BROWN, 2020).

Uma forma indireta de realizar a avaliação do processo é através de estudos de caso aplicados a usuários, os quais experimentam o sistema e o avaliam. Desta forma, neste trabalho, foi feita uma avaliação do produto, através de estudos de caso, e não do processo como um todo.

A experiência do usuário (UX - *User Experience*) é a combinação entre o que ele sente, percebe, pensa e como ele reage fisicamente e mentalmente antes e durante o uso de um determinado produto ou serviço (PUNCHOOJIT; HONGWARITTORN, 2017). Entender as necessidades e expectativas do usuário é essencial para o design de um produto ser bem sucedido. Uma maneira comum de analisar a experiência do usuário é através de questionários, no entanto é importante reconhecer que os participantes nem sempre são objetivos.

4.2.1 Definição do questionário

Mantova et al. (2016) fazem um estudo sobre as várias métricas para aplicação de questionários para os mais diversos propósitos. Dentre as métricas apresentadas as que mais se enquadram ao carácter da pesquisa em questão são o Medidor da Usabilidade Software (*Software Usability Measurement Inventory* (SUMI)) (KIRAKOWSKI; CORBETT, 1993) e o AttrakDiff. O SUMI é recomendado para qualquer organização que deseje medir a qualidade percebida de uso de software e o AttrakDiff (HASSENZAHL; BURMESTER; KOLLER, 2003) é recomendado medir a atratividade de um produto interativo através de pares de adjetivos opostos (MANTOVA et al., 2016).

Sauro e Lewis (2016), na mesma direção que os primeiros autores investigados, apresentam possíveis opções para aplicação de questionários padronizados, afirmando que estes possuem a finalidade de avaliar a satisfação dos participantes com a usabilidade percebida de produtos ou sistemas durante ou imediatamente após o teste de usabilidade. Nas palavras dos autores, um questionário padronizado deve ser projetado para uso repetido, normalmente com um conjunto específico de perguntas apresentadas em uma ordem especificada usando um formato previamente definido, com regras específicas para produzir métricas com base nas respostas dos entrevistados (SAURO; LEWIS, 2016).

Alinhados com Mantova et al. (2016), Sauro e Lewis (2016) também consideram o SUMI, anteriormente citado, como um dos questionários de usabilidade padronizados mais utilizados para avaliação da percepção de usabilidade ao final de um estudo (após a conclusão de um conjunto de cenários de teste). Dentre outros citados para tal propósito, os autores apresentam o Questionário de usabilidade do sistema pós-estudo (*Post-study System Usability Questionnaire* (PSSUQ)) (LEWIS, 2002) como opção revisada e atualização em relação ao primeiro, bem como a Escala de usabilidade de software – *Software Usability Scale*, SUS – (BROOKE, 1996), este último, recomendado pelos autores para aplicação em caso de pós-estudo.

Após análise dos modelos de questionários propostos por Sauro e Lewis (2016) e Mantova et al. (2016), consideramos para a escolha do modelo a ser aplicado na presente pesquisa os seguintes parâmetros: aplicabilidade, facilidade de interpretação por parte dos usuários e qualidade das informações geradas a partir das respostas.

Diante desta necessidade, analisamos o então mais recente questionário de experiência do usuário (*User Experience Questionnaire* - UEQ) desenvolvido por Laugwitz, Held e Schrepp (2008) para uma empresa de softwares alemã baseando-se em um modelo teórico de

Experiência do Usuário descrito por Marc Hassenzahl (HASSENZAHL; BURMESTER; KOLLER, 2003).

O UEQ se destina à avaliar a percepção do usuário à luz da distinção entre “qualidade ergonômica percebida e a qualidade hedônica percebida” (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008) do produto. Para este caso, qualidade ergonômica e qualidade hedônica expressam dois aspectos diferentes da qualidade do produto de software, a primeira diz respeito aos aspectos relacionados com o cumprimento de tarefas e objetivos com eficiência e eficácia, enquanto a segunda tem foco na qualidade estética da interface (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008).

Segundo Hassenzahl (HASSENZAHL; BURMESTER; KOLLER, 2003), a qualidade ergonômica está relacionada com a usabilidade do produto, a qual aborda a necessidade humana de estar em segurança e no controle da situação. A qualidade hedônica refere-se a dimensões qualitativas e aborda, desta forma, a necessidade humana de mudança ou de novidade e de poder social, a qual se apresenta na forma do design visual, uma interface inovadora ou novas funcionalidades (HASSENZAHL; BURMESTER; KOLLER, 2003).

Ainda que o *Software Usability Scale* (SUS) (BROOKE, 1996) tenha sido recomendado por sua popularidade, eficiência e rapidez na obtenção de respostas e o Questionário de usabilidade do sistema pós-estudo (PSSUQ) (LEWIS, 2002), em sua terceira versão (2002), com dezesseis itens, também tenha se mostrado eficaz ao objetivo proposto no presente estudo, optou-se aqui pelo uso do UEQ. Este último foi eleito para aplicação no trabalho aqui apresentado por ser considerado mais atual, intuitivo e contempla aspectos necessários à avaliação do modelo proposto a partir de questões referentes à eficácia e eficiência do software e qualidade estética da interface, características ergonômicas e hedônicas, respectivamente como defende o autor supracitado. Como recomendado por (RAUSCHENBERGER et al., 2013), aplicou-se o UEQ em uma amostra não probabilística de 30 usuários para a obtenção de uma impressão válida diante da diversidade de pessoas investigadas e amplitude de possíveis respostas.

A hipótese a ser verificada é se o processo de prototipagem rápida interativa proposto neste trabalho auxilia no processo de compreensão do produto em parâmetros subjetivos e informações que existem para além do modelo físico, facilitando, desta forma, a interpretação de dados para a produção. O questionário tem por objetivo verificar o nível de satisfação do usuário e as relações estabelecidas entre este com o sistema de prototipagem interativa.

Um exemplar do questionário aplicado está disponível no Anexo I deste documento em duas versões, uma em Português e a original em Inglês. O questionário aplicado foi a versão em Português.

4.2.2 Estrutura do Experimento de Avaliação

Nesta sessão são apresentados a forma do recrutamento dos participantes, os aspectos éticos e os procedimentos de aplicação do experimento.

O experimento foi autorizado pelo Conselho de Ética em Pesquisa da UFPE e todos os voluntários assinaram o Termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE). O projeto está cadastrado na Plataforma Brasil com o título: "Prototipagem rápida interativa combinando Impressão 3D e Realidade Aumentada", e código de identificação do Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE) : 52200121.5.0000.5208.

4.2.2.1 Recrutamento dos Participantes

O experimento foi realizado no Centro de Informática – UFPE, em seguida, foi aplicado o questionário no mesmo local.

O recrutamento dos voluntários foi realizado através de chamadas públicas nas listas de e-mails do Centro de Informática (CIn) e do Centro de Artes e Comunicação (CAC) da UFPE, os interessados que responderem à chamada tiveram o experimento agendado. Voluntários também foram recrutados diretamente entre os transeuntes do Centro de Informática, os quais era abordados, e convidados a participarem do experimento.

As características necessárias aos participantes para serem incluídos ou excluídos da pesquisa são descritas a seguir.

Critério de inclusão – A população alvo será de alunos, servidores e professores do Centro de Informática (CIn) e do Centro de Artes e Comunicação (CAC) da UFPE, com idade entre 18 e 65 anos.

Crítérios de exclusão – Serão excluídos a população que não saiba manipular de forma básica um smartphone e com idade superior a 65 anos.

4.2.2.2 Aspectos Éticos

A realização do experimento do CYPIRP obedecerá aos preceitos éticos da Resolução 466/12 ou 510/16 do Conselho Nacional de Saúde.

1. Riscos:

O usuário, para experimentar o sistema de prototipagem rápida proposto neste projeto, necessita utilizar um óculos de realidade aumentada, o qual possui uma tela na qual será projetada a Realidade Aumentada e o ambiente real no qual o usuário está. Desta forma haverá os seguintes riscos:

- O uso da tela de realidade aumenta próximo aos olhos pode causar tontura em algumas usuários.
- Se o sistema, devido a algum travamento, indevidamente desligar a tela, o usuário pode ficar sem ver o ambiente real, e sofrer algum acidente como tropeçar, cair, ou bater em algum obstáculo.
- Existe o risco da contaminação por doenças infectocontagiosa, como a Sars-Cov-2, devido ao compartilhamento do material do experimento, o qual será reutilizado por mais de um participante; e também devido à aproximação física entre o aplicador do experimento e os participantes.

Esses riscos serão minimizados devido ao baixo tempo de duração do experimento, estimado em aproximadamente cinco minutos. Os participantes serão instruídos a não proceder com o experimento caso sintam alguma tontura, ou desconforto visual. Eles também são instruídos a remover o óculos de realidade aumentada caso a tela desligue e fique preta.

Em relação ao risco da contaminação por doenças infectocontagiosa, como a Sars-Cov-2, este será minimizado através do uso de máscaras de proteção individual e da higienização das mãos dos participantes e do material utilizado antes da execução de cada experimento. A higienização será realizada através aplicação álcool etílico à 70%.

2. Benefícios:

Os participantes de forma direta terão como benefício:

- O aprendizado de novo processo de prototipagem rápida, utilizando ferramentas inovadoras como a impressão 3D e a Realidade Aumentada.

A indústria que utilizar o sistema de prototipagem rápida proposto neste projeto terá como benefícios:

- Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo.

- Ambiente de teste com configuração simples.
- O ciclo de desenvolvimento de um produto acontece de forma mais rápida.
- Menos erros de projeto chegam ao produto final.
- Devido ao baixo custo do protótipo, mais de um protótipo pode ser produzido permitindo que testadores em diferentes regiões geográficas experimentem o protótipo, possibilitando inclusive que pessoas em *Home Office* experimentem o protótipo.

3. Armazenamento dos dados coletados:

Os pesquisadores declaram que os dados coletados, que são as respostas do questionário UEQ desta pesquisa ficarão armazenados em formato digital (escanados) em um computador pessoal e em um servidor na nuvem, sob a responsabilidade do pesquisador Derzu Omaia, no endereço Rua José Augusto Trindade, 299, ap. 501, João Pessoa - PB, pelo período de mínimo 5 anos.

4.2.2.3 Aplicação do Experimento

Para a realização do experimento são utilizados um óculos de realidade virtual, um smartphone e um protótipo físico impresso em 3D do estudo de caso em questão.

Para a coleta de dados serão utilizados questionários impressos em papel, respondidos com caneta após a execução do experimento.

Serão realizados os seguintes procedimentos:

- Higienizar as mãos do usuário.
- Explicação ao usuário com as instruções de como realizar o experimento;
- Equipar o óculos de realidade virtual no rosto, e posicionar o protótipo físico nas mãos.
- Execução do experimento, através da manipulação do protótipo físico e visualização na Realidade Aumentada do protótipo funcional.
- Aplicação do questionário UEQ após o experimento.

As instruções de como realizar o experimento variam de acordo com o estudo de caso.

4.2.3 Análise e Interpretação do Experimento

O experimento foi realizado com uma amostra não probabilística de 30 pessoas. Esse tamanho da amostra é o valor recomendado em Rauschenberger et al. (2013) e Schrepp, Hinderks e Thomaschewski (2017). A distribuição da média se aproxima da distribuição normal a partir de amostras de tamanho 30, obtendo um resultado estatisticamente confiável (SAURO; LEWIS, 2016).

O resultado obtido foi analisado através de gráficos e tabelas. Inicialmente as vinte e seis propriedades do UEQ foram divididas em dois grupos, o grupo onde o resultado ótimo é o valor 1 e o grupo onde o resultado ótimo é o valor 7, cada um desses grupos ficou com treze propriedades. Após essa divisão são gerados dois gráficos para cada grupo.

O primeiro gráfico utilizado é o Diagrama de Caixas (*boxplot*), este exibe o valor mínimo, máximo, o primeiro quartil, o terceiro quartil e a mediana (segundo quartil) (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). Este gráfico foi gerado com base nas treze propriedades de cada grupo, analisando os sete possíveis valores que podem ocorrer. Desta forma, ficará visível as propriedades que receberam uma melhor pontuação e as que receberam uma pior pontuação.

O segundo gráfico é o do histograma, este exibe a frequência de ocorrência com que cada possível valor de pontuação ocorreu (MONTGOMERY; RUNGER, 2021). Desta forma, é exibido a quantidade de vezes que cada pontuação (de 1 a 7) ocorreu em cada grupo de treze propriedades. Ficar visível se a maioria das pontuações ficaram próximas ou distantes do valor ótimo esperado.

As propriedades que ficarem com uma baixa pontuação serão analisadas para verificar se é possível realizar alguma alteração no sistema proposto de forma a melhorar esse resultado.

Segundo os fundadores do UEQ (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017), os 26 pares de adjetivos opostos do UEQ, podem ser segmentados em 6 grupos, os quais são listados a seguir:

- Atratividade. Impressão geral sobre a experiência. Os usuários gostaram ou não gostaram? É atrativa, agradável ou prazeroso? Seis pares estão nessa categoria: Desagradável/Agradável, Bom/Mau, Desinteressante/Atrativo, Incômodo/Cômodo, Atraente/-Feio, Simpático/Antipático.
- Transparência. É fácil se familiarizar com a experiência? A experiência é fácil e clara de entender? Quatro pares estão nessa categoria: Incompreensível/Compreensível, De Fácil

aprendizagem/De difícil aprendizagem, Complicado/Fácil, Evidente/Confuso.

- Eficiência. Usuários conseguem resolver as tarefas sem esforços desnecessários? A interação é eficiente e rápida? A experiência reage rápido ao usuário? Quatro pares estão nessa categoria: Rápido/Lento, Ineficiente/Eficiente, Impraticável/Prático, Organizado/Desorganizado.
- Controle. O usuário se sente no controle da interação? Ele consegue prever o comportamento do sistema? Ele se sente seguro durante a experiência? Quatro pares estão nessa categoria: Imprevisível/Previsível, Obstrutivo/Condutor, Seguro/Inseguro, Atende as expectativas/Não atende as expectativas.
- Estimulação. A experiência é estimuladora e motivadora? É divertida? Quatro pares estão nessa categoria: Valioso/Sem valor, Aborrecido/Excitante, Desinteressante/Interessante, Motivante/Desmotivante
- Inovação. A experiência é inovadora e criativa? Chama a atenção dos usuários? Quatro pares estão nessa categoria: Criativo/Sem criatividade, Original/Convencional, Comum/Vanguardista, Conservador/Inovador.

O UEQ disponibiliza em seu site (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2022) uma ferramenta de análise de dados, no formato de planilha eletrônica, que analisa as respostas do usuário pontuando o resultado de acordo com os grupos listados (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017).

Essa ferramenta possui uma tabela padrão de referência (*benchmark*), com as médias das respostas de 21175 voluntários em 468 trabalhos, na versão atual utilizada (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2022). Isso possibilita a comparação dos resultados obtidos nesse trabalho com os catalogados no *benchmark* (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017).

Os valores das respostas do UEQ variam de 1 a 7, contudo, a ferramenta de análise de dados transpõe esses valores para que fiquem no intervalo de -3 a +3. Os pares de adjetivos opostos que possuíam o valor positivo na resposta 1 foram invertidos, de forma que todos os as respostas ótimas positivas ficassem no valor +3 e todas as respostas ótimas negativas ficassem no valor -3.

Os resultados disponibilizados na ferramenta estão divididos em 5 escalas de qualidade:

- Excelente: A avaliação do experimento está entre os 10% dos melhores resultados.
- Bom: 10% dos resultados no *benchmark* são melhores do que o experimento avaliado, e 75% dos resultados são piores.
- Acima da média: 25% dos resultados no *benchmark* são melhores que o experimento avaliado, e 50% dos resultados são piores.
- Abaixo da média: 50% dos resultados no *benchmark* são melhores que o experimento avaliado, e 25% dos resultados são piores.
- Ruim: A avaliação do experimento está entre os 25% dos piores resultados.

A própria ferramenta gera um gráfico de Colunas Empilhadas com o resultado dessas comparações. Desta forma, os resultados obtidos também foram analisados através desse gráfico.

4.3 ESTUDOS DE CASO

Nesta seção são apresentados dois estudos de caso que foram realizados para validar o processo proposto.

4.3.1 Brinquedo Infantil Carro

Foi realizado um estudo de caso com um brinquedo infantil de um carro com várias possíveis interações.

É possível abrir e fechar a porta do carro, as janelas possuem partes móveis que sobem e descem e fazem barulho. No bagageiro superior há um pássaro que pode ser deslocado de um lado para o outro e emite um som. As rodas giram como se o carro estivesse andando.

O processo do CYPIRP foi aplicado a este estudo de caso e cada uma das 4 etapas é detalhada nos próximos tópicos.

4.3.1.1 Especificação do Produto

Nesta etapa é definido qual produto será desenvolvido, suas características e seu modelo 3D é elaborado.

O produto definido para este estudo de caso foi um brinquedo infantil de um carro. O modelo 3D colorido do carro foi desenvolvido em um aplicativo de CAD tradicional, neste caso o aplicativo Blender (LEE, 2008) foi utilizado. Todas as partes móveis do brinquedo, como a porta do carro, as janelas, as rodas e o bagageiro superior, foram modeladas separadamente, e em seguida, posicionadas sobre o bloco principal do modelo. Nenhuma otimização foi realizada em Programa de auxílio a Engenharia (CAE - Computer Aided Engineering). O modelo 3D deste carro é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Modelo 3D do brinquedo de carro



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A saída desta etapa é o modelo 3D do produto, este é utilizado na etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional.

4.3.1.2 Criação do Protótipo Estrutural e Funcional

Para a produção do protótipo estrutural o modelo 3D do produto é utilizado no módulo de Fabricação Digital, o qual produz fisicamente o protótipo. Neste estudo de caso utilizamos uma impressora 3D de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) monocromática. O protótipo estrutural foi impresso em 3D em uma cor sólida, em um tom de verde, em um único bloco, sem partes móveis. Ele pode ser visualizado na Figura 32. A cor verde foi escolhida por causar menos interferência ao algoritmo de detecção de tons de pele, visto que não é comum tons verdes na pele humana. Também foi testado a impressão 3D na cor roxa, contudo, partes do protótipo foram confundidos com tons de pele, desta forma, o uso da cor roxa foi descontinuado.

Figura 32 – Protótipo Estrutural do brinquedo carro infantil



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a criação do protótipo funcional, inicialmente foram definidas as ações e reações que podem acontecer durante as interações com o usuário. Foram definidas as regiões de interação, e estas são ativadas através de ações de toque. Cada região possui sua reação, e estas são listadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Ações e Reações do brinquedo carro infantil

Região	Reação
Rodas dianteira e traseira	As rodas são rotacionadas no sentido anti-horário como se o carro estivesse se locomovendo para frente;
Porta	Movimento de rotação, de forma que a porta possa ser aberta ou fechada, e um som de porta rangendo;
Janela dianteira	Possui discos que se transladam verticalmente para cima e para baixo;
Janela traseira	Movimento de translação vertical, subindo e descendo a janela;

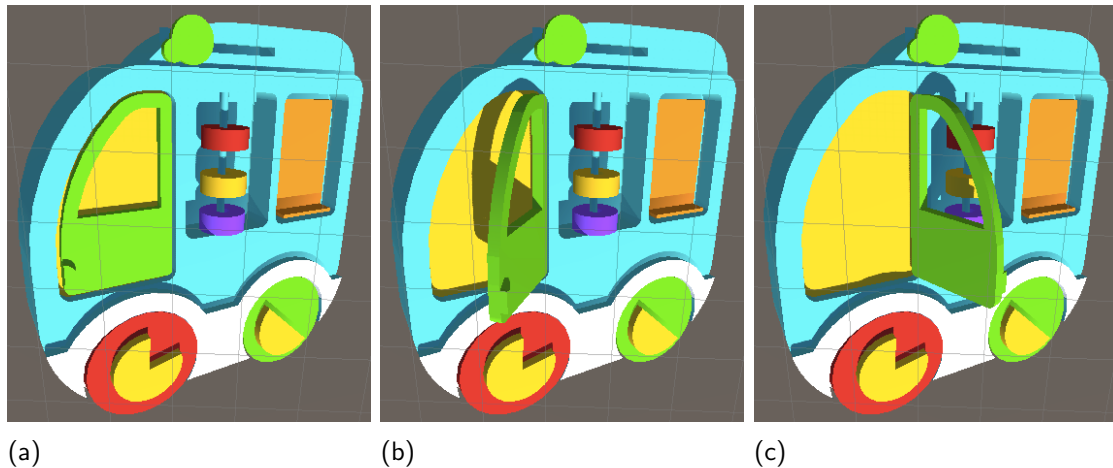
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O protótipo funcional foi implementado na *Unity Engine* (UNITY, 2022), e cada ação e reação foi configurada. As ações de toques foram desenvolvidas utilizando o recurso de Botão Virtual e de Caixa de Colisão (*Box Collider*), este último deve ser ajustado para abranger toda a região onde uma ação específica pode ser realizada. As reações foram configuradas com o recurso de Animação (*Animator*). Quando uma colisão ocorre a reação da região correspondente é ativada.

Utilizando as animações é possível definir movimentos básicos de translação e rotação.

Para cada parte móvel do protótipo foi configurada uma animação correspondente a reação esperada. Para a porta do carro foi configurada uma animação de rotação de zero graus até 110 graus. A Figura 33 apresenta o resultado dessa animação, desde o seu estado inicial, passando pelo ângulo de 45° até o final da animação em 110°.

Figura 33 – Animação de rotação da porta: sem rotação (a), rotação de 45° (b) e rotação de 110° (c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após os protótipos estrutural e funcional estarem configurados, passa-se para a etapa de Experimento do Protótipo.

4.3.1.3 Experimento do Protótipo

A arquitetura proposta do processo CYPiRP (Figura 28) foi configurada de forma a permitir um ambiente de experimento simples em um único dispositivo. A seguir, são apresentados como cada módulo da arquitetura foi configurado para o presente estudo de caso.

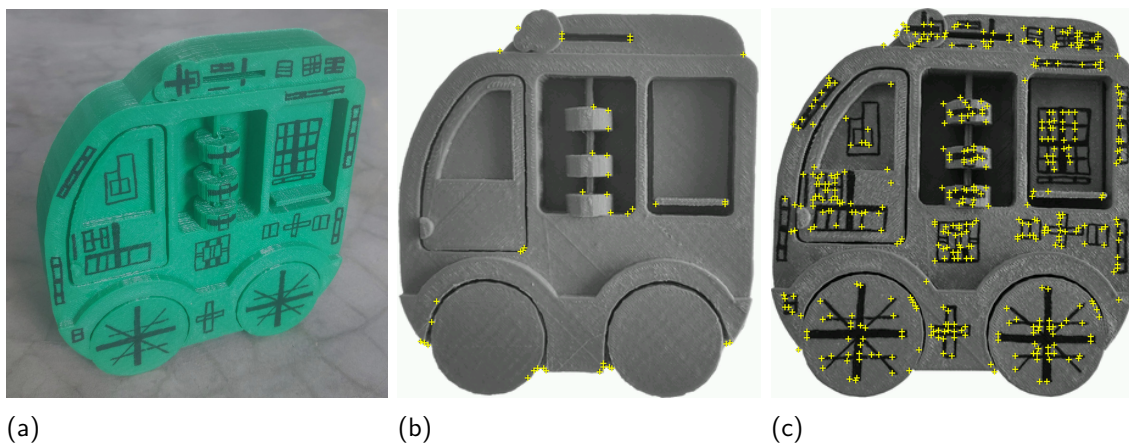
O módulo Controlador AR utilizado é a biblioteca de realidade aumentada Vuforia (VUFORIA, 2020), a qual funciona integrada a *Unity Engine* (UNITY, 2022).

Para possibilitar a sobreposição dos protótipos é utilizado o recurso de Marcadores AR (*AR Target*) da biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020). Este recurso possibilita que o protótipo estrutural seja localizado no ambiente real, identificando sua posição espacial, para que o protótipo funcional seja sobreposto a ele. O marcador utilizado foi o próprio protótipo estrutural, para isso foi utilizado o Marcador AR do tipo imagem (*Image Target*), e a imagem utilizada é uma foto do protótipo estrutural. Como o protótipo do Brinquedo Carro Infantil possui apenas uma face com interação, esse marcador imagem pode ser aplicado. Desta forma, o marcador fica praticamente imperceptível para o usuário, funcionando como um marcador invisível (PARK;

PARK, 2010).

Para melhorar a detecção do marcador e também dos botões virtuais, foram adicionadas marcações manuais, em forma de linhas retas, desenhadas manualmente sobre o protótipo estrutural. Essas marcações produziram elementos visuais que são necessários para uma melhor detecção do marcador. A Figura 34 apresenta o protótipo estrutural após a adição dessas marcações e como a biblioteca Vuforia reconheceu os elementos principais das imagens antes e após a adição das marcações.

Figura 34 – Protótipo estrutural e marcadores AR: Foto frontal do protótipo estrutural (a), Marcador imagem sem marcações manuais e os elementos identificados pela Vuforia (b) e Marcador imagem com marcações manuais e os elementos identificados pela Vuforia (c)



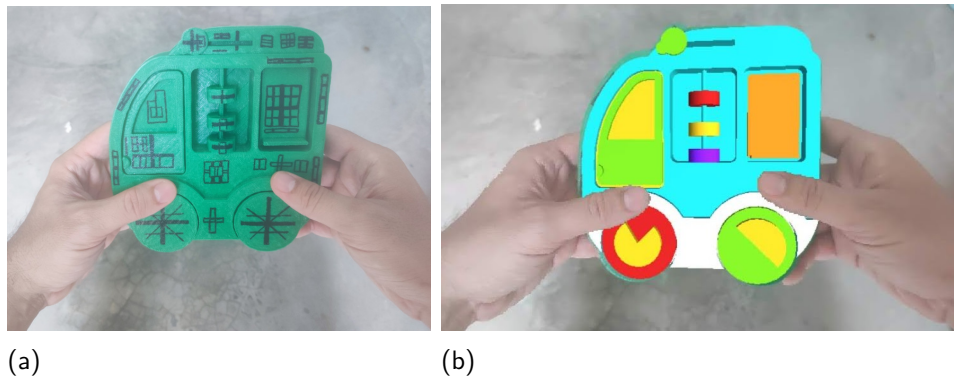
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Pode-se perceber na Figura 34.(b) poucos elementos são identificados, indicados através do símbolo de mais amarelo nas imagens. Já na Figura 34.(c), após a adição das marcações, a quantidade de elementos é bem superior. A Vuforia indica a qualidade do marcador através de uma escala de estrelas, de um até cinco. O marcador da Figura 34.(b) recebeu apenas uma estrela, enquanto que o marcador da Figura 34.(c) recebeu cinco estrelas.

O protótipo funcional, que só é visível na AR, é associado a este marcador físico. Quando o marcador é detectado no campo de visão do dispositivo de visualização, o protótipo funcional é apresentado sobre o marcador físico. O protótipo funcional deve ser posicionado de forma a se sobrepor ao marcador. Desta forma, quando o marcador é detectado, o protótipo funcional é apresentado encobrindo o protótipo estrutural. Esse processo pode ser observado na Figura 35, onde é apresentado o usuário interagindo com o protótipo estrutural na Figura 35.(a) e como o usuário visualiza a interação na Figura 35.(b).

O módulo Detector de Ações foi implementado utilizando o recurso de Botões Virtuais da biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020). Esses botões detectam toques sobre regiões específicas

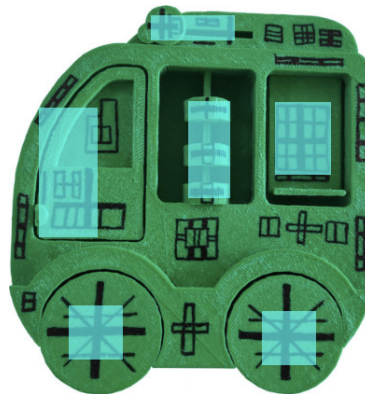
Figura 35 – Interação com o protótipo: Protótipo estrutural (a) e Protótipo funcional sobrescrevendo o estrutural (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

do Marcador-Imagem. Cada botão virtual foi posicionado sobre a região do marcador que corresponde a uma região de interação com o usuário. A Figura 36 apresenta as regiões, em azul claro, dos botões virtuais sobre o marcador-imagem, é possível perceber que eles estão exatamente sobre as regiões onde acontece as ações e reações do protótipo funcional.

Figura 36 – Marcador-Imagem e os botões virtuais do brinquedo carro infantil



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O módulo Controlador Central foi desenvolvido em linguagem C# na *Unity Engine*, e gerencia as ações recebidas do módulo Detector de Ações e gera as reações no protótipo funcional.

Todos os módulos foram embarcados em uma única aplicação móvel, desenvolvida na *Unity Engine* (UNITY, 2022). A aplicação foi testada na plataforma Android.

O Dispositivo de visualização utiliza um óculos de realidade virtual com um celular Android acoplado como tela, possibilitando a AR através da visão direta por vídeo (*Video see-through*). A câmera do celular é utilizada tanto pelo Dispositivo de Visualização quanto pelo módulo Detector de Ações.

O usuário a realizar o teste é instruído para seguir as seguintes instruções:

1. Vestir os óculos de AR;
2. Segurar o protótipo com as mãos;
3. Executar as seguintes tarefas no protótipo:
 - Abrir e fechar a porta do carro;
 - Girar as rodas do carro;
 - Subir e descer as janelas do carro;
 - Subir e descer as janelas do carro;
 - Deslocar o bagageiro para os lados;

Na Figura 37 é possível ver o protótipo estrutural e funcional sendo experimentado no sistema CYPIRP. O usuário posicionou o dedo sobre a roda traseira do carro e ela inicia a rotação.

Figura 37 – Protótipo estrutural e funcional sendo experimentado: (a) Interação com o protótipo estrutural (a) e Interação com o protótipo funcional sobreposto ao estrutural (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foi disponibilizado um vídeo de demonstração sobre este estudo de caso no YouTube (OMAIA, 2023a). O código-fonte deste projeto Unity foi disponibilizado no GitHub (OMAIA, 2023b).

4.3.2 Rádio-relógio

Foi realizado um estudo de caso com um rádio-relógio com várias possíveis interações.

É possível ligar e desligar o rádio, alterar a frequência da rádio atual que está sintonizada, mudar para o modo FM ou AM, aumentar ou diminuir o volume, além de ouvir o som da rádio. No modo Relógio é possível visualizar a hora e alterar as horas e minutos.

O processo do CYPIRP foi aplicado a este estudo de caso e cada uma das 4 etapas é detalhada nos próximos tópicos.

4.3.2.1 Especificação do Produto

Nesta etapa é definido qual produto será desenvolvido, suas características e seu modelo 3D é elaborado.

O produto definido para este estudo de caso foi um rádio-relógio. O modelo 3D colorido do carro foi desenvolvido em um aplicativo de CAD tradicional. As partes móveis do rádio, isto é, seus botões, foram modelados separadamente e, em seguida, posicionados sobre o bloco principal do modelo. Nenhuma otimização foi realizada em Programa de auxílio a Engenharia (CAE - Computer Aided Engineering). O modelo 3D deste rádio-relógio é apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Modelo 3D do rádio-relógio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A saída desta etapa é o modelo 3D do produto, este é utilizado na etapa de Criação do Protótipo Estrutural e Funcional.

4.3.2.2 Criação do Protótipo Estrutural e Funcional

Para a produção do protótipo estrutural, o modelo 3D do produto é utilizado no módulo de Fabricação Digital, o qual produz fisicamente o protótipo. Neste estudo, de caso, foi utilizada uma impressora 3D de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) monocromática. O protótipo estrutural foi impresso em 3D em uma cor sólida, em um tom de verde, em um único bloco, sem partes móveis. Ele pode ser visualizado na Figura 39. A cor verde foi escolhida por causar

menos interferência ao algoritmo de detecção de tons de pele, visto que não é comum tons verdes na pele humana.

Figura 39 – Protótipo Estrutural do rádio-relógio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a criação do protótipo funcional, inicialmente foram definidas as ações e reações que podem acontecer durante as interações com o usuário. Foram definidas as regiões de interação, e estas são ativadas através de ações de toque. Cada região possui sua reação, que são listadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Ações e Reações rádio-relógio

Região	Reação
Botão On/Off	Liga ou desliga o rádio-relógio, acendendo ou apagando sua tela;
Botão Mode	Troca o modo do rádio entre as opções FM, AM e CLOCK;
Botões << e >>	Sintonizam a próxima ou anterior frequência rádio;
Botões V+ e V-	Aumentam ou diminuem o volume da rádio;
Botões T+ e T-	Aumentam ou diminuem a hora ou minuto atual.
Botão Set	Funcionam apenas no modo relógio;
	Troca entre edição das horas ou dos minutos;

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Todos os botões ao serem pressionados emitem um som de clique e deslocam-se no eixo z para baixo e para cima, indicando que foram pressionados.

O protótipo funcional foi implementado na *Unity Engine* (UNITY, 2022), e cada ação e reação foi configurada. As ações de toques foram desenvolvidas utilizando o recurso de Botão Virtual e de Caixa de Colisão (*Box Collider*); este último deve ser ajustado para abranger toda a região onde uma ação específica pode ser realizada. As reações foram configuradas com o recurso de Animação (*Animator*) e através de algoritmos em C#, que realizam as configurações do rádio-relógio. Quando uma colisão ocorre, a reação da região correspondente é ativada.

Utilizando as animações é possível definir movimentos básicos, como o de translação. Para cada botão do protótipo foi configurada uma animação correspondente ao ato de pressionar o botão, isto é, é realizada uma operação de translação para baixo e depois para cima, no eixo Z, indicando que o botão foi pressionado.

Após os protótipos estrutural e funcional estarem configurados, passa-se para a etapa de Experimento do Protótipo.

4.3.2.3 Experimento do Protótipo

A arquitetura proposta do processo CYPIRP (Figura 28) foi configurada de forma a permitir um ambiente de experimento simples em um único dispositivo. A seguir, são apresentados como cada módulo da arquitetura foi configurado para o presente estudo de caso.

O módulo Controlador AR utilizado é a biblioteca de realidade aumentada Vuforia (VUFORIA, 2020), a qual funciona integrada a *Unity Engine* (UNITY, 2022).

Para possibilitar a sobreposição dos protótipos é utilizado o recurso de Marcadores AR (*AR Target*) da biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020). Esse recurso possibilita que o protótipo estrutural seja localizado no ambiente real, identificando sua posição espacial, para que o protótipo funcional seja sobreposto a ele.

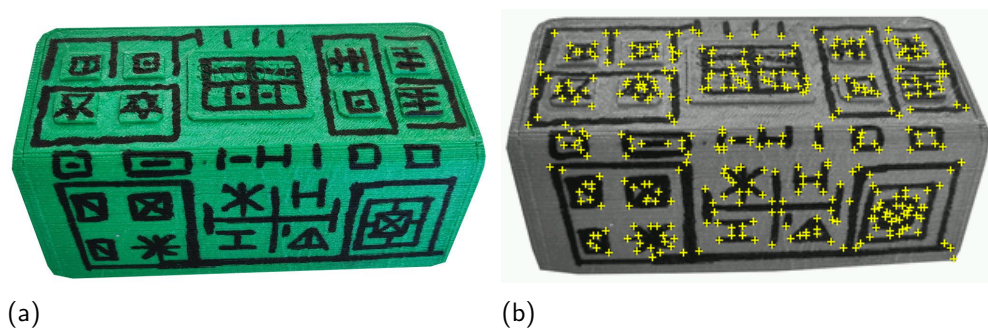
A Vuforia disponibiliza diferentes tipos de Marcadores AR, dentre os que possibilitam que o próprio protótipo estrutural seja usado como marcador, estão o marcador baseado em Modelo 3D (*Model Target*) e o Marcador Imagem (*Image Target*). Foram realizados testes com o marcador baseado em modelos 3D, contudo, ele não apresentou bons resultados nos modelos 3D do Rádio-relógio.

Desta forma, foi utilizado o Marcador Imagem, com uma foto do próprio protótipo estrutural. Contudo, como o Rádio-relógio não é plano e possui 2 faces de interação, a imagem do marcador teve que abranger as duas faces, conforme apresentado na Figura 40.(a). Dessa

modo, para uma melhor identificação do marcador é indicado que a interação com o prótipo seja realizada em um ângulo em que as duas faces fiquem visíveis. Seguindo este protocolo, o marcador fica praticamente imperceptível para o usuário, funcionando como um marcador invisível (PARK; PARK, 2010).

Para melhorar a detecção do marcador e também dos botões virtuais, foram adicionadas marcações manuais, em forma de linhas retas, desenhadas manualmente sobre o protótipo estrutural. Essas marcações produziram elementos visuais que são necessários para uma melhor detecção do marcador. A Figura 40 apresenta o protótipo estrutural após a adição dessas marcações e como a biblioteca Vuforia reconheceu os elementos principais das imagens antes e após a adição das marcações.

Figura 40 – Protótipo estrutural e marcadores AR: Foto frontal do protótipo estrutural (a) e Marcador imagem com marcações manuais e os elementos identificados pela Vuforia (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Pode-se perceber na Figura 40.(b) que, nas regiões onde foi realizada a adição de marcações manuais, aparecem elementos detectados pela Vuforia, indicados através do símbolo de '+' amarelo. A Vuforia indica a qualidade do marcador por meio de uma escala de estrelas, de 1 até 5. O marcador da Figura 40.(b) recebeu 5 estrelas, indicando que a quantidade de elementos encontrados foi satisfatória.

O protótipo funcional, que só é visível na AR, é associado a este marcador físico. Quando o marcador é detectado no campo de visão do dispositivo de visualização, o protótipo funcional é apresentado sobre o marcador físico. O protótipo funcional deve ser posicionado de forma a se sobrepor ao marcador. Dessa forma, quando o marcador é detectado, o protótipo funcional é apresentado encobrindo o protótipo estrutural. Esse processo pode ser observado na Figura 41, em que é apresentado o usuário interagindo com o protótipo estrutural na Figura 41.(a) e como o usuário visualiza a interação na Figura 41.(b).

O módulo Detector de Ações foi implementado utilizando o recurso de Botões Virtuais da biblioteca Vuforia (VUFORIA, 2020). Esses botões detectam toques sobre regiões específicas

Figura 41 – Interação com o protótipo: Protótipo estrutural (a) e Protótipo funcional sobrescrevendo o estrutural (b)



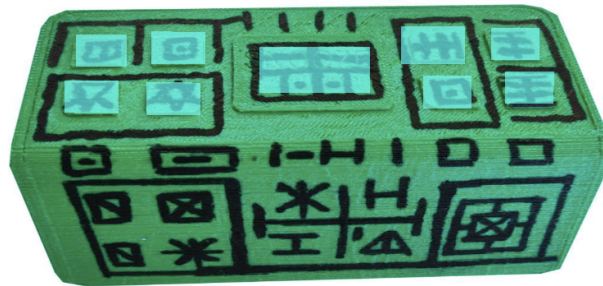
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

do Marcador-Imagem. Cada botão virtual foi posicionado sobre a região do marcador que corresponde a uma região de interação com o usuário. A Figura 42 apresenta as regiões, em azul claro, dos botões virtuais sobre o marcador-imagem. É possível perceber que eles estão exatamente sobre as regiões onde acontece as ações do protótipo funcional.

Figura 42 – Marcador-Imagem e os botões virtuais do rádio-relógio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O módulo Controlador Central foi desenvolvido em linguagem C# na *Unity Engine*, gerencia as ações recebidas do módulo Detector de Ações e gera as reações no protótipo funcional.

Todos os módulos foram embarcados em uma única aplicação móvel, desenvolvida na *Unity Engine* (UNITY, 2022). A aplicação foi testada na plataforma Android.

O Dispositivo de visualização utiliza um óculos de realidade virtual com um celular Android acoplado como tela, possibilitando a apresentação da AR através da visão direta por vídeo (*Video see-through*). A câmera do celular é utilizada tanto pelo Dispositivo de Visualização quanto pelo módulo Detector de Ações.

O usuário a realizar o teste é instruído a executar o seguinte roteiro instruções:

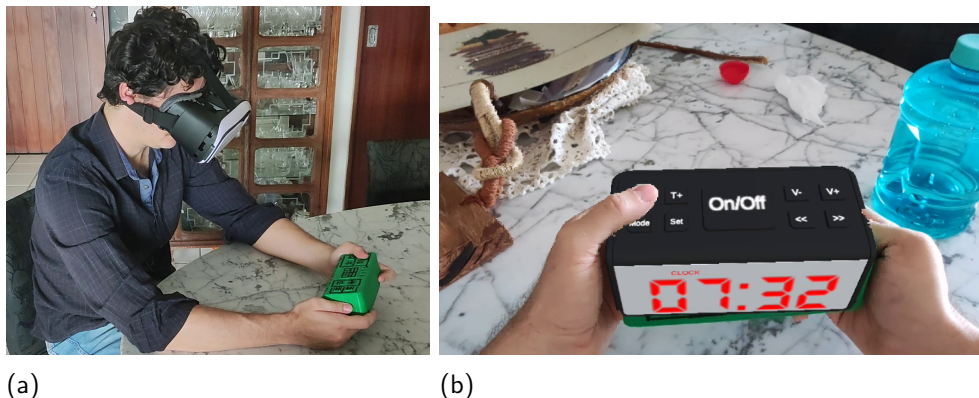
1. Vestir os óculos de AR;
2. Segurar o protótipo com as mãos;

3. Executar as seguintes tarefas no protótipo:

- Ligar o rádio-relógio, clicando no botão On/Off;
- Sintonizar a rádio de preferência clicando nos botões próximo (>>) ou anterior (<<);
- Aumentar o volume para o máximo, clicando no Botão V+;
- Mudar do modo Rádio para o modo Relógio (CLOCK), clicando no botão Mode;
- Diminuir a hora em 2 horas, clicando no botão T- (2 vezes);
- Desligar o rádio-relógio, clicando no botão On/Off.

Na Figura 43 é possível ver o protótipo estrutural e funcional sendo experimentado no sistema CYPIRP. O usuário posicionou o dedo sobre o botão T- para diminuir a hora atual.

Figura 43 – Protótipo estrutural e funcional sendo experimentado: Interação com o protótipo estrutural (a) e Interação com o protótipo funcional sobreposto ao estrutural (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foi disponibilizado um vídeo de demonstração sobre este estudo de caso no YouTube (OMAIA, 2024a). O código-fonte deste projeto Unity foi disponibilizado no GitHub (OMAIA, 2024b).

4.3.3 Avaliação do Protótipo

Após o experimento do protótipo ter sido executado, o usuário é convidado a responder o questionário UEQ. As respostas foram documentadas e são apresentadas no Capítulo 5 Descrição e Avaliação dos Resultados.

5 DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

O processo proposto neste trabalho foi aplicado nos dois estudos de caso apresentados. Foi realizado um experimento, com um grupo de 30 voluntários distintos, para cada estudo de caso. No total, 60 usuários testaram e avaliaram o sistema, através do questionários UEQ (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008). Os voluntários são estudantes de graduação e servidores universitários, todos com mais de 18 anos.

Essa forma de avaliação analisa a etapa do experimento do protótipo, e não o processo como um todo. Decidiu-se por essa abordagem por esta ter uma avaliação mais direta a partir da análise do questionário UEQ. Para uma análise do processo completo, seria necessária sua aplicação em uma indústria e todas as suas etapas deveriam ser analisadas.

5.2 ESTUDO DE CASO

Foram propostos dois estudos de caso, um de um brinquedo infantil de um carro e outro de um rádio-relógio. Os resultados de cada experimento são apresentados a seguir.

5.2.1 Brinquedo Infantil Carro

Após a execução do experimento do brinquedo infantil de um carro, os voluntários foram convidados a responderem o questionário UEQ (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008) sobre a experiência vivenciada de manipulação do protótipo. A seguir são apresentados os resultados.

Na Tabela 8 é apresentada a tabela do com o resultado unificado das respostas dos 30 usuários. Nas sete possíveis respostas de cada par oposto foi colocado a quantidade de voluntários que deram aquela mesma resposta. Por exemplo, no par Desagradável/Agradável, onze voluntários responderam o valor 7, dez voluntários responderam o valor 6, quatro voluntários responderam o valor 5 e cinco voluntários responderam 4. Os valores 1, 2 e 3 não tiveram respostas.

Dos 26 pares de adjetivos opostos, os que foram considerados positivos para a avaliação foram coloridos como verde, os adjetivos não positivos foram coloridos como tom de amarelo. Dos 7 possíveis valores de respostas, os valores 1, 2 e 3 indicam um tendência ao primeiro

Tabela 8 – Resultado Completo do UEQ para o Brinquedo Infantil Carro

	1	2	3	4	5	6	7	
Desagradável	0	0	0	5	4	10	11	Agradável
Incompreensível	0	0	0	0	4	6	20	Compreensível
Criativo	18	8	3	0	0	0	1	Sem criatividade
De fácil aprendizagem	24	3	0	2	0	1	0	De difícil aprendizagem
Valioso	10	7	4	7	1	1	0	Sem valor
Aborrecido	0	0	0	2	6	14	8	Excitante
Desinteressante	0	0	0	0	2	9	19	Interessante
Imprevisível	1	0	3	8	4	6	8	Previsível
Rápido	8	8	6	5	2	1	0	Lento
Original	14	9	7	0	0	0	0	Convencional
Obstrutivo	0	0	1	3	10	6	10	Condutor
Bom	19	11	0	0	0	0	0	Mau
Complicado	0	0	0	2	4	3	21	Fácil
Desinteressante	0	0	0	0	4	8	18	Atrativo
Comum	0	1	1	12	6	8	2	Vanguardista
Incômodo	0	3	2	2	4	12	7	Cômodo
Seguro	24	3	2	0	1	0	0	Inseguro
Motivante	17	8	3	1	1	0	0	Desmotivante
Atende as expectativas	18	8	4	0	0	0	0	Não atende as expectativas
Ineficiente	0	0	1	3	2	12	12	Eficiente
Evidente	12	10	5	2	1	0	0	Confuso
Impraticável	0	0	0	0	5	2	23	Prático
Organizado	22	8	0	0	0	0	0	Desorganizado
Atraente	16	8	5	1	0	0	0	Feio
Simpático	21	8	1	0	0	0	0	Antipático
Conservador	0	0	0	3	6	8	13	Inovador

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

adjetivo e os valores 5, 6, 7 indicam uma tendência ao segundo adjetivo. O valor 4 indica uma neutralidade, ou que os voluntários não souberam definir corretamente o adjetivo indicado.

A Tabela 8 foi reorganizada, visando uma melhor compreensão dos resultados. Para isso, a quantidade de respostas de cada item foi normalizada, algumas colunas foram agrupadas, e as linhas foram reordenadas, a nova tabela é exibida na Tabela 9.

A normalização foi realizada obtendo a quantidade de cada resposta, a qual varia entre 0 e 30, e dividindo-a pela quantidade máxima de respostas, isto é, 30. Conforme apresentado na Equação 5.1.

$$valor_normalizado = quantidade_respostas / total_respostas \quad (5.1)$$

O agrupamento das colunas foi realizado baseado nas tendências que cada coluna indica, desta forma, as colunas 1, 2, e 3 e as colunas 5, 6 e 7 tiveram seu conteúdo agrupado e somado. Cada linha da tabela foi reordenada, inicialmente, os 13 pares de adjetivos, onde o adjetivo ótimo é valor 1, ficaram no início da tabela (Grupo Ótimo 1), e 13 os pares onde o adjetivo ótimo é o valor 7 ficaram na final da tabela (Grupo Ótimo 7). Em seguida, os

Tabela 9 – Resultado Simplificado Ordenado do UEQ para o Brinquedo Infantil Carro

	1,2,3	4	5,6,7	
Original	1,00	0,00	0,00	Convencional
Bom	1,00	0,00	0,00	Mau
Atende as expectativas	1,00	0,00	0,00	Não atende as expectativas
Organizado	1,00	0,00	0,00	Desorganizado
Simpático	1,00	0,00	0,00	Antipático
Criativo	0,97	0,00	0,03	Sem criatividade
Seguro	0,97	0,00	0,03	Inseguro
Atraente	0,97	0,03	0,00	Feio
Motivante	0,93	0,03	0,03	Desmotivante
De fácil aprendizagem	0,90	0,07	0,03	De difícil aprendizagem
Evidente	0,90	0,07	0,03	Confuso
Rápido	0,73	0,17	0,10	Lento
Valioso	0,70	0,23	0,07	Sem valor
Incompreensível	0,00	0,00	1,00	Compreensível
Desinteressante	0,00	0,00	1,00	Interessante
Desinteressante	0,00	0,00	1,00	Atrativo
Impraticável	0,00	0,00	1,00	Prático
Aborrecido	0,00	0,07	0,93	Excitante
Complicado	0,00	0,07	0,93	Fácil
Conservador	0,00	0,10	0,90	Inovador
Ineficiente	0,03	0,10	0,87	Eficiente
Obstrutivo	0,03	0,10	0,87	Condutor
Incômodo	0,00	0,17	0,83	Cômodo
Desagradável	0,17	0,07	0,77	Agradável
Imprevisível	0,13	0,27	0,60	Previsível
Comum	0,07	0,40	0,53	Vanguardista

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

pares de adjetivos do Grupo Ótimo 1 foram dispostos em ordem decrescente de acordo com as respostas 1, 2 e 3; e os pares do Grupo Ótimo 7 foram dispostos de forma decrescente de acordo com a coluna das respostas 5, 6 e 7.

Após essas alterações, é possível perceber, na Tabela 9, que os adjetivos positivos ficaram sempre com mais respostas do que os adjetivos negativos, e também foram superiores a quantidade respostas neutras (valor 4) para todos os 26 pares de adjetivos.

Também é possível notar, nesta mesma tabela, que dos 26 adjetivos positivos em apenas dois (Vanguardista e Previsível) foram obtidos menos de 70% da respostas, e mesmo nesses, as respostas positivas ainda foram superiores, seguidas pelas respostas neutras (valor 4), e após pelas repostas negativas.

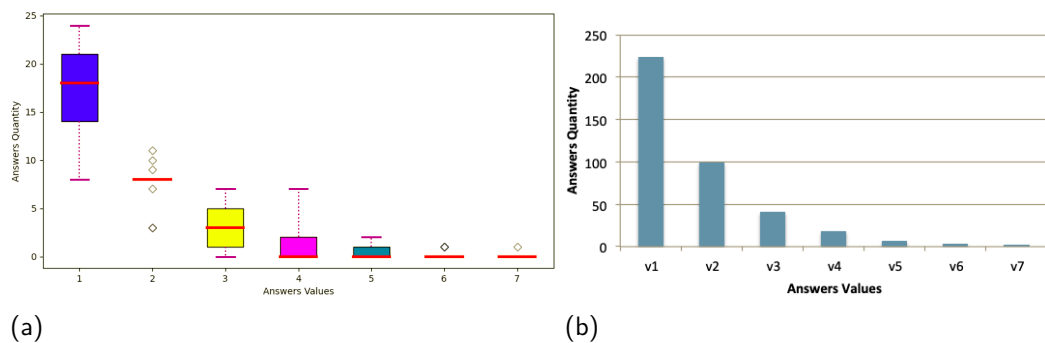
Os pares que mais receberam respostas neutras (valor 4) foram os: Valioso/Sem Valor, Imprevisível/Previsível, Comum/Vanguardista. Isso indica que os voluntários ficaram em dúvida sobre esses pontos, contudo, mesmo nesses pares, a quantidade de respostas referentes a adjetivos positivos ainda foram superiores.

Dos 26 pares de adjetivos em 14 deles a taxa de respostas positivas foi superior a 95%.

Os adjetivos que receberam mais respostas com quantidade superior a 95% foram: Compreensível, Interessante, Original, Bom, Atrativo, Atende as Expectativas, Prático, Organizado e Simpático.

Para cada grupo (Ótimo 1 e Ótimo 7) foram gerados os gráficos de Diagrama de Caixas (*box plot*) e Histograma. Para o Grupo Ótimo 1 esses 2 gráficos são apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Gráficos Grupo Ótimo 1 para o Brinquedo Infantil Carro: Diagrama de Caixas e Histograma (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

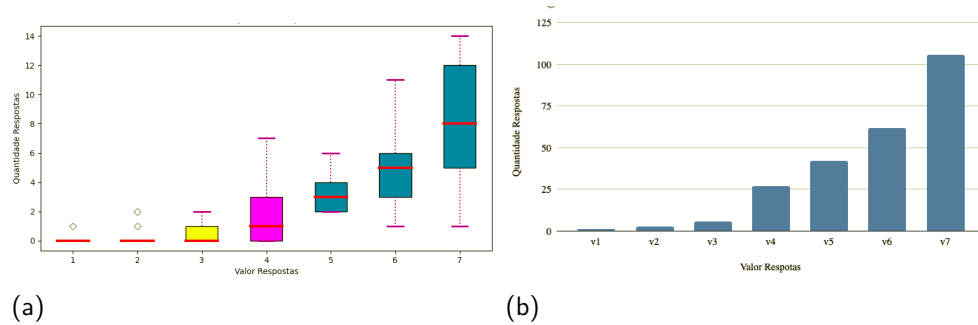
É possível perceber, na Figura 44, que os dois gráficos do grupo Ótimo 1 indicam uma quantidade maior de respostas para os valores 1 e 2, do que para os demais valores. No gráfico do Diagrama de Caixas (Figura 44.a) é possível obter diversas métricas. Analisando a resposta 1, ela recebeu o valor máximo de 24 respostas (adjetivos Seguro e De fácil aprendizagem); o terceiro quartil recebeu o valor de 21 respostas (adjetivo Simpático); a mediana ficou com 18 respostas (adjetivo Motivante); o primeiro quartil ficou com 14 respostas (adjetivo Original); e o valor mínimo recebido na resposta 1 foi de 8 respostas (adjetivo Rápido). Os adjetivos e suas quantidades de respostas no valor 1 podem ser conferidos na Tabela 8.

O gráfico do histograma (Figura 44.b) indica a quantidade de respostas recebidas por cada resposta nos 13 adjetivos do grupo em questão. Analisando a resposta 1 é possível perceber que ela recebeu 223 respostas, de um máximo de 390. Este valor total de respostas possíveis é calculado multiplicando o número de voluntários pelo número de pares. Desta forma: $total = quantPares * totalVoluntários$, isto é, $total = 13 * 30 = 390$.

A Figura 45 apresenta os gráficos de Diagrama de Caixas e do Histograma para o Grupo Ótimo 7. O comportamento dos resultados é inverso ao do Grupo Ótimo 1, indicando uma maior quantidade de respostas para os valores 6 e 7. Contudo, no Grupo Ótimo 7 os valores 6 e 7 representam adjetivos positivos para o experimento.

A ferramenta de análise de dados do UEQ foi utilizada para comparar os resultados obtidos

Figura 45 – Gráficos Grupo Ótimo 7 para o Brinquedo Infantil Carro: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

com a tabela padrão de referência (*benchmark*) disponibilizada pelo site do UEQ (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017; SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2022). Os valores das médias obtidas nas respostas do presente trabalho foram calculadas para os seis grupos (Atratividade, Transparência, Eficiência, Controle, Estimulação, Inovação) (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017). Conforme apresentado no tópico 4.2.3 METODOLOGIA, o resultado dessa comparação pode ser dividido em 5 escalas de qualidade: Excelente, Bom, Acima da média, Abaixo da média e Ruim. Na presente comparação, todos os seis grupos ficaram com o resultado Excelente. Estes valores das médias são apresentados, para todos os grupos, na Tabela 10.

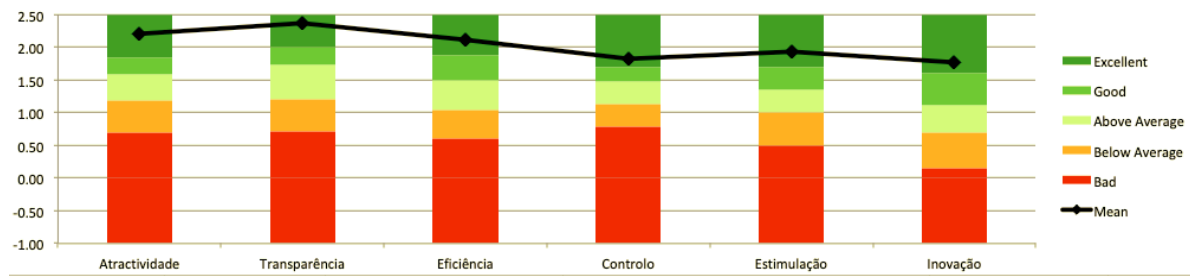
Tabela 10 – Média das respostas nos grupos e comparação ao *benchmark* para o Brinquedo Infantil Carro

Escala	Média	Comparação ao <i>benchmark</i>
Atratividade	2,22	Excelente
Transparência	2,38	Excelente
Eficiência	2,19	Excelente
Controle	1,98	Excelente
Estimulação	2,08	Excelente
Inovação	1,86	Excelente

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Através da ferramenta de análise de dados também foi gerado o gráfico de Colunas Empilhadas das médias para os seis grupos das possíveis respostas (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017). Este gráfico é exibido na Figura 46 e apresenta as médias do *benchmark* para cada grupo e a comparação com a média obtida no experimento proposto, a qual é destacada pela linha preta entre as colunas. Tanto pelo gráfico como pela Tabela 10 é possível notar que o resultado obtido ficou na escala excelente nos 6 grupos analisados.

Figura 46 – Média das respostas nos grupos e comparação ao *benchmark* para o Brinquedo Infantil Carro



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.2.2 Rádio-relógio

No experimento do rádio-relógio, após a sua execução, os voluntários também foram convidados a responder o questionário UEQ (LAUGWITZ; HELD; SCHREPP, 2008) sobre a experiência vivenciada de manipulação do protótipo. A seguir são apresentados os resultados.

Na Tabela 11 é apresentado o resultado unificado das respostas dos 30 usuários. Nas sete possíveis respostas de cada par oposto foi colocada a quantidade de voluntários que deram aquela mesma resposta. Por exemplo, no par Incompreensível/Compreensível, treze voluntários responderam o valor 7, outros treze voluntários responderam o valor 6, três voluntários responderam o valor 5 e um voluntário respondeu 2. Os valores 1, 3 e 4 não obtiveram respostas.

Dos 26 pares de adjetivos opostos, os que foram considerados positivos para a avaliação foram coloridos como verde, os adjetivos não positivos foram coloridos como tom de amarelo. Dos 7 possíveis valores de respostas, os valores 1, 2 e 3 indicam uma tendência ao primeiro adjetivo, e os valores 5, 6 e 7 indicam uma tendência ao segundo adjetivo. O valor 4 indica uma neutralidade, ou que os voluntários não souberam definir corretamente o adjetivo indicado.

A Tabela 11 foi reorganizada, visando uma melhor compreensão dos resultados. Para isso, a quantidade de respostas de cada item foi normalizada, algumas colunas foram agrupadas, e as linhas foram reordenadas. A nova tabela é exibida na Tabela 12.

A normalização foi realizada obtendo a quantidade de cada resposta, a qual varia entre 0 e 30, e dividindo-a pela quantidade máxima de respostas, isto é, 30. Conforme apresentado na Equação 5.1.

O agrupamento das colunas foi realizado baseado nas tendências que cada coluna indica; dessa forma, as colunas 1, 2 e 3 e as colunas 5, 6 e 7 tiveram seu conteúdo agrupado e somado. Cada linha da tabela foi reordenada. Inicialmente, os 13 pares de adjetivos, onde o adjetivo ótimo é valor 1, ficaram no início da tabela (Grupo Ótimo 1), e os 13 pares onde o adjetivo

Tabela 11 – Resultado Completo do UEQ para o rádio-relógio

	1	2	3	4	5	6	7	
Desagradável	0	0	2	4	10	9	5	Agradável
Incompreensível	0	1	0	0	3	13	13	Compreensível
Criativo	16	9	2	0	0	1	2	Sem criatividade
De fácil aprendizagem	16	8	4	1	0	0	1	De difícil aprendizagem
Valioso	10	12	5	2	0	1	0	Sem valor
Aborrecido	0	0	1	6	5	7	11	Excitante
Desinteressante	0	0	0	0	1	5	24	Interessante
Imprevisível	0	3	3	10	3	6	5	Previsível
Rápido	7	4	2	9	5	2	1	Lento
Original	14	6	5	2	2	0	1	Convencional
Obstrutivo	0	0	2	9	6	10	3	Condutor
Bom	17	10	2	1	0	0	0	Mau
Complicado	0	1	2	4	7	3	13	Fácil
Desinteressante	0	0	0	0	0	13	17	Atrativo
Comum	0	1	2	9	2	9	7	Vanguardista
Incômodo	0	2	2	7	6	8	5	Cómodo
Seguro	18	8	2	2	0	0	0	Inseguro
Motivante	16	9	4	1	0	0	0	Desmotivante
Atende as expectativas	7	12	6	4	1	0	0	Não atende as expectativas
Ineficiente	0	0	2	4	8	8	8	Eficiente
Evidente	10	6	8	3	3	0	0	Confuso
Impraticável	0	0	1	1	5	17	6	Prático
Organizado	15	11	2	2	0	0	0	Desorganizado
Atraente	12	10	5	2	1	0	0	Feio
Simpático	17	7	3	3	0	0	0	Antipático
Conservador	0	0	0	0	2	11	17	Inovador

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

ótimo é o valor 7 ficaram no fim da tabela (Grupo Ótimo 7). Em seguida, os pares de adjetivos do Grupo Ótimo 1 foram dispostos em ordem decrescente de acordo com as respostas 1, 2 e 3; e os pares do Grupo Ótimo 7 foram dispostos de forma decrescente de acordo com a coluna das respostas 5, 6 e 7.

Após essas alterações, é possível perceber, na Tabela 12, que os adjetivos positivos ficaram sempre com mais respostas do que os adjetivos negativos, e também foram superiores a quantidade respostas neutras (valor 4) para todos os 26 pares de adjetivos.

Também é possível notar, nessa mesma tabela, que, dos 26 adjetivos positivos, em apenas dois (Rápido e Previsível) foram obtidos menos de 60% da respostas, e mesmo nestes, as respostas positivas ainda foram superiores, seguidas pelas respostas neutras (valor 4) e, após, pelas repostas negativas.

Os pares que mais receberam respostas neutras (valor 4) foram os: Rápido/Lento, Imprevisível/Previsível, Comum/Vanguardista e Obstrutivo/Condutor. Isso indica que os voluntários ficaram em dúvida sobre esses pontos; contudo, mesmo nesses pares, a quantidade de respostas referentes a adjetivos positivos ainda foram superiores.

Tabela 12 – Resultado Simplificado Ordenado do UEQ para o rádio-relógio

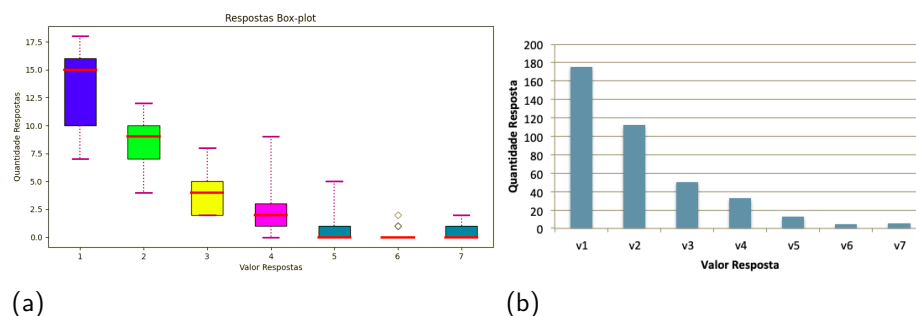
	1,2,3	4	5,6,7	
Bom	0,97	0,03	0,00	Mau
Motivante	0,97	0,03	0,00	Desmotivante
De fácil aprendizagem	0,93	0,03	0,03	De difícil aprendizagem
Seguro	0,93	0,07	0,00	Inseguro
Organizado	0,93	0,07	0,00	Desorganizado
Criativo	0,90	0,00	0,10	Sem criatividade
Valioso	0,90	0,07	0,03	Sem valor
Atraente	0,90	0,07	0,03	Feio
Simpático	0,90	0,10	0,00	Antipático
Original	0,83	0,07	0,10	Convencional
Atende as expectativas	0,83	0,13	0,03	Não atende as expectativas
Evidente	0,80	0,10	0,10	Confuso
Rápido	0,43	0,30	0,27	Lento
Desinteressante	0,00	0,00	1,00	Interessante
Desinteressante	0,00	0,00	1,00	Atrativo
Conservador	0,00	0,00	1,00	Inovador
Incompreensível	0,03	0,00	0,97	Compreensível
Impraticável	0,03	0,03	0,93	Prático
Desagradável	0,07	0,13	0,80	Agradável
Ineficiente	0,07	0,13	0,80	Eficiente
Complicado	0,10	0,13	0,77	Fácil
Aborrecido	0,03	0,20	0,77	Excitante
Incómodo	0,13	0,23	0,63	Cómodo
Obstrutivo	0,07	0,30	0,63	Condutor
Comum	0,10	0,30	0,60	Vanguardista
Imprevisível	0,20	0,33	0,47	Previsível

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Dos 26 pares de adjetivos, em 14 deles a taxa de respostas positivas foi superior a 90%, em 6 deles a taxa de respostas positivas foi superior a 95%. Os adjetivos que receberam mais respostas com quantidade superior a 95% foram: Bom, Motivante, Interessante, Atrativo, Inovador e Compreensível.

Para cada grupo (Ótimo 1 e Ótimo 7) foram gerados os gráficos de Diagrama de Caixas (*box plot*) e Histograma. Para o Grupo Ótimo 1, esses 2 gráficos são apresentados na Figura 47.

Figura 47 – Gráficos Grupo Ótimo 1 para o rádio-relógio: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)

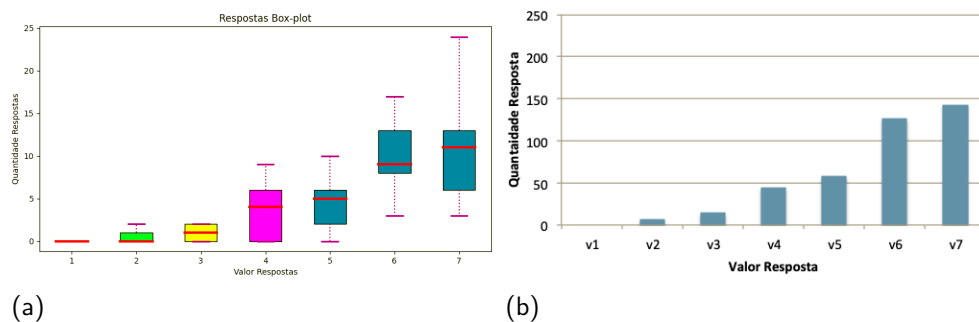


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

É possível perceber, na Figura 47, que os dois gráficos do grupo Ótimo 1 indicam uma quantidade maior de respostas para os valores 1 e 2 do que para os demais valores. No gráfico do Diagrama de Caixas (Figura 47.a), é possível obter diversas métricas. Analisando a resposta 1, ela recebeu o valor máximo de 18 respostas (adjetivos Seguro); o terceiro quartil recebeu o valor de 16 respostas (adjetivos Criativo, De fácil aprendizagem, Motivante); a mediana ficou com 15 respostas (adjetivo Organizado); o primeiro quartil ficou com 10 respostas (adjetivos Valioso e Evidente); e o valor mínimo recebido na resposta 1 foi de 7 respostas (adjetivos Rápido e Atende as expectativas). Os adjetivos e suas quantidades de respostas no valor 1 podem se conferidos na Tabela 11.

O gráfico do histograma (Figura 47.b) indica a quantidade de respostas recebidas em cada um dos 13 adjetivos do grupo em questão, para os 30 voluntários. Analisando a resposta 1 é possível perceber que ela recebeu 175 respostas, de um máximo de 390. Este valor total de possíveis respostas é calculado multiplicando o número de voluntários pelo número de pares. Dessa forma: $total = quantPares * totalVoluntários$, isto é, $total = 13 * 30 = 390$.

Figura 48 – Gráficos Grupo Ótimo 7 para o rádio-relógio: Diagrama de Caixas (a) e Histograma (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 48 apresenta os gráficos de Diagrama de Caixas e do Histograma para o Grupo Ótimo 7. O comportamento dos resultados é inverso ao do Grupo Ótimo 1, indicando uma maior quantidade de respostas para os valores 6 e 7. Contudo, no Grupo Ótimo 7, os valores 6 e 7 representam adjetivos positivos para o experimento.

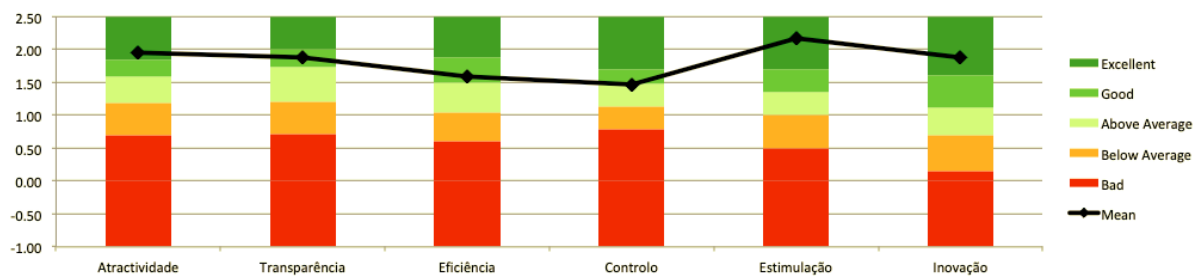
A ferramenta de análise de dados do UEQ foi utilizada para comparar os resultados obtidos com a tabela padrão de referência (*benchmark*) disponibilizada pelo site do UEQ (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHESKI, 2017; SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHESKI, 2022). Os valores das médias obtidas nas respostas do presente estudo de caso foram calculados para os seis grupos (Atratividade, Transparência, Eficiência, Controle, Estimulação, Inovação) (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHESKI, 2017). Conforme apresentado no tópico 4.2.3 METODOLOGIA,

Tabela 13 – Média das respostas nos grupos e comparação ao *benchmark* para o rádio-relógio

Escala	Média	Comparação ao <i>benchmark</i>
Atractividade	1,94	Excelente
Transparência	1,88	Bom
Eficiência	1,58	Bom
Controle	1,47	Acima da média
Estimulação	2,18	Excelente
Inovação	1,88	Excelente

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

o resultado dessa comparação pode ser dividido em 5 escalas de qualidade: Excelente, Bom, Acima da média, Abaixo da média e Ruim. Na presente comparação, 3 grupos ficaram com o resultado Excelente, 2 grupos ficaram na escala Bom e 1 grupo na escala Acima da média. Esses valores das médias são apresentados, para todos os grupos, na Tabela 13.

Figura 49 – Média das respostas nos grupos e comparação ao *benchmark* para o rádio-relógio

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Através da ferramenta de análise de dados também foi gerado o gráfico de Colunas Empilhadas das médias para os seis grupos das possíveis respostas (SCHREPP; HINDERKS; THOMAS-CHEWSKI, 2017). Esse gráfico é exibido na Figura 49 e apresenta as médias do *benchmark* para cada grupo e a comparação com a média obtida no experimento proposto, a qual é destacada pela linha preta entre as colunas. Tanto pelo gráfico como pela Tabela 13, é possível notar que o resultado obtido ficou entre as escalas Excelente, Bom e Acima da média.

5.3 CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

O estudo de caso do Brinquedo Infantil Carro obteve resultados ligeiramente superiores ao do rádio-relógio. Essa diferença pode ser percebida nas Tabelas 10 e 13, as quais apresentam as médias nos seis grupos e indicam em qual escala de qualidade elas estão quando comparadas ao *benchmark* do UEQ.

Isso se deve principalmente à diferença entre a complexidade dos experimentos. No roteiro de execução do experimento do Brinquedo Infantil Carro, as tarefas a serem realizadas são simples, como abrir portas e janelas e girar rodas. Já no roteiro do experimento do rádio-relógio, as atividades são um pouco mais complexas, como selecionar a frequência do rádio, aumentar volume e alterar a hora.

Apesar dessas diferenças, em ambos estudos de caso, a análise do UEQ indica que os experimentos foram bem recebidos pelos voluntários. No Grupo Ótimo 1, a maior parte das respostas foram para os valores 1, 2 e 3; já no grupo Ótimo 7, a maior parte das respostas foram para os valores 5, 6 e 7. Esses resultados apontam que a maioria dos voluntários selecionaram respostas com adjetivos positivos ao experimento; dessa forma, indicam que a experiência foi positiva de forma geral.

A comparação com o *benchmark* é um indicador para saber se o processo proposto oferece uma experiência com o usuário (UX - *User Experience*) satisfatória (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHESKI, 2017). Como os resultados obtidos ficaram na escala de excelente para o estudo de caso do Brinquedo Infantil Carro, e nas escalas Excelente, Bom e Acima da média no estudo de caso do rádio-relógio, podemos inferir que os usuários consideraram que a experiência de usar os protótipos estrutural e funcional foi satisfatória.

6 CONCLUSÃO

Esta seção tem como objetivo apresentar as considerações sobre os principais tópicos abordados nesta tese, incluindo as considerações, as contribuições alcançadas e indicações para trabalhos futuros.

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho foi iniciado através de uma Revisão Sistemática da área de prototipagem rápida interativa em trabalhos que envolvessem Realidade Virtual ou Realidade Aumentada ou Realidade Mista. Essa revisão possibilitou um maior entendimento e conhecimento sobre os principais trabalhos que vinham sendo desenvolvidos nessa área. Também foi possível perceber as principais lacunas que poderiam ser resolvidas.

Como consequência desse estudo, foi proposto um novo processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa combinando impressão 3D e AR, suprimindo algumas das lacunas encontradas. Esse processo foi considerado inovador por trazer algumas contribuições que ainda não haviam sido usadas em conjunto na literatura. Essas contribuições são apresentadas na seção 6.2 CONCLUSÃO.

Os estudos de caso realizados exploram protótipos portáteis, que podem ser colocados nas mãos do usuário.

Esse processo de prototipagem é aplicável na indústria, tendo seu desenvolvimento, aplicação e experimentos realizados de maneira simples. Dessa forma, visa-se uma diminuição do tempo dedicado à prototipagem em produtos, atingindo um menor custo dessa etapa. Contudo, ainda são necessários experimentos dentro de um ambiente industrial.

A análise do UEQ avalia quanto os usuários ficaram satisfeitos, quanto a usabilidade dos protótipos, durante a execução dos estudos de caso, e não diretamente com o processo proposto. Desta forma, o processo foi avaliado parcialmente, para uma avaliação mais direta do processo é necessário acompanhar um ciclo completo de desenvolvimento de um produto na indústria.

6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho propôs um novo processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa (*Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping* (CYPIRP)) para o desenvolvimento de produtos, explorando as vantagens da Realidade Aumentada e da Impressão 3D. Foi proposta e implementada a arquitetura para o sistema da etapa de Experimento do Protótipo. Esse processo foi considerado inovador por combinar essas duas técnicas (AR e Impressão 3D), gerando um protótipo estrutural, funcional e interativo utilizando um processo que ainda não havia sido aplicado na literatura.

Para validar e direcionar essas contribuições, foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre trabalhos na área de prototipagem rápida interativa que utilizam AR e Impressão 3D. Essa revisão possibilitou um melhor entendimento da área e uma proposta de processo de prototipagem rápida visando suprir algumas das lacunas encontradas nos trabalhos analisados.

Das contribuições específicas do processo cíclico CYPIRP, tem-se:

- Um processo cíclico que permite o refinamento do processo de desenvolvimento de um produto, em vários ciclos.
- Uma etapa de criação do protótipo que gera um protótipo estrutural e outro funcional com o mapeamento das regiões de ações e das reações que o protótipo pode executar.
- Experimento de prototipagem em um único dispositivo, com uma única câmera de vídeo, gerando um sistema de testes de simples configuração;
- Uma etapa de experimento do protótipo que possibilita um experimento diretamente com as mãos, possibilitando manipulação do protótipo utilizando os dedos, sem necessidade de luvas ou marcadores especiais;
- Rastreamento do objeto de interesse sem a necessidade de marcadores AR tradicionais. Isto é, o próprio objeto impresso em 3D foi utilizado como marcador.

Dos objetivos propostos, todos foram atingidos, dentre eles:

- Definiu-se um novo processo de prototipagem rápida estrutural, funcional e interativa;
- Definiu-se a arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo;

- Desenvolveu-se o sistema que implementa a arquitetura da etapa de Experimento do Protótipo;
- Desenvolveu-se dois estudos de caso;
- Analisou-se o estudo de caso por meio da aplicação do questionário UEQ;
- O processo foi testado e validado.

A validação do processo proposto foi realizada através de testes por usuários. Um grupo de 30 usuários realizaram o experimento do protótipo e, em seguida, respondeu ao questionário UEQ (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHEWSKI, 2017). As respostas foram analisadas e pode-se inferir que o processo teve uma boa receptividade, atingindo médias de satisfação excelentes no *benchmark* do UEQ, ficando entre os 10% dos melhores resultados. Isso significa que o nível de satisfação médio dos usuários durante o experimento do protótipo foi excelente.

6.3 PRINCIPAIS DIFICULDADES

Algumas dificuldades foram encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho. No início do desenvolvimento do sistema de experimento do protótipo, foi definido que a biblioteca de AR a ser utilizada seria a Vuforia (VUFORIA, 2020) na plataforma Unity (UNITY, 2022). Após essa decisão, foram encontradas algumas dificuldades, principalmente em relação ao tipo de marcador AR a ser utilizado, à forma de detecção da mão do usuário sobre o protótipo e, também, relacionada à oclusão da mão do usuário sobre o protótipo. Esses pontos são detalhados a seguir.

- Definição do marcador AR. Foram realizados testes com os seguintes tipos de marcadores: objetos 3D, marcadores-imagem pequenos em relação ao protótipo estrutural e marcadores-imagem do tamanho do protótipo estrutural. Os testes com o marcador objeto 3D utilizaram como marcador o próprio modelo 3D do protótipo. Contudo, esse marcador não obteve bons resultados práticos, pois o modelo 3D não teve uma boa detecção. Para o teste com o marcador-imagem pequeno, foi utilizado um QR code. Ele era detectado, mas pequenas oclusões do marcador faziam com que sua detecção fosse perdida. O terceiro teste foi com o marcador-imagem grande, utilizando uma foto do próprio protótipo como marcador. Este foi o que apresentou resultados mais robustos,

suportando que parte do marcador fosse oclusa pela mão do usuário, sem deixar de ser detectado. Dessa forma, decidiu-se pela utilização do último marcador.

- Detecção da mão do usuário sobre a região de interatividade. Foi iniciada a implementação de um algoritmo de segmentação da região de pele, visando a detecção da mão do usuário. Em seguida, foi acrescentado um algoritmo de detecção das extremidades dessa região da mão. O propósito era localizar a posição xy da ponta dos dedos da mão do usuário e, a partir disso, reconhecer a interação com o objeto. No entanto, ao longo desse desenvolvimento, também foram realizados testes com o botão virtual da Vuforia (VUFORIA, 2020), os quais se mostraram promissores. Dessa maneira, o desenvolvimento de um algoritmo próprio foi pausado, e foram priorizados os botões virtuais. Porém, esses botões funcionam detectando sub-regiões do marcador que estão sendo oclusas pelos dedos do usuário. Para essa detecção funcionar corretamente, é necessário que o marcador possua elementos suficientes para que seja possível detectar que elas foram oclusas pelo dedo do usuário. Para adicionar mais elementos ao marcador do protótipo estrutural, a este foram adicionadas marcações manuais, conforme apresentado na Figura 34. Essas marcações tornaram o uso dos botões virtuais possível e com uma boa usabilidade.
- Oclusão do protótipo funcional. Inicialmente, o usuário, ao interagir com o protótipo estrutural e funcional, tinha sua mão sobreposta pelo protótipo funcional, conforme apresentado na Figura 29.(a). Isso acontecia, pois a oclusão da informação virtual da AR não estava sendo implementada. Para resolver esse problema, foi aplicado um algoritmo de segmentação da região da mão do usuário, a partir de um algoritmo de detecção de tons de pele. Em seguida, a região da mão detectada foi redesenhada sobre o protótipo funcional na mesma posição onde ela estava sendo sobreposta. Dessa forma, a oclusão da informação virtual foi aplicada, obtendo-se o comportamento esperado, conforme exemplificado na Figura 29.(b).
- Definição da cor do protótipo estrutural. De início, o protótipo estrutural foi impresso em 3D na cor roxa. Contudo, ao realizar o algoritmo de segmentação da região da mão do usuário, algumas partes do protótipo eram confundidas com a região da mão. Assim, decidiu-se mudar a cor do protótipo estrutural para o tom verde, imprimindo-se um novo exemplar. A cor verde foi escolhida por ser uma tonalidade que dificilmente se encontra na pele humana.

6.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho de pesquisa descrito nesta tese, lista-se, nesta seção, propostas de trabalhos futuros a serem realizados.

- Realizar mais estudos de caso. Dessa forma, os experimentos com diferentes tipos protótipos poderão gerar uma melhor observação do processo proposto.
- Realizar o experimento com um grupo de voluntários da indústria. Estes poderão dar uma avaliação do processo proposto com enfoque nos processos industriais. Desta forma, será possível verificar se a redução de tempo e custo no desenvolvimento de produtos industriais realmente ocorre.
- Aplicar o processo a produtos grandes, e não apenas a produtos manuais. Um desafio desse processo é que será necessária a geração de um protótipo estrutural grande, no tamanho real do produto, impresso em 3D, e as impressoras 3D atuais têm limitações em relação ao tamanho máximo das peças que podem ser produzidas (SCOPIGNO et al., 2017).
- Utilizar outras técnicas de fabricação 3D para o protótipo estrutural. Foi utilizada a impressão 3D, contudo, outras formas, como Fresadoras *Computer Numerical Control* (CNC), poderiam ser aplicadas.
- Testar outros tipos de marcadores de AR. Atualmente está sendo utilizado marcador-imagem, marcadores baseados em objetos 3D poderiam ser analisados.
- Experimentar novas formas de interação com o protótipo além dos botões virtuais da biblioteca Vuforia. Utilizar a detecção dos dedos diretamente, sem o uso dos botões virtuais.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prototipagem rápida mostrou-se ser uma área de pesquisa ainda em aberto, e algumas das lacunas encontradas foram supridas no presente trabalho.

Foi proposto um Processo Cíclico de Prototipagem Rápida Interativa batizado de CYPIRP, o qual propõe um processo de prototipagem estrutural e funcional de forma simples e interativa,

focando na interação tangível do usuário com o protótipo e na configuração de um experimento completo em um único dispositivo.

Um artigo com parte do trabalho desenvolvido, incluindo o processo de prototipagem proposto nesta tese, foi publicado na revista *Journal on Interactive Systems* (OMAIA; CORREIA; SANTOS, 2024), mostrando que o trabalho já foi avaliado por pareceristas externos. O artigo citado encontra-se no Apêndice I deste documento.

Os experimentos realizados com usuários foram avaliados através do questionário UEQ (SCHREPP; HINDERKS; THOMASCHESKI, 2017), e a análise do questionário apresentou resultados com desempenho considerado excelente quando comparados à tabela padrão de referência (*benchmark*) do UEQ. Sendo assim, as expectativas do presente trabalho foram atingidas, demonstrando que o processo proposto é aplicável devido à sua alta receptividade, tornando a fase de prototipagem industrial mais rápida, eficiente e concisa.

REFERÊNCIAS

- 3D HUBS. *3D Printing vs. CNC machining*. 2020. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining/>>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- ABULRUB, A. H. G.; ATTRIDGE, A. N.; WILLIAMS, M. A. Virtual reality in engineering education: The future of creative learning. In: *2011 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 751–757. ISSN 2165-9559.
- ACIOLY, A. d. S. G. *A realidade aumentada como ferramenta para orientação de uso e segurança em embalagens*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- AKAOKA, E.; GINN, T.; VERTEGAAL, R. Displayobjects: Prototyping functional physical interfaces on 3d styrofoam, paper or cardboard models. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. New York, NY, USA: ACM, 2010. (TEI '10), p. 49–56. ISBN 978-1-60558-841-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1709886.1709897>>.
- ALEXANDER, C. et al. *Value proposition development of early stage computational fluid dynamics analysis in automotive product development*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- AN, S.-G.; KIM, Y.; LEE, J. H.; BAE, S.-H. Collaborative experience prototyping of automotive interior in vr with 3d sketching and haptic helpers. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York, NY, USA: ACM, 2017. (AutomotiveUI '17), p. 183–192. ISBN 978-1-4503-5150-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3122986.3123002>>.
- APPLE Vision Pro - Apple. 2024. <<https://www.apple.com/apple-vision-pro/>>. [Online; accessed 01-June-2024].
- ARCORE GOOGLE. *Build new augmented reality experiences that seamlessly blend the digital and physical worlds | ARCore | Google for Developers*. 2024. Disponível em: <<https://developers.google.com/ar>>. Acesso em: 23 march. 2024.
- ARRIGHI, P.-A.; MOUGENOT, C. Towards user empowerment in product design: a mixed reality tool for interactive virtual prototyping. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 30, n. 2, p. 743–754, Feb 2019. ISSN 1572-8145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10845-016-1276-0>>.
- BALCISOY, S.; KALLMANN, M.; FUA, P.; THALMANN, D. A framework for rapid evaluation of prototypes with augmented reality. In: ACM. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. [S.l.], 2000. p. 61–66.
- BARROS, A. M.; MICHEL, M.; MOLINE, Y.; CORRE, G.; CARREL, F. A comprehensive survey of visual slam algorithms. *Robotics*, MDPI, v. 11, n. 1, 2022. ISSN 2218-6581. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2218-6581/11/1/24>>.
- BAXTER, M. *Product design: A practical guide to systematic methods of new product development*. [S.l.]: Chapman and Hall, London, 1995.

Bose, C. B.; Amir, J. Design of fiducials for accurate registration using machine vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 12, n. 12, p. 1196–1200, Dec 1990. ISSN 1939-3539.

BROOKE, J. Sus: a 'quick and dirty' usability. *Usability evaluation in industry*, v. 189, 1996.

BROWN, T. *Design thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias*. Alta Books, 2020. ISBN 9788550814360. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R94A0AEACAAJ>>.

CHOI, S.; CHAN, A. A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, v. 36, n. 5, p. 401 – 412, 2004. ISSN 0010-4485. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448503001106>>.

COOPER, R. G. *Winning at New Products: Creating Value Through Innovation*. Basic Books, 2011. ISBN 9780465025848. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Bo9VDgAAQBAJ>>.

EASYAR. *EasyAR Sense*. 2020. Disponível em: <<https://www.easyar.com/>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

FERNANDES, A. S.; WANG, R. F.; SIMONS, D. J. Remembering the physical as virtual: Source confusion and physical interaction in augmented reality. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*. New York, NY, USA: ACM, 2015. (SAP '15), p. 127–130. ISBN 978-1-4503-3812-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2804408.2804423>>.

FOLLMER, S. S. W. *Remixing physical objects through tangible tools*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2011.

FURHT, B. *Handbook of augmented reality*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

GEAR Vr (2015), Virtual Reality Support. 2024. <<https://www.samsung.com/us/support/mobile/virtual-reality/gear-vr/gear-vr-2015/>>. [Online; accessed 01-June-2024].

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. [S.l.]: Springer, 2014.

GIESER, S. N.; GENTRY, C.; LEPAGE, J.; MAKEDON, F. Comparing objective and subjective metrics between physical and virtual tasks. In: LACKEY, S.; SHUMAKER, R. (Ed.). *Virtual, Augmented and Mixed Reality: 8th International Conference, VAMR 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016. Proceedings*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 3–13. ISBN 978-3-319-39907-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_1>.

GOOGLE Cardboard - Google VR. 2024. <<https://arvr.google.com/cardboard/>>. [Online; accessed 01-June-2024].

GOOGLE Glass. 2020. <<https://google.com/glass>>. [Online; accessed 01-March-2020].

GUPTA, A.; CHAUDHARY, A. Robust skin segmentation using color space switching. *Pattern Recognition and Image Analysis*, Springer, v. 26, n. 1, p. 61–68, 2016.

HAAS AUTOMATION. *UMC-750 - Service - General Information*. 2020. Disponível em: <<https://aemqas.haascnc.com/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/umc-750---service---general-information.html>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

HARA, M.; WATABE, M.; NOJIRI, T.; NAGAYA, T.; UCHIYAMA, Y. *Optically readable two-dimensional code and method and apparatus using the same*. [S.l.]: Google Patents, 1998. US Patent 5,726,435.

HASSENZAHN, M.; BURMEISTER, M.; KOLLER, F. Attrakdiff: Ein fragebogen zur messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer qualität. In: _____. *Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003. p. 187–196. ISBN 978-3-322-80058-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-322-80058-9_19>.

HUGHES-WARD, D. *Making Connections 3D printing, Libraries and augmenting their reality*. Dissertação (Mestrado) — School of Design, 2016.

JAILUNGKA, P.; CHAROENSEANG, S. Intuitive 3d model prototyping with leap motion and microsoft hololens. In: SPRINGER. *International Conference on Human-Computer Interaction*. [S.l.], 2018. p. 269–284.

KALKOFEN, D.; SANDOR, C.; WHITE, S.; SCHMALSTIEG, D. Visualization techniques for augmented reality. In: *Handbook of Augmented Reality*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 65–98.

KATAKURA, S.; WATANABE, K. Protohole: Prototyping interactive 3d printed objects using holes and acoustic sensing. In: *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2018. (CHI EA '18), p. LBW112:1–LBW112:6. ISBN 978-1-4503-5621-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3170427.3188471>>.

KHAN, T.; JOHNSTON, K.; OPHOFF, J. The impact of an augmented reality application on learning motivation of students. *Advances in Human-Computer Interaction*, Hindawi, v. 2019, p. 7208494, Feb 2019. ISSN 1687-5893. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2019/7208494>>.

KIM, S.; DEY, A. K. Ar interfacing with prototype 3d applications based on user-centered interactivity. *Computer-Aided Design*, v. 42, n. 5, p. 373 – 386, 2010. ISSN 0010-4485. Advanced and Emerging Virtual and Augmented Reality Technologies in Product Design. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001044850800198X>>.

KIRAKOWSKI, J.; CORBETT, M. Sumi: The software usability measurement inventory. *British journal of educational technology*, Wiley Online Library, v. 24, n. 3, p. 210–212, 1993.

KIRNER, C.; ZORZAL, E. R. Aplicações educacionais em ambientes colaborativos com realidade aumentada. In: *Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação-SBIE)*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, n. 1, p. 114–124.

KOVAC, J.; PEER, P.; SOLINA, F. *Human skin color clustering for face detection*. [S.l.]: IEEE, 2003. v. 2.

LAUGWITZ, B.; HELD, T.; SCHREPP, M. Construction and evaluation of a user experience questionnaire. In: HOLZINGER, A. (Ed.). *HCI and Usability for Education and Work*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 63–76. ISBN 978-3-540-89350-9.

- LEE, S. S. *Blender*. [S.l.]: Google Patents, 2008. US Patent App. 29/305,015.
- LEE, W.; PARK, J. Augmented foam: A tangible augmented reality for product design. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings of the 4th IEEE/ACM international symposium on mixed and augmented reality*. [S.l.], 2005. p. 106–109.
- LEITE, J. V. de F.; TEIXEIRA, J. M. X. N.; TEICHRIEB, V. Optimizing 3d object visualization on the web. In: _____. *Virtual, Augmented and Mixed Reality: 8th International Conference, VAMR 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016. Proceedings*. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 287–298. ISBN 978-3-319-39907-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_27>.
- LEWIS, J. R. Psychometric evaluation of the pssuq using data from five years of usability studies. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 14, n. 3-4, p. 463–488, 2002.
- MACDONALD, E.; SALAS, R.; ESPALIN, D.; PEREZ, M.; AGUILERA, E.; MUSE, D.; WICKER, R. B. 3d printing for the rapid prototyping of structural electronics. *IEEE access*, IEEE, v. 2, p. 234–242, 2014.
- MACHADO, L. d. S. *A realidade virtual no modelamento e simulação de procedimentos invasivos em oncologia pediátrica: um estudo de caso no transplante de medula óssea*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.
- MANTOVA, A. R.; FERREIRA, A. C. M.; LANDIM, P. da C.; MARAR, J. F. Escala dos questionários para análise da experiência do usuário: Estudo preliminar. *Blucher Design Proceedings*, v. 2, n. 9, p. 1130–1137, 2016.
- MARNER, M. R.; SMITH, R. T.; PORTER, S. R.; BROECKER, M. M.; CLOSE, B.; THOMAS, B. H. Large scale spatial augmented reality for design and prototyping. In: *Handbook of Augmented Reality*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 231–254.
- META Quest | Meta. 2024. <<https://about.meta.com/technologies/meta-quest>>. [Online; accessed 01-June-2024].
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 77, n. 12, p. 1321–1329, 1994.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros (7nd ed.)*. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2021. ISBN 978-8521637332.
- MOROZOVA, A.; RHEINSTÄDTER, V.; WALLACH, D. Mixedux: A mixed prototyping framework for usability testing in augmented reality. In: *Companion Publication of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference 2019 Companion*. New York, NY, USA: ACM, 2019. (DIS '19 Companion), p. 41–44. ISBN 978-1-4503-6270-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3301019.3325146>>.
- MOTION, L. Leap motion controller. URL: <https://www.leapmotion.com>, 2015.
- NAGTA, A.; SHARMA, B.; SHEENA; SHARMA, A. Oculus: A new dimension to virtual reality. In: *2022 International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1169–1172.

NAJI, S.; JALAB, H. A.; KAREEM, S. A. A survey on skin detection in colored images. *Artificial Intelligence Review*, Springer, v. 52, n. 2, p. 1041–1087, 2019.

NEBELING, M.; MADIER, K. 360proto: Making interactive virtual reality & augmented reality prototypes from paper. In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2019. (CHI '19), p. 596:1–596:13. ISBN 978-1-4503-5970-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3290605.3300826>>.

NOORANI, R. *Rapid prototyping: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons Incorporated, 2006.

OCULUS Rift S: PC-Powered VR Gaming Headset | Oculus. 2024. <<https://www.oculus.com/rift-s/>>. [Online; accessed 01-June-2024].

OMAIA, D. *3D Car Toy Prototype using the CYPIRP*. 2023. <<https://www.youtube.com/watch?v=q7QNOgbb04Q>>. [Online; accessed 01-September-2023]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=q7QNOgbb04Q>>.

OMAIA, D. *3DCar-CYPIRP GitHub*. [S.l.]: GitHub, 2023. <<https://github.com/derzu/3DCar-CYPIRP>>. [Online; accessed 01-September-2023].

OMAIA, D. *3D Clock Radio Prototype using the CYPIRP*. 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=d_Ql1AOwocw>. [Online; accessed 01-June-2024]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=d_Ql1AOwocw>.

OMAIA, D. *Radio-CYPIRP GitHub*. 2024. <<https://github.com/derzu/Radio-CYPIRP>>. [Online; accessed 01-June-2024].

OMAIA, D.; CORREIA, W. F. M.; SANTOS, A. L. M. Interactive rapid prototyping combining 3d printing and augmented reality. *Journal on Interactive Systems*, v. 15, n. 1, p. 20–35, Jan. 2024. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/journals/index.php/jis/article/view/3534>>.

ONG, S. K.; YUAN, M. L.; NEE, A. Y. C. Augmented reality applications in manufacturing: a survey. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 46, n. 10, p. 2707–2742, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207540601064773>>.

PARK, H.; MOON, H.-C.; LEE, J. Y. Tangible augmented prototyping of digital handheld products. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 60, n. 2, p. 114–125, 2009.

PARK, H.; PARK, J.-I. Invisible marker-based augmented reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 26, n. 9, p. 829–848, Aug 2010. ISSN 1044-7318. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10447318.2010.496335>>.

PARK, J.-S. Ar-room: a rapid prototyping framework for augmented reality applications. *Multimedia Tools and Applications*, v. 55, n. 3, p. 725–746, Dec 2011. ISSN 1573-7721. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11042-010-0592-1>>.

PENG, H.; BRIGGS, J.; WANG, C.-Y.; GUO, K.; KIDER, J.; MUELLER, S.; BAUDISCH, P.; GUIMBRETIERE, F. Roma: Interactive fabrication with augmented reality and a robotic 3d printer. In: ACM. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.], 2018. p. 579.

PORTER, S. R.; MARNER, M. R.; SMITH, R. T.; ZUCCO, J. E.; THOMAS, B. H. Validating spatial augmented reality for interactive rapid prototyping. In: *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 265–266.

PUNCHOOJIT, L.; HONGWARITTORN, N. Usability studies on mobile user interface design patterns: A systematic literature review. *Advances in Human-Computer Interaction*, Hindawi, v. 2017, p. 6787504, Nov 2017. ISSN 1687-5893. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/6787504>>.

RAUSCHENBERGER, M.; SCHREPP, M.; PEREZ-COTA, M.; OLSCHNER, S.; THOMASCHEWSKI, J. Efficient measurement of the user experience of interactive products. how to use the user experience questionnaire (ueq).example: Spanish language version. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, v. 2, n. 1, p. 39–45, 03/2013 2013. ISSN 1989-1660. Disponível em: <http://www.ijimai.org/journal/sites/default/files/files/2013/03/ijimai20132_15_pdf_35685.pdf>.

Sá, M. de; CHURCHILL, E. Mobile augmented reality: Exploring design and prototyping techniques. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*. New York, NY, USA: ACM, 2012. (MobileHCI '12), p. 221–230. ISBN 978-1-4503-1105-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2371574.2371608>>.

SANTOS, D. L. F.; LUCENA, A. N. de; PEREIRA, D. d. S.; MELO, J. C. de. O estado da arte das simulações militares. In: SBC. *Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames)*. [S.l.], 2022. p. 785–795.

SAURO, J.; LEWIS, J. R. *Quantifying the user experience: Practical statistics for user research*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2016.

SCHREPP, M.; HINDERKS, A.; THOMASCHEWSKI, J. Construction of a benchmark for the user experience questionnaire (ueq). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, v. 4, p. 40–44, 06 2017.

SCHREPP, M.; HINDERKS, A.; THOMASCHEWSKI, J. *User Experience Questionnaire (UEQ)*. 2022. <<https://www.ueq-online.org>>. [Online; accessed 30-June-2022].

SCOPIGNO, R.; CIGNONI, P.; PIETRONI, N.; CALLIERI, M.; DELLEPIANE, M. Digital fabrication techniques for cultural heritage: A survey. *Computer Graphics Forum*, v. 36, n. 1, p. 6–21, 2017. ISSN 1467-8659. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/cgf.12781>>.

SHEN, Y.; ONG, S.; NEE, A. Y. Augmented reality for collaborative product design and development. *Design studies*, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 118–145, 2010.

SHEN, Y.; ONG, S. K.; NEE, A. Y. C. Vision-based hand interaction in augmented reality environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 27, n. 6, p. 523–544, Jun 2011. ISSN 1044-7318. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10447318.2011.555297>>.

SIMÕES, F.; BEZERRA, M.; TEIXEIRA, J. M.; CORREIA, W.; TEICHRIEB, V. A user perspective analysis on augmented vs 3d printed prototypes for product's project design. In: *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 71–80.

SIMON, T. *Tangible Spatial Augmented Reality in Rapid Prototyping: Multiple and differential tangible object manipulation and interaction*. 2012.

Stocklein, J.; Geiger, C.; Paelke, V.; Pogscheba, P. Poster: Mvce - a design pattern to guide the development of next generation user interfaces. In: *2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 153–154. ISSN null.

STÖCKLEIN, J.; POGSCHEBA, P.; GEIGER, C.; PAELKE, V. Mireas: A mixed reality software framework for iterative prototyping of control strategies for an indoor airship. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*. New York, NY, USA: ACM, 2010. (AFRIGRAPH '10), p. 27–36. ISBN 978-1-4503-0118-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1811158.1811164>>.

TEIXEIRA, J. M.; BARROS, G.; TEICHRIEB, V.; CORREIA, W. F. 3d printing as a means for augmenting existing surfaces. In: *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 24–28.

TORI, R.; HOUNSELL, M. da S. *Introdução a realidade virtual e aumentada*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação, 2020.

TZIOUVARA, I. *Integration of 3D tracking systems for Interaction in Spatial Augmented Reality*. Dissertação (Mestrado) — Computer Science: Media and Knowledge Engineering (EEMCS) (TU Delft), 2012.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D.; YANG, M. C. *Product design and development*. [S.l.]: McGraw-hill, 2019. ISBN 9781260043655.

UNITY. *Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D VR & AR Engine*. 2022. Disponível em: <<https://unity.com/>>. Acesso em: 6 feb. 2022.

U.S. Army to use HoloLens technology in high-tech headsets for soldiers. 2024. <<https://news.microsoft.com/source/features/digital-transformation/u-s-army-to-use-hololens-technology-in-high-tech-headsets-for-soldiers/>>. [Online; accessed 01-June-2024].

VERLINDEN, J. *Developing an Interactive Augmented Prototyping Methodology to Support Design Reviews*. Tese (urn:NBN:nl:ui:24-uuid:253876ef-b158-4aa1-b39a-7d35fd76f753) — TU Delft, Delft University of Technology, 2014. Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:253876ef-b158-4aa1-b39a-7d35fd76f753>>.

VEZHNEVETS, V.; SAZONOV, V.; ANDREEVA, A. A survey on pixel-based skin color detection techniques. In: MOSCOW, RUSSIA. *Proc. Graphicon*. [S.l.], 2003. v. 3, p. 85–92.

VIRO MEDIA. *Viro Media*. 2020. Disponível em: <<https://viromedia.com/>>. Acesso em: 18 feb. 2020.

VUFORIA. *Vuforia Developer Portal*. 2020. Disponível em: <<https://developer.vuforia.com/>>. Acesso em: 18 feb. 2020.

WEICHEL, C. *Mixed physical and virtual design environments for digital fabrication*. Tese (Doutorado) — Lancaster University, 2016.

WEICHEL, C.; LAU, M.; KIM, D.; VILLAR, N.; GELLERSEN, H. W. Mixfab: A mixed-reality environment for personal fabrication. In: *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2014. (CHI '14), p. 3855–3864. ISBN 978-1-4503-2473-1. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2557090>>.

WILLIS, A.; SPEICHER, J.; COOPER, D. B. Rapid prototyping 3d objects from scanned measurement data. *Image and Vision Computing*, Elsevier, v. 25, n. 7, p. 1174–1184, 2007.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, 2012.

WYK, E. van; VILLIERS, R. de. Virtual reality training applications for the mining industry. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*. New York, NY, USA: ACM, 2009. (AFRIGRAPH '09), p. 53–63. ISBN 978-1-60558-428-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1503454.1503465>>.

YAN, W. Augmented reality instructions for construction toys enabled by accurate model registration and realistic object/hand occlusions. *Virtual reality*, Springer, v. 26, n. 2, p. 465–478, 2022.

YEE, B.; NING, Y.; LIPSON, H. Augmented reality in-situ 3d sketching of physical objects. In: CITESEER. *Intelligent UI workshop on sketch recognition*. [S.l.], 2009. v. 1, n. 2.

ZAMPELIS, D.; LOUDON, G.; GILL, S.; WALKER, D. Iris: augmented reality in rapid prototyping. In: *Proceedings of the 13th rapid design, prototyping & manufacturing conference*. Lancaster University, Lancaster. [S.l.: s.n.], 2012.

ZHANG, Y.; KWOK, T.-H. Design and interaction interface using augmented reality for smart manufacturing. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 26, p. 1278–1286, 2018.

ZORRIASSATINE, F.; WYKES, C.; PARKIN, R.; GINDY, N. A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 217, n. 4, p. 513–530, 2003.

APÊNDICE B – ARTIGO PUBLICADO

Journal on Interactive Systems, 2024, 15:1, doi: 10.5753/jis.2024.3534
 © This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Interactive rapid prototyping combining 3D Printing and Augmented Reality

Derzu Omaia  [Federal University of Pernambuco | do@cin.ufpe.br]
 Walter F. M. Correia  [Federal University of Pernambuco | walter.franklin@ufpe.br]
 Andre L. M. Santos  [Federal University of Pernambuco | alms@cin.ufpe.br]

 Informatic Center, Federal University of Pernambuco, Av. Jornalista Anibal Fernandes, s/n, Cidade Universitária (Campus Recife), Recife, PE, 50740-560, Brazil.

Received: 10 July 2023 • Accepted: 25 October 2023 • Published: 01 January 2024

Abstract In the development of new products by the industry, a rapid prototyping stage is recommended so that an initial version of the product can be evaluated. In this way, any necessary corrections can be applied while still in the prototyping stage, preventing design errors from reaching the final product. Augmented Reality (AR) and 3D Printing are techniques that have become ubiquitous in recent years due to the reduction of equipment costs. Several works in the area of rapid prototyping have been developed with one of these techniques in isolation; a few works have tried to unite these two tools. In this work, we propose a new functional rapid prototyping process, combining 3D Printing and AR to create functional interactive prototypes. This process is accomplished by projecting the AR onto the 3D-printed prototype. It interprets the user's gestures on the physical prototype, converting clicks and touches into actions to be executed on the AR virtual prototype, making the prototype functional and interactive. The proposed system is evaluated by means of case studies and the application of the UEQ (User Experience Questionnaire) to users who have tested the system. This way, it is possible to evaluate the relevance of the proposed process.

Keywords: Augmented Reality, Virtual Reality, Interactive Rapid Prototyping, 3D Printing

1 Introduction

The manufacturing of a product by industry is increasingly automated, thus less dependent on human intervention. However, during the development of a new product there is usually a prototype testing and evaluation stage [Noorani, 2006] which requires human mediation. Some users test and evaluate an initial version of the product and the results are used to make any necessary corrections, preventing design errors from reaching the final product. The cost of the prototype development stage is proportional to its duration, which can take days or months, therefore it is essential to shorten its length to reduce the final cost [Teixeira *et al.*, 2016; Gibson *et al.*, 2014].

Rapid prototyping can be classified into: structural, functional, and structural and functional. In structural, appearance, shape, and fit are evaluated. In Functional, product functionality is considered, which can be mechanical, electrical, or digital. Structural and functional prototypes have combined characteristics of the two categories mentioned above [Baxter, 1995; Zorriassatine *et al.*, 2003; Alexander *et al.*, 2009].

The structural prototyping process is the simplest process because it requires only the 3D model of the product, which is built with design aid software (Computer-Aided Design - CAD) and physically produced using some digital manufacturing technique. The size and shape of the prototype must be equivalent to the final product [Alexander *et al.*, 2009].

The purely functional prototypes can be physical or virtual. If physical, functionalities must be present, but their size and shape do not need to match the final product. If virtual, they

can make use of Virtual Reality (VR) or Augmented Reality (AR) for interaction and display of their functionalities [Zorriassatine *et al.*, 2003; Alexander *et al.*, 2009].

Structural and functional prototyping is the most costly because functionalities need to be added to a physical prototype. These functionalities can be mechanical, electrical, or digital. For mechanical functionalities, the digital prototype manufacturing process has separate parts, which must be fitted together to finalize the prototype [Zorriassatine *et al.*, 2003; Alexander *et al.*, 2009]. If functionalities are electrical or digital, specific processes must be applied to complete the prototype. Katakura and Watanabe [2018] use hollow buttons, where clicks generate sounds that are detected by a circuit. Simon [2012] uses RFID sensors in control interfaces. Macdonald *et al.* [2014] uses 3D printing to produce the prototype integrated into a circuit, allowing the prototype to have electrical functionalities such as lights. For digital functionalities, VR and AR can be used.

VR is the simulation of a 3D environment by computer systems so that it is possible to visualize and manipulate 3D models in these environments. In rapid prototyping, VR is used mainly for prototype generation and visualization; however, some works, e.g. Balcisoy *et al.* [2000], use VR in functional prototyping, where it is possible to interact with these prototypes using some interaction device, such as mouse or keyboard [Balcisoy *et al.*, 2000; Zorriassatine *et al.*, 2003].

AR is a mechanism for viewing, directly or indirectly, in real-time, a natural physical environment over which computer-generated virtual information is added. AR aims to enrich the user's experience by integrating virtual elements

with the real world view, increasing the user's perception and interaction with the environment [Furht, 2011; Khan *et al.*, 2019]. It can be used in the most diverse areas and applications, and has been widely used in industry, for which several works have been proposed in the prototyping area [Choi and Chan, 2004; Simões *et al.*, 2016; Porter *et al.*, 2010; Abulrub *et al.*, 2011].

In AR, the 3D model of the prototype can be integrated into the real environment using AR visualization devices, such as glasses, visors, or special helmets. The prototype can then be positioned somewhere in the surroundings or in the user's hands, although it is only virtually present. The drawback is that most of the time, this type of visualization of the prototype grants limited manipulation, allowing only basic operations such as rotation and scaling of the 3D model, therefore the prototype remains non-functional. Nevertheless, it is possible to add functionalities to the prototype in AR, thus generating functional prototypes [Tziouvara, 2012].

Another tool for rapid product prototyping is 3D printing. This method has become popular in recent years due to the decrease in the costs of acquiring 3D printers and their inputs [Gibson *et al.*, 2014; Leite *et al.*, 2016]. One of the advantages of this method is that a physical 3D object is generated in the real environment; the user can interact visually and with the sense of touch. The acceptability of the prototype depends heavily on the tactile and haptic sensation that the user feels when interacting with the prototype [Simon, 2012]. The prototypes generated are usually only structural; however, moving parts can be added by printing them separately and then fitting them together, making the prototype structural and functional. The inconvenience of most popular printers, which use Fusion Deposition Modeling (FDM) technology, is that they usually print in a single color, not allowing surfaces to be printed in their original colors, causing some details of the object to be missed [Gibson *et al.*, 2014].

One problem encountered in the prototyping stage is that most prototypes used are only structural, not allowing a detailed product evaluation. Structural and functional prototypes are a minority, and those produced generally do not cover all the product's functionalities, many being restricted to mechanical functionalities only. Thus, some design errors may not be noticed at this stage and will only be detected in the final product [Zorriassatine *et al.*, 2003; Alexander *et al.*, 2009]. Few works propose to develop structural and functional prototypes covering most of the product functionalities [Park *et al.*, 2009]. Thus, this type of prototype is still little explored by the industry because the proposed techniques are not simple to implement and do not cover the product functionalities completely.

After the 3D model of the prototype has already been designed, the cost of prototyping using AR or 3D printing is minimal. It is possible to combine the two methods, taking advantage of both. This way, the user can touch the 3D printed physical object, have the sense of touch immersed in the experience, and benefit from the AR features, which allows the prototype to have an appearance and interactive behavior like a final product. However, few works have been developed combining these two areas [Fernandes *et al.*, 2015; Gieser *et al.*, 2016; Simões *et al.*, 2016]. Using AR and 3D Printing to generate functional and interactive prototypes

were found only the works of Park *et al.* [2009] and Verlinden [2014]. Therefore, this is a promising research area that has several challenges to be explored.

The work of Park *et al.* [2009] presents a rapid prototyping system for portable products using physical models and AR. The physical model is 3D printed and the AR model is positioned to overlap the physical model. It is possible to interact with the model using a physical pointer which has a marker to be perceived in AR. Using the pointer the user performs clicks and touches on the 3D model, and the result of these actions is displayed in the AR. The visualization of the system is done on a PC, and a webcam is positioned on the user's head. The main contribution is interacting directly with the physical prototype and in the AR. The inconvenience is the need to use a pointer [Park *et al.*, 2009].

Verlinden [2014] work proposes an AR prototyping methodology, where AR is superimposed on a physical prototype using a projector. Powered by a camera, the system locates the prototype and projects some texture onto it. It is possible to interact with the prototypes by moving them directly on the table or using a touch screen controller [Verlinden, 2014].

The two cited works above contribute with approaches that generate structural and functional prototypes. There are, however, several points to be improved - such as the need for physical pointers for interaction, the use of more than one device in the testing environment, among others - aiming for a more comprehensive solution to the problem of experimenting with a functional prototype in industry.

The present work fills gaps found in related works. It presents a new process of rapid prototyping in which the generated prototypes are structural and functional, allowing functionalities of the final product to be tested while in the initial prototyping phase.

The general goal of this work is to propose a cyclic process of interactive, functional, and structural rapid prototyping (CYPIRP) for product development, exploring the isolated advantages of AR and 3D Printing and combining them to generate a synergistic process.

To accomplish this, a structural and functional prototype is produced. Initially, the physical prototype is 3D printed; the functionalities are implemented in AR; then the prototype is tested by the user according to the experiment protocol. Finally, the results are analyzed, and, if necessary, all these steps can be redone until obtaining the prototype with the expected behavior.

This work has as main contribution the development of a cyclic process of rapid interactive prototyping. This allows new products to be planned, developed, and evaluated in a shorter prototyping time, in order to reduce the final cost. A secondary contribution is the Prototyping experiment system, based on the proposed process, on a single device with a single video camera, creating a simple to use and easy-to-configure system. Also, the interaction with the prototype is realized directly by the user's fingers without the need for gloves or special markers.

This paper is organized as described below. In this first section the Introduction of the work was presented, in Section 2, Related Work, techniques related to the present work are presented. In Section 3, Methodology, the proposed pro-

cess and the methodology used are presented. In Section 4, Results, the results obtained are presented. Finally, in Section 5, Conclusion, the conclusion and future work are presented.

2 Related Work

The most relevant works on process development dealing with rapid interactive prototyping have been analyzed and identified. Our research will address the following question: What initiatives have been undertaken to develop interactive rapid prototyping processes? These initiatives must be based on 3D Printing, VR, or AR.

A comparative summary of the main contributions of the works is presented below and in chronological order.

Balcisoy *et al.* [2000] propose an AR framework for generating interactive virtual prototypes controlled by a virtual avatar. The prototype and avatar are positioned in a VR environment or an AR environment. A virtual user performs actions on the prototype; these actions are preconfigured, the AR user watches without directly participating in the interaction [Balcisoy *et al.*, 2000].

The work of Balcisoy *et al.* [2000] has as its main contribution that it was the first work proposed in rapid interactive prototyping using VR and AR. They presented as future work an analysis of the comfort and possible injuries that the user could suffer when interacting with the proposed product. However, this proposed future work is not explored in this work.

In Lee and Park [2005], a system is proposed to help designers test their prototypes. A 3D object is modeled, and then its physical model is generated by a CNC (Computer Numerical Control) machine using polyurethane foam as the base material. A marker is placed on the physical model, enabling the same 3D model to be projected onto the physical model via AR, allowing color and texture to be changed and tested Lee and Park [2005].

The work of Lee and Park [2005] has as main innovation the projection of the model in AR onto the physical model. As future work, they suggest improving the marker tracking that the AR uses by accepting partially occluded markers. These two features were implemented in the present work.

Park *et al.* [2009] present a rapid prototyping system for portable products using physical models and AR. The physical model is 3D printed; then, the AR model is positioned to overlap the physical model. It is possible to interact with the model using a physical pointer which has a marker that allows it to be perceived in AR. With the pointer, it is possible to perform clicks and touches on the 3D model, and the result of the actions is presented in the AR. The visualization of the system is done on a PC, and a webcam is positioned on the user's head [Park *et al.*, 2009].

The main contribution of Park *et al.* [2009] is the possibility of interacting directly with the physical prototype. However, it is necessary to use a physical pointer to interact with the AR. They propose as future work the interaction without the pointer, directly with the fingers, and the use of HMD devices for visualization. These two proposals have been implemented in the present work.

A work by Akaoka *et al.* [2010] presents a rapid prototyping workbench that projects functional interfaces onto physical prototypes. The projection is carried out using multimedia projectors (data show), allowing the user to visualize the AR without the need of glasses or HMD. The physical prototypes are monochromatic and reused real objects such as cans, globes, and boxes painted a solid color. Interaction is performed through finger touches; however, it is necessary to stick a marker on the finger to be recognized. The projection of the AR onto the physical prototype is achieved using a projector. The test environment has eight cameras that detect the markers and two projectors that project the interface onto the prototype [Akaoka *et al.*, 2010].

In Porter *et al.* [2010], multimedia projectors (datashow) are used to integrate AR with the real world. The goal is to evaluate car dashboard prototypes. The image of the car dashboard is projected on a flat surface. A finger detection module is used to detect the user's movements and allow interaction with the prototype. The finger detection requires the user to wear an orange thimble on the index finger. A questionnaire is applied to evaluate the User Experience (UX) [Porter *et al.*, 2010; Marner *et al.*, 2011].

In Akaoka *et al.* [2010] and Porter *et al.* [2010], the main innovation is the use of projectors for an interactive prototyping system. Akaoka *et al.* [2010] propose as future work improving tracking with partially occluded markers, enhancing the quality of the cameras and projectors used, interaction without the need for markers on the fingers, and simplifying the configuration environment of the proposed workbench [Akaoka *et al.*, 2010]. Porter *et al.* [2010] suggest a faster interaction process between the user and the prototype as future work. The present work uses a simple configuration of the interaction environment, interaction with fingers without markers, and the application of questionnaires to validate the proposed process.

In Stöcklein *et al.* [2010], MiReAS, an interactive prototyping framework in a mixed reality environment, is presented. This framework has an iterative refinement system based on the Model-View-Control-Environment (MVCE) pattern. A case study was conducted with an indoor airship controlled by remote control, and virtual obstacles can be added to the scene to test the airship's mobility [Stöcklein *et al.*, 2010].

The main innovation in the work of Stöcklein *et al.* [2010] is the use of the MVCE (Model View Controller Environment) design pattern [Stöcklein *et al.*, 2009] in the iterative refinement stage of the prototype. It is proposed as future work a standardization in describing the models used in the rapid prototyping process [Stöcklein *et al.*, 2010]. The present work proposes a cyclic process of prototyping that includes an iterative refinement stage as well.

The IRIS rapid prototyping method [Zampelis *et al.*, 2012] allows interactive screens in static prototypes. The case study used a static prototype with some buttons; these buttons send commands via Bluetooth to a computer, where the interactive screen is located. One of the problems with this system is that the screen is separated from the prototype, which can cause a bad UX. It was suggested as future work to increase the resolution of the screen used [Zampelis *et al.*, 2012]. No features from the work of Zampelis *et al.* [2012]

were explored in work proposed in this paper.

In Simon's (2012) Ph.D. Thesis, IntelliTIO (Intelligent Tangible Input Object), a rapid prototyping system in an AR environment for control panels, is proposed. The interaction with the user is performed via tangible input objects, such as physical control panels, which also have an AR version. Sensors are attached to these panels, enabling to obtain data from the natural environment. The sensors communicate via RFID (Radio-Frequency Identification) with the interaction system. As future work, Simon suggests using different models of antennas to capture the signal and optimize the RFID system [Simon, 2012].

Verlinden [2014], in his doctoral thesis, proposes a five-stage methodology of prototyping in AR: modeling, preparation, deployment, review, and reflection. In the modeling stage, the 3D model is generated through a CAD tool or by scanning an existing object; in preparation, the intended interactions with the model are configured; in deployment, the environment where the 3D model will be in the AR is prepared; in review, the experience is tested, and modifications may be proposed; in reflection, the interactions are re-analyzed, and decisions about the design may be changed. A case study is conducted in which some 3D printed objects are arranged on a table, and AR is applied by a projector. Powered by a camera, the system located the objects and projected some texture onto them. It is possible to interact with the prototypes by moving them directly on the table or using a touch screen controller [Verlinden, 2014].

In Verlinden [2014] work, the main innovation is the cyclical prototyping process. As future work he proposes integrating all the functionality of the prototyping experiment into a single device such as a tablet, and also to produce physical prototypes based on malleable materials such as clay [Verlinden, 2014]. The present work uses a cyclical process, and the experiment is performed on a single device.

In the work of Simões *et al.* [2016], two rapid prototypes of different natures are generated for the same product. The first is a physical prototype printed in 3D, and the second is a virtual prototype in AR. These two prototypes are compared and undergo tests and questionnaires with lay users and prototyping experts. The experiences are evaluated, and the advantages and disadvantages of each prototype are pointed out for an application in the analysis phase of a product design [Simões *et al.*, 2016].

The main highlight of the work of Simões *et al.* [2016] is the comparison between physical and AR prototypes for the analysis of a product. It is proposed as future work the execution of the experiments with a sample of testers more representative of the consumer market, the prototyping of products not yet known by users, and the use of AR without traditional markers (fiducial or QR code) [Simões *et al.*, 2016]. In the present work, AR is used without conventional markers.

An *et al.* [2017] propose a workflow for prototyping named CEPVR. The process is interactive and allows the creation of 3D models from sketches. The sketch is tested and evaluated in an AR environment. The process is collaborative, and more than one person can participate in the interaction. A case study was conducted for a car in which the steering of the vehicle was designed and tested, two users

interacted: the driver and a passenger [An *et al.*, 2017].

The main highlight of An *et al.* [2017] work is using multiple users for testing the prototype and the possibility of experiments with large products, such as cars. Given the complexity of the experiment, future work should include a focus on aiding the human helpers of testers [An *et al.*, 2017]. None of the highlights and future work were applied in the present work.

Katakura and Watanabe [2018] propose a rapid prototyping process using 3D printed and interactive prototypes called ProtoHole. The interactivity is realized through an electrical and acoustic system installed inside the printed object; holes in the object are used as buttons. It is possible to detect the holes that the user closes by detecting the different sound frequencies. The system was tested using a few objects such as a joystick, lamp controller, and a toy dog [Katakura and Watanabe, 2018]. Each closing of a hole generates a different action depending on the object.

The main differential of Katakura and Watanabe [2018] work is the use of holes as buttons and the use of sound sensors in the prototype to trigger a click. Future work proposes changing the shape of each hole so that the sound resonated by them is sufficiently different to make it easier to detect which hole was closed [Katakura and Watanabe, 2018]. Neither the differential nor the future work was applied in the present work.

Arrighi and Mougenot [2019] introduce a tool that allows end-users to visualize the virtual prototype of the product in 3D and participate in the design process by manipulating and modifying it directly in an intuitive way. The interaction with the prototype is accomplished through blocks with markers; the manipulation of the block generates an action in the virtual environment. The blocks can be repositioned, generating a repositioning of the virtual object within the environment. A case study is conducted to decorate a room, where each block is a piece of furniture, which can be moved around the scene [Arrighi and Mougenot, 2019].

The main innovation of Arrighi and Mougenot [2019] work is applying the method in the field of architecture and interior design. As future work, it was proposed to evaluate the usability of the experiment and its impact on the environment design process [Arrighi and Mougenot, 2019]. The present work uses a UX evaluation process through questionnaires.

Morozova *et al.* [2019] propose Mixed UX, a framework that combines 3D models with 2D interaction interfaces, like mobile device screens. The intention is to facilitate interaction with the prototype through the interaction screen. The demonstrated case study projected the 3D model using AR at a fixed location. A mobile device is positioned over the projection; the interactions on the mobile are reflected in the projected 3D model. Microsoft HoloLens was used as the AR display device, and the interaction screen is an ordinary cell phone with a touchscreen [Morozova *et al.*, 2019].

Morozova *et al.* [2019] highlight the interaction screen, which allows simple interaction with the prototype. Future work proposed interactions with other parts of the prototype and not just the interaction screen [Morozova *et al.*, 2019]. Neither the highlighting nor the future work was applied in the present work.

2.1 Highlights

The positive and negative points of the cited articles were examined. The present work tries to solve the shortcomings identified in the analyzed works, implementing some points suggested as future works by the authors. The main elements and features that need to be improved or added are listed below and are incorporated into the method proposed in the present work.

- Projection of the prototype model in AR onto the physical model [Lee and Park, 2005].
- Tracking of partially occluded markers [Lee and Park, 2005; Akaoka *et al.*, 2010].
- Interaction of the system user with the prototype [Park *et al.*, 2009].
- Visualization of the interaction using HMD devices [Park *et al.*, 2009].
- Interaction with the prototype using the fingers, without the need for a pointer or marker [Park *et al.*, 2009; Akaoka *et al.*, 2010].
- Application of questionnaires to validate the proposed process and UX [Porter *et al.*, 2010; Arrighi and Mougnot, 2019].
- Test environments with simple configuration [Akaoka *et al.*, 2010].
- Test standardization scheme for different models [Stöcklein *et al.*, 2010].
- Cyclic prototyping process [Verlinden, 2014].
- Prototyping experiment on a single device [Verlinden, 2014].
- AR tracking without traditional markers [Simões *et al.*, 2016].

These points show that the research area in rapid interactive prototyping still has many issues to be ameliorated, and the present work aims to fill most of these gaps. All these points highlighted in this review were implemented in the current work, aiming to develop a complete and robust prototyping process.

3 Methodology

The investigation into rapid prototyping methods provided an understanding of this area and its processes. Procedures that had been little explored were located, and possible improvements detected. Thus, a new cyclical, structural, functional, and interactive rapid prototyping process was proposed. The process was implemented through a system, allowing various products to be configured and prototyped.

A case study was developed to validate the process and the system to prove theoretical and practical feasibility. The case study was applied to users who experienced the process through the system developed. They then answered the UEQ questionnaire to evaluate their experience of using the system.

The proposed interactive rapid prototyping process, the implementation of its system, the case study, and its form of evaluation are all included in this section.

3.1 Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping - CYPIRP

The present work proposes a cyclic process for the rapid development of structural, functional, and interactive prototypes combining AR and 3D Printing. This process has been designated as Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping (CYPIRP). We recognize an interactive prototype when it is possible to perform actions on the prototype that generate reactions referring to its functionalities. In this way, a user can interact with the prototype exploring its functionalities more naturally.

The proposed process is based on the product development cycle proposed by Noorani [2006]; however, some steps were grouped, others partitioned, some modified. Figure 1 shows the process proposed by Noorani, and the equivalence between Noorani's approach and the method presented in this paper is indicated. Noorani's first three steps, Design Conception, Parametric Design, and Analysis and Optimization, were grouped into the Product Specification step of CYPIRP. Noorani's Rapid Prototyping step was changed to Structural and Functional Prototype Creation and encompassed the creation of the functional prototype and the production of the physical prototype. The Prototype Test and Evaluation step was segmented into two steps: Prototype Experimentation and Prototype Evaluation.

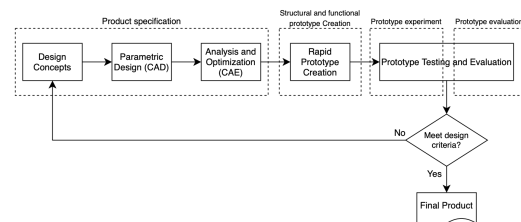


Figure 1. Product development cycle. It is adapted from Noorani [2006]

Given these equivalences, the proposed process architecture is shown in Figure 2, consisting of four steps, each of which is composed of several modules. The initial stage is Product Specification, where the product is designed and specified, and the 3D model is generated as output. The Functional and Structural Prototyping stage receives, as input, the 3D model of the product. The functionalities to be tested are then defined, a functional virtual prototype is generated, and the physical prototype is also produced. Next is the Prototype Experiment stage, where the structural and functional prototype is tested through a system that allows interaction with the prototype. Finally, there is the Evaluation and Revision stage, where the prototype is evaluated, and adjustments and changes can be proposed. This process is cyclical and must be repeated as long as the question: "Does it meet the design criteria?" is negative; when it is positive, the prototype is ready to go to the assembly line, and the final product can be produced.

This cyclical process is already used similarly in works such as those by Stöcklein *et al.* [2010], Marner *et al.* [2011] and Verlinden [2014], so it does not represent innovation in isolation; however, the innovation proposed in this work is in the stages of Structural and Functional Prototype Cre-

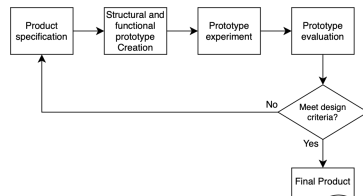


Figure 2. Proposed cyclical process (CYPIRP).

ation, Prototype Experimentation, and the CYPIRP system as a whole.

The CYPIRP stages, and their internal modules, are detailed below.

3.1.1 Product Specification

The Product Specification stage comprises the first three stages of the product development cycle proposed by Noorani [2006]: Design Conception, Parametric Design, and Analysis and Optimization. At the end of these steps, a 3D model of the product is generated and used by the following steps of CYPIRP. Figure 3 shows the flowchart of this step.

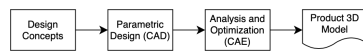


Figure 3. CYPIRP Product Specification Stage.

In the Design Concept step, general configurations of the product to be developed are defined. The product design is specified and described in the Parametric Design stage, usually using a Computer-Aided Design (CAD) Program. The third stage is Analysis and Optimization, where the design is analyzed and, if possible, optimized, usually using a Computer-Aided Engineering (CAE) program. These three steps are unchanged compared to the Noorani [2006] proposal and should follow the specific processes of each industry.

3.1.2 Structural and Functional Prototyping Creation

The Structural and Functional Prototype Creation stage must generate a structural and functional prototype in the Prototype Experiment stage. Figure 4 shows the flowchart of this step; it receives as input the 3D Model of the Product, generated in the Product Specification step, which is used in the two main modules, namely Digital Fabrication and Functions Definition.

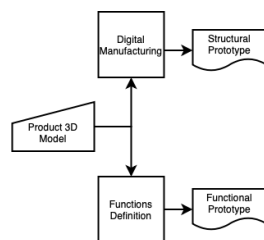


Figure 4. CYPIRP Structural and Functional Prototype Creation Stage.

In Digital Manufacturing, the 3D model is sent to some Digital Manufacturing equipment to generate a structural prototype of the 3D model received. In this work, a 3D printer was used; after printing the model, which usually takes several hours, the printed structural prototype is ready to be used by the system. The artifact produced in this module is one of the outputs of this stage.

In the Functions Definition module the entire UX must be planned. At this stage the product functionalities are defined and tested, and the actions and reactions that can be performed on the interactive prototype are configured. Each prototype function must be divided into pairs of actions and reactions that can happen on the prototype, and each action and reaction must be associated with a spatial region in the 3D model. In this way, each area of the 3D model amenable to some interaction must be defined along with the expected action and reaction. The action to be performed can be a click or a moving touch on the object. The object can react to the actions with the following reactions:

- Animations and Movements;
- Change of color or lighting;
- Sound playback;

These actions and reactions must be configured to generate a functional prototype using AR. In the present work, the prototype was configured using the development tool Unity Engine [Unity, 2022]. The procedure for producing this prototype varies depending on the functionality involved and will be presented along with the case study developed.

The design of actions and reactions is specific to each product. In this project, the possibilities of actions to be performed on a children's car toy were analyzed. In this way, the actions of opening and closing, turning and moving were planned to generate the equivalent reactions, adding sound to each action. More details are given in the case study in section 3.1.1.

After the Structural Prototype and Functional Prototype are generated, they are used and combined into a single Structural and Functional prototype in the Prototype Experiment stage.

3.1.3 Prototype Experiment

The Prototype Experiment stage is responsible for experimenting with the structural and functional prototype. This stage receives the outputs of the Structural and Functional Prototyping Creation stage, the structural and functional prototypes. These will be combined to generate a single structural and functional prototype.

For the execution of the experiment, an architecture for an Interactive Prototype Experiment system is proposed, which is presented in Figure 5 and uses a portable radio as an example prototype to be manufactured and evaluated.

The Functional Prototype with its actions and reactions is sent to the Central Controller module. This module manages the AR Controller and the Gesture Detector. It interprets the gestures and generates the commands that the AR Controller must execute.

The AR Controller module is responsible for generating and controlling the AR information and displaying it on a

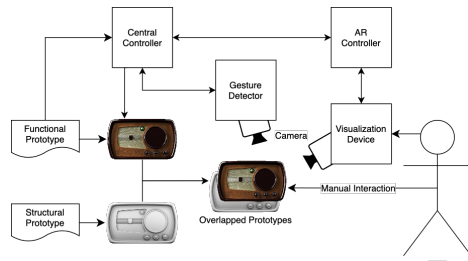


Figure 5. Architecture of the Prototype Experiment stage of the CYPIRP.

Display Device. The core of this module is an AR library or engine; in the present work, the Vuforia AR library was used [Vuforia, 2020]. The AR Controller module receives the 3D model of the functional prototype, renders it, and, together with an AR Visualization Device, projects the rendered 3D model onto an AR marker located on the Structural Prototype so that the Functional Prototype and the Structural Prototype are overlapped with the same rotation and scale settings. This process is possible because the AR Controller and the AR Visualization Device, which has a video camera, can track the object of interest and detect its position.

The Visualization Device has three essential components, a visualization screen, a sound system, and a video camera. The visualization can be either through an Optical see-through device or a Video see-through device, allowing the user to visualize the AR in the real environment. The sound system will enable sounds resulting from interaction with the prototype to be heard. The video camera captures the real environment and allows the AR Controller to track the point of interest. In the present work, a video direct vision device is being used, a cell phone with a sound system and a video camera integrated.

This configuration of the experiment allows the user, when holding the Printed Structural Prototype (monochrome), to see the prototype rendered in color and manipulate it traditionally, with the basic operations of rotation and scale, moving it closer or further away.

To enable the prototype's functionalities to be activated interactively, a camera films the user's interaction with the Structural Prototype; this camera can be the AR Visualization Device's camera or another external camera. The captured images are processed in the Gesture Detector module that will recognize the movements made by the user's hand on the printed object to recognize touches and clicks. These movements are passed to the Central Controller module that converts them into actions to be applied on the Functional Prototype according to the possible actions that the prototype can perform. Once identified, the AR Controller executes the actions in the Functional Prototype, and the user will perceive them through AR.

The most diverse actions can be executed; for example, if an action to turn on the radio is executed, a green light will be turned on in the functional radio prototype, and a sound from some broadcaster will start playing.

The architecture presented allows the four modules in this step to be integrated into a single device, with a single camera or configured in separate devices using 1 or 2 independent cameras. In the present work, they are integrated into a single

device.

The hand gesture detector module is responsible for identifying the movements made by the user's hands and converting them into clicks or touches to be performed on the prototype. In this way, it is possible to interact with the prototype without using gloves or markers on the hands or fingers. This module can be implemented using some specific algorithm for hand and gesture recognition [Shen *et al.*, 2011] or using some tool available in the development platforms. In this work, the Vuforia virtual button-tool was used [Vuforia, 2020].

Vuforia's virtual button [Vuforia, 2020] works by occluding parts of the marker with one's finger or some other object that is interacting with the marker. This process has some limitations if the marker is very simple, or if the interacting object is small. However, in the experiments carried out in this work, the virtual button performed satisfactorily.

3.1.4 Prototype Evaluation

The last stage of CYPIRP is the Prototype Evaluation. The user who experimented with the Structural and Functional Prototype must report the failures or needs perceived during the use of the prototype. This information must be passed on to and analyzed by the prototype development team so that refinement can be performed with the suggestions generated by the user, which can be accepted or not, and, if necessary, the prototype will be adapted, developing a new prototype and all the steps are performed again.

This step is part of the Noorani [2006] macro step Test and Evaluation of the Prototype, and the Evaluation part follows without changes compared to the Noorani [2006] proposal and must follow processes specific to each industry.

After this step, one must answer the question: "Does it meet the evaluation criteria? If it does not, the prototype must be adjusted, and the steps must be performed again. If it does, the prototype is ready to go to the assembly line, and the final product can be produced.

3.2 Evaluation of the CYPIRP process

The proposed process needs to be evaluated. One way to do this is through case studies applied to users who try out the system and evaluate it.

User experience (UX) is the combination of what the user feels, perceives, thinks, and how he reacts physically and mentally before and during the use of a given product or service [Punchoojit and Hongwarittorn, 2017]. Understanding user needs and expectations is essential for successful product design. A common way to analyze UX is through questionnaires; however, it is vital to recognize that participants are not always objective.

3.2.1 Questionnaire definition

Mantova *et al.* [2016] study the various metrics for applying questionnaires for multiple purposes. Among the metrics presented, the ones that most fit the character of the research in question are the Software Usability Measurement Inventory (SUMI) [Kirakowski and Corbett, 1993] and the

AttrakDiff. The SUMI is recommended for any organization that wishes to measure the perceived quality of software use. The AttrakDiff [Hassenzahl *et al.*, 2003] is recommended to measure the attractiveness of an interactive product through pairs of opposing adjectives [Mantova *et al.*, 2016].

Sauro and Lewis [2016], in the same direction as the first investigated authors, present possible options for applying standardized questionnaires, stating that these are intended to assess participants' satisfaction with the perceived usability of products or systems during or immediately after usability testing. In the authors' words, a standardized questionnaire should be designed for repeated use, usually with a specific set of questions presented in a specified order using a previously defined format, with particular rules to produce metrics based on respondents' answers [Sauro and Lewis, 2016].

Aligned with Mantova *et al.* [2016], Sauro and Lewis [2016] also consider the previously mentioned SUMI as one of the most widely used standardized usability questionnaires for evaluating usability perceptions at the end of a study (after completion of a set of test scenarios). Among others cited for this purpose, the authors present the Post-study System Usability Questionnaire (PSSUQ) [Lewis, 2002] as a revised and updated option for the former, as well as the Software Usability Scale (SUS) [Brooke, 1996], the latter recommended by the authors for application in the case of post-study.

After analyzing the questionnaire models proposed by Sauro and Lewis [2016] and Mantova *et al.* [2016], we considered for the choice of model to be applied in the present research, the following parameters: applicability, ease of interpretation by users, and quality of information generated from the answers.

Given this need, we analyzed the then most recent User Experience Questionnaire (UEQ) developed by Laugwitz *et al.* [2008] for a German software company based on a theoretical model of UX described by Marc Hassenzahl [Hassenzahl *et al.*, 2003].

The UEQ is intended to assess user perception in the light of the product's distinction between "perceived ergonomic quality and perceived hedonic quality" [Laugwitz *et al.*, 2008]. For this case, ergonomic and hedonic aspects express two aspects of software product quality. The former concerns aspects related to accomplishing tasks and goals efficiently and effectively, while the latter focuses on the aesthetic quality of the interface [Laugwitz *et al.*, 2008].

According to Hassenzahl [Hassenzahl *et al.*, 2003], ergonomic quality is related to product usability, which addresses the human need to be safe and in control of the situation. The hedonic quality refers to qualitative dimensions and thus addresses the human need for change or novelty and social power, which presents itself in visual design, an innovative interface, or new features [Hassenzahl *et al.*, 2003].

Although the SUS [Brooke, 1996] has been recommended for its popularity, efficiency, and speed in obtaining answers, and the PSSUQ [Lewis, 2002], in its Third version (2002), with sixteen items, has also proven effective for the objective proposed in the present study, the UEQ was chosen here. The latter was selected for application in the work presented here for being considered more current, intuitive, and contemplating aspects necessary for the evaluation of the proposed model from questions referring to the effectiveness and effi-

ciency of the software and aesthetic quality of the interface, ergonomic and hedonic characteristics, respectively, as advocated by the author above. As recommended by [Rauschenberger *et al.*, 2013], the UEQ was applied to a sample of thirty users in order to obtain a valid impression in the face of the diversity of people investigated and the range of possible answers.

The hypothesis that will be verified is whether the process of rapid interactive prototyping proposed in this work helps us to understand the product in subjective parameters and information beyond the physical model, thus facilitating the interpretation of data for production. The questionnaire aims to verify user satisfaction and the relationships established between the user and the interactive prototyping system.

3.2.2 Evaluation Experiment Setup

The Research Ethics Committee of UFPE authorized the experiment, and all volunteers signed the Free and Informed Consent Term (FICT). The project is registered in Plataforma Brasil with the title: "Rapid interactive prototyping combining 3D Printing and AR" with the Certificate of Presentation of Ethical Appreciation (CAAE) identification code: 52200121.5.0000.5208. The performance of the CYPiRP as an experiment followed the ethical precepts of Resolution 466/12 or 510/16 of the Brazilian National Health Council.

This section presents how the participants were recruited and the procedures for applying the experiment.

The experiment was carried out at the Informatics Center - UFPE; the questionnaire was applied at the same place.

The recruitment of volunteers was done through public calls in the e-mail lists of the Informatics Center (CIn) and the Arts and Communication Center (CAC) of UFPE. Volunteers were also recruited directly from passers-by at the Informatics Center, who were approached and invited to participate in the experiment.

The characteristics needed for the participants to be included or excluded from the research are described below.

Inclusion criteria - The target population will be students, employees, and professors from the Informatics Center (CIn) and the Arts and Communication Center (CAC) at UFPE, aged between 18 and 60.

Exclusion criteria - Those who do not know how to handle a smartphone basically and those over 60.

In order to carry out the experiment, the necessary equipment includes a VR goggles, a smartphone, and a 3D printed physical prototype of the case study being investigated.

Paper-printed questionnaires were used for data collection, answered with a pen after the experiment had been carried out.

The following procedures will be performed:

- Sanitizing the user's hands.
- Explaining to the user with instructions on how to perform the experiment;
- Equipping the VR glasses on the face and positioning the physical prototype in the hands.
- Executing the experiment, by manipulating the physical prototype and visualization in AR of the functional prototype.

- Applying of the UEQ questionnaire after the experiment.

The instructions on how to perform the experiment vary depending on the case study.

3.2.3 Analysis and Interpretation of Experiment

The experiment was conducted with a sample size of 30 subjects. The distribution of the mean is close to the normal distribution from sample sizes of 30, obtaining a statistically reliable result [Sauro and Lewis, 2016]. This sample size is also the value recommended by Rauschenberger *et al.* [2013] and Schrepp *et al.* [2017].

The result obtained will be analyzed through graphs. Initially, the 26 properties of the UEQ were divided into two groups, namely the group where the optimal outcome is the value seven and the group where the optimal result is one. Each of these groups was left with 13 properties. After this division, two graphs are generated for each group.

The first chart used is the Boxplot, which shows the minimum value, maximum value, first quartile, third quartile, and median (second quartile) [Montgomery and Runger, 2021]. This graph will be generated based on the 13 properties in each group, analyzing the seven possible values that can occur. In this way, the properties that received a better score and those that received a worse one will be visible.

The second graph is the histogram, which displays the frequency of occurrence with which each possible score value occurred [Montgomery and Runger, 2021]. In this way, the number of times each score (from 1 to 7) occurred in each group of 13 properties is displayed. It will be visible whether most of the scores were close to or far from the optimal expected value.

The properties with a low score will be analyzed to see whether any changes can be made to the proposed system to improve this result.

According to the founders of UEQ [Schrepp *et al.*, 2017], the 26 pairs of UEQ opposite adjectives can be segmented into six groups, which are listed below:

- Attractiveness. Overall impression of the experience. Did users like it or not? Is it attractive, pleasant, or enjoyable? Six pairs are in this category: Annoying/Enjoyable, Good/Bad, Unlikable/Pleasing, Unpleasant/Pleasant, Attractive/Unattractive, and Friendly/Unfriendly.
- Perspicuity. Is it easy to become familiar with experience? Is the experience clear and easy to understand? Four pairs are in this category: Not Understandable/Understandable, Easy to Learn/Difficult to Learn, Complicated/Easy, and Clear/Confusing.
- Efficiency. Can users solve the tasks without unnecessary effort? Is the interaction efficient and rapid? Does the experience respond quickly to the user? Four pairs are in this category: Fast/Slow, Inefficient/Efficient, Impractical/Practical, and Organized/Cluttered.
- Dependability. Do the users feel in control of the interaction? Can they predict the system's behavior? Do they feel safe during the experience? Four pairs are

in this category: Unpredictable/Predictable, Obstructive/Supportive, Secure/Not Secure, and Meets Expectations/Does not Meet Expectations.

- Stimulation. Is the experience stimulating and motivating? Is it fun? Four pairs are in this category: Valuable/Inferior, Boring/Exciting, Not Interesting/Interesting, and Motivating/Demotivating.
- Novelty. Is the experience innovative and creative? Does it catch the users' attention? Four pairs are in this category: Creative/Dull, Inventive/Conventional, Usual/Leading Edge, and Conservative/Innovative.

UEQ provides on its website [Schrepp *et al.*, 2022] a data analysis tool, in spreadsheet format, that analyzes user responses by scoring the result according to the listed groups [Schrepp *et al.*, 2017].

This tool has a standard reference table (benchmark), with the averages of the answers of 21175 volunteers in 468 papers, in the current version used [Schrepp *et al.*, 2022]. This makes it possible to compare the results obtained in this work with those cataloged in the benchmark [Schrepp *et al.*, 2017].

The UEQ response values range from 1 to 7; however, the data analysis tool transposes these values so that they are in the range of -3 to +3. The pairs of opposite adjectives that had the positive value in response 1 were reversed so that all the optimal positive responses were in the +3 value and all the optimal negative responses were in the -3 value.

The results available in the tool are divided into five quality scales:

- Excellent item: The evaluation of the experiment is between 10% of the best results.
- Good: 10% of the results in the benchmark is better than the evaluated experiment, and 75% of the results are worse.
- Above average: 25% of the results in the benchmark are better than the evaluated experiment, and 50% of the results are worse.
- Below average item: 50% of the results in the benchmark is better than the evaluated experiment, and 25% of the results are worse.
- Bad: The evaluation of the experiment is among the 25% of the worst results.

The tool itself generates a Stacked Columns chart with the results of these comparisons. Thus, the results obtained were also analyzed using this chart.

3.3 Case Study

This section presents a case study used to validate the proposed process. It was performed with a children's toy car with several possible interactions.

It is possible to open and close the car door; the windows have moving parts that go up and down and make noise. In the trunk, a bird can be moved from side to side and makes a sound. The wheels turn as if the car were moving.

The CYPIRP process was applied to this case study, and each of the four steps is detailed in the following topics.

3.3.1 Product Specification

This step defines which product will be developed, its characteristics, and its 3D model are elaborated.

The product defined for this case study was a children's toy of a car. The colorful 3D model of the vehicle was developed in a traditional CAD application; in this case, the Blender [Lee, 2008] application was used. All moving parts of the toy, such as the car door, windows, wheels, and trunk, were modeled separately and then positioned on the main block of the model. No optimization was done in Computer-Aided Engineering (CAE). The 3D model of this car is shown in Figure 6.



Figure 6. 3D model of the car toy

The output of this step is the 3D model of the product, which is used in the Structural and Functional Prototyping step.

3.3.2 Structural and Functional Prototyping Creation

To produce the structural prototype, the 3D model of the product is used in the Digital Fabrication module, which physically makes the prototype. We used a monochrome Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printer in this case study. The structural prototype was 3D printed in one solid color, a shade of purple, in a single block, with no moving parts, as shown in Figure 7.



Figure 7. Structural Prototype of the car toy

To create the functional prototype, the actions and reactions that should happen during the interactions with the user were defined. The interaction regions were determined, and these are activated through touch actions. Each area has its reaction, and these are listed in Table 1.

The functional prototype was implemented in Unity Engine [Unity, 2022], and each action and reaction was configured. The touch actions were developed using the Box Collider feature, which must be set to cover the entire region where a specific action can be performed. The reactions were set up with the Animator feature. When a collision occurs, the response of the corresponding area is activated.

Table 1. Region and Reaction

Region	Reaction
Front/Back Wheels	The wheels are rotated counterclockwise as if the car were moving forward.
Door	Rotating movement to open or close the door, and a door creaking sound.
Front window	It has disks that move vertically up and down.
Back window	Vertical translation movement up and down the window.
Luggage rack	Horizontal translation movement, allowing lateral movements.

Using the animations, it is possible to define basic translation and rotation movements. For each moving part of the prototype, an animation corresponding to the expected reaction was configured. A rotation animation from zero degrees up to 110 degrees was configured for the car door. Figure 8 shows the result of this animation, from its initial state, through the 45 degrees angle until the end of the animation at 110 degrees.

After the structural and functional prototypes are set up, we move on to the Prototype Experiment stage.

3.3.3 Prototype Experiment

The proposed CYPIRP process architecture (Figure 5) has been configured to allow a simple experiment environment on a single device. Each module of the architecture configured for this case study is presented below.

The AR Controller module used is the AR library Vuforia [Vuforia, 2020], which works integrated with the Unity Engine [Unity, 2022].

To enable the overlapping of the prototypes, the AR Target feature of the Vuforia library is used [Vuforia, 2020]. The marker used was the structural prototype itself; for this Image Target type marker was used, and the image used is a picture of the structural prototype; this image is presented in Figure 9. In this way, the marker is practically imperceptible to the user, functioning as an invisible marker [Park and Park, 2010]. The functional prototype, which is only visible in AR, is associated with this physical marker. When the marker is detected in the field of view of the display device, the functional prototype is displayed over the physical marker. The functional prototype should be positioned so that it overlaps with the marker. In this way, when the marker is detected, the functional prototype is presented to cover up the structural prototype.

The Gesture Detector module was implemented using the Virtual Buttons feature from the Vuforia library [Vuforia, 2020]. The Virtual Buttons detect touches over specific regions of the Image Marker. Each virtual button was positioned over the marker's region that corresponds to a user interaction region. Figure 9 shows the areas of the virtual buttons on the image marker. It is possible to notice that they are precisely in the areas where the actions and reactions of the functional prototype take place.

The Central Controller module was developed in C# on Unity Engine [Unity, 2022] and managed the actions re-



Figure 8. Animation of door rotation.

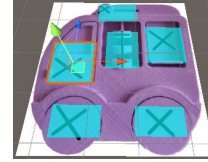


Figure 9. Image marker and the virtual buttons

ceived from the Gesture Detector module and generated the reactions on the functional prototype.

All modules were embedded in a single mobile application, developed in Unity Engine [Unity, 2022]. The application was tested on the Android platform.

The Visualization Device uses a VR goggle with an Android phone attached as a screen, enabling AR through Video see-through. The Viewer Device and the Gesture Detector module use the cell phone's camera.

The user taking the test is instructed to follow these instructions:

1. Put the AR glasses on;
2. Hold the prototype with your hands;
3. Perform the following tasks on the prototype:
 - Open and close the car door;
 - Rotate the wheels of the car;
 - Raise and lower the car windows;
 - Move the luggage rack sideways;

In Figure 10, you can see the structural and functional prototype being tried out on the CYPIRP system. It can be seen that the car door was being opened as the user put his hand on the door of the structural prototype.



Figure 10. The structural and functional prototype being tested.

A demonstration video on this case study has been made available on YouTube [Omaia, 2023a]. The source code of this Unity project was made available at GitHub [Omaia, 2023b].

3.3.4 Prototype Evaluation

After the prototype experimentation has been performed, the user is invited to suggest adjustments that can be made to the prototype. The suggestions were documented and are presented in Section 4 (Results). However, no new development cycle was run with the recommendations made.

After the case study is completed, the user is invited to answer the UEQ questionnaire.

4 Results

The process proposed in this paper was applied in the case studies presented. An experiment was conducted with 30 users to test and evaluate the system developed.

The proposed case study was applied to a group of 30 volunteers, and each volunteer answered UEQ [Laugwitz *et al.*, 2008] questionnaires. The volunteers are undergraduate students and university employees, all over 18 years old.

4.1 Children's Car Toy

Right after the execution of the experiment of the child's toy car, the volunteers were asked to answer the UEQ [Laugwitz *et al.*, 2008] questionnaire about their experience of manipulating the functional prototype. The results are presented below.

Table 2 shows the table with the unified result of the answers of the 30 users. In the seven possible answers of each opposite pair, the number of volunteers that gave that same answer is shown. For example, in the Annoying/Enjoyable pair, eleven volunteers answered value 7, ten volunteers answered value 6, four volunteers answered value 5, and five volunteers answered 4. The values 1, 2, and 3 were not represented.

Table 2. Complete UEQ Result

	1	2	3	4	5	6	7	
Annoying	0	0	0	5	4	10	11	Enjoyable
Not Understandable	0	0	0	0	4	6	20	Understandable
Creative	18	8	3	0	0	0	1	Dull
Easy to Learn	24	3	0	2	0	1	0	Difficult to Learn
Valuable	10	7	4	7	1	1	0	Inferior
Boring	0	0	0	2	6	14	8	Exciting
Not Interesting	0	0	0	0	2	9	19	Interesting
Unpredictable	1	0	3	8	4	6	8	Predictable
Fast	8	8	6	5	2	1	0	Slow
Inventive	14	9	7	0	0	0	0	Conventional
Obstructive	0	0	1	3	10	6	10	Supportive
Good	19	11	0	0	0	0	0	Bad
Complicated	0	0	0	2	4	3	21	Easy
Unlikable	0	0	0	0	4	8	18	Pleasing
Usual	0	1	1	12	6	8	2	Leading Edge
Unpleasant	0	3	2	2	4	12	7	Pleasant
Secure	24	3	2	0	1	0	0	Not Secure
Motivating	17	8	3	1	1	0	0	Demotivating
Meets Expectations	18	8	4	0	0	0	0	Does not meet Expectations
Inefficient	0	0	1	3	2	12	12	Efficient
Clear	12	10	5	2	1	0	0	Confusing
Impractical	0	0	0	0	5	2	23	Practical
Organized	22	8	0	0	0	0	0	Cluttered
Attractive	16	8	5	1	0	0	0	Unattractive
Friendly	21	8	1	0	0	0	0	Unfriendly
Conservative	0	0	0	3	6	8	13	Innovative

Of the 26 pairs of opposing adjectives, those considered positive for the evaluation were colored green, and the non-positive adjectives a shade of yellow. Of the 7 possible responses, values 1, 2, and 3 indicate a tendency toward the first adjective, and values 5, 6, and 7 have a tendency toward the second adjective. Value 4 indicates either neutrality or that the volunteer did not know how to define the indicated adjective correctly.

Table 2 was reorganized, aiming at a better understanding of the results. For this purpose, the number of responses for each item was normalized, some columns were grouped, and the rows were reordered. The new table is shown in Table 3.

The normalization was performed by obtaining the quantity of each response, which varies between 0 and 30 and dividing it by the maximum quantity of responses, i.e., 30. Thus, $normalized_value = \frac{quantity_responses}{total_responses}$. The grouping of the columns was done based on each column's trends; thus,

Table 3. Ordered Simplified Result of UEQ

	1,2,3	4	5,6,7	
Inventive	1,00	0,00	0,00	Conventional
Good	1,00	0,00	0,00	Bad
Meets Expectations	1,00	0,00	0,00	Does not meet Expectations
Organized	1,00	0,00	0,00	Cluttered
Friendly	1,00	0,00	0,00	Unfriendly
Creative	0,97	0,00	0,03	Dull
Secure	0,97	0,00	0,03	Not Secure
Attractive	0,97	0,03	0,00	Unattractive
Motivating	0,93	0,03	0,03	Demotivating
Easy to Learn	0,90	0,07	0,03	Difficult to Learn
Clear	0,90	0,07	0,03	Confusing
Fast	0,73	0,17	0,10	Slow
Valuable	0,70	0,23	0,07	Inferior
Not Understandable	0,00	0,00	1,00	Understandable
Not Interesting	0,00	0,00	1,00	Interesting
Unlikable	0,00	0,00	1,00	Pleasing
Impractical	0,00	0,00	1,00	Practical
Boring	0,00	0,07	0,93	Exciting
Complicated	0,00	0,07	0,93	Easy
Conservative	0,00	0,10	0,90	Innovative
Inefficient	0,03	0,10	0,87	Efficient
Obstructive	0,03	0,10	0,87	Supportive
Annoying	0,00	0,17	0,83	Enjoyable
Unpleasant	0,17	0,07	0,77	Pleasant
Unpredictable	0,13	0,27	0,60	Predictable
Usual	0,07	0,40	0,53	Leading Edge

columns 1, 2, and 3 and columns 5, 6, and 7 had their contents grouped and summed. Each row of the table was rearranged. Initially, the 13 pairs of adjectives, where the optimal adjective is value 1, were at the beginning of the table (Optimal Group 1), and the 13 pairs where the optimal adjective is value 7 were at the end of the table (Optimal Group 7). The pairs of adjectives in Optimal Group 1 were then arranged in descending order according to the answers 1, 2, and 3; and the pairs in Optimal Group 7 were arranged in descending order according to the column of answers 5, 6, and 7.

After these changes, it is possible to see in Table 3, that the positive adjectives always got more responses than the negative adjectives and were also higher than the number of neutral responses (value 4) for all 26 pairs of adjectives.

It is also possible to note that of the 26 positive adjectives, only 2 (Predictable and Leading Edge) were less than 70% of the responses obtained, and even in two, the positive responses were still higher, followed by the neutral responses (value 4) and the negative responses.

The pairs that received the most neutral responses (value 4) were: Valuable/Inferior, Unpredictable/Predictable, and Usual/Leading Edge. This indicates that the volunteers were in doubt regarding these points; however, even in these pairs, the number of responses referring to positive adjectives was still higher.

Of the 26 pairs of adjectives, in 12 of them, the rate of positive responses was greater than 95%. The adjectives that received more responses than 95% were: Inventive, Good, Meets Expectations, Organized, Friendly, Creative, Secure, Attractive, Understandable, Interesting, Pleasing and Practical.

For each group (Optimum 1 and Optimum 7), the Boxplot and Histogram plots were generated. For the Optimal 1 group, these 2 graphs are presented in Figure 11.

It can be seen in Figure 11 that the two graphs for the Optimal 1 group indicate a more significant amount of responses for values 1 and 2 than for the other values. In the Box Diagram graph (Figure 11.a) several metrics can be obtained. With regard to response 1, it received the maximum value of 24 responses (adjectives Secure and Easy to Learn); the

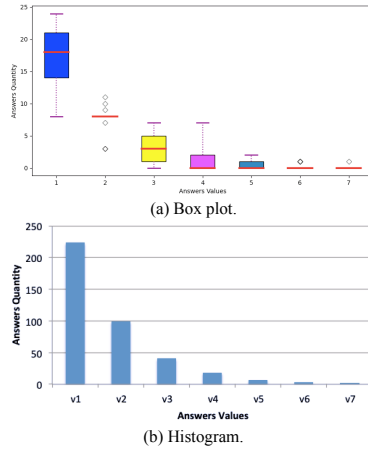


Figure 11. Graphs Optimal Group 1.

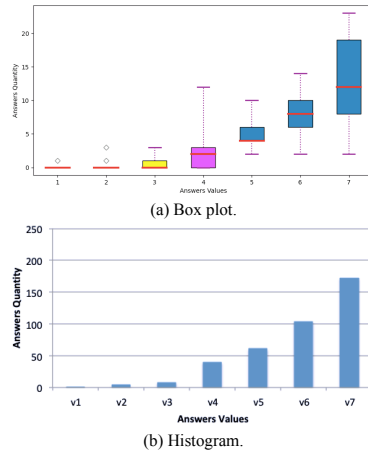


Figure 12. Graphs Optimal Group 7.

third quartile received the value of 21 responses (adjective Friendly); the median was 18 responses (adjective Meets Expectations); the first quartile was 14 responses (adjective Inventive), and the minimum value received in response 1 was 8 responses (adjective Fast).

The histogram graph (Figure 11.b) indicates the number of responses received for each response on the 13 adjectives in the group in question. Response 1 received 223 responses from a maximum of 390 answers. This total of possible responses value is calculated by multiplying the number of volunteers by the number of pairs. This way: $total = numberPairs * numberVolunteers$, that is, $total = 13 * 30 = 390$.

Figure 12 presents the Box plot and Histogram plots for Optimal Group 7. The behavior of the results is inversely proportional to that of Optimal Group 1, indicating a more significant amount of responses for values 6 and 7. However, in Optimum Group 7, values 6 and 7 represent positive adjectives for the experiment.

The UEQ data analysis tool was used to compare the results obtained with the standard reference table (benchmark) made available [Schrepp *et al.*, 2017, 2022]. The mean val-

Table 4. Average responses for the experiment.

Scale	Mean	Comparison to benchmark
Attractiveness	2,22	Excellent
Perspicuity	2,38	Excellent
Efficiency	2,19	Excellent
Dependability	1,98	Excellent
Stimulation	2,08	Excellent
Novelty	1,86	Excellent

ues obtained in the responses of the present work were calculated for the six groups (Attractiveness, Transparency, Efficiency, Control, Stimulation, Innovation) [Schrepp *et al.*, 2017]. These mean values are presented in Table 4.

Using the data analysis tool, the Stacked Columns chart of the averages for the six groups of the possible [Schrepp *et al.*, 2017] responses were also generated. This graph is displayed in Figure 13 and presents the benchmark averages for each group and the comparison with the average obtained in the proposed experiment, which is highlighted by the black line between the columns. From both the graph and Table 4 it is possible to notice that the result obtained was in the excellent range in the 6 analyzed groups. The excellent result means that the result is in the range of the 10% best results.

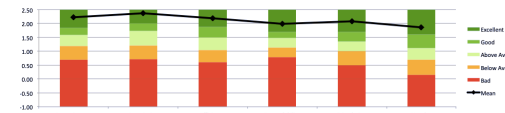


Figure 13. UEQ result based on the categories

4.2 Results Conclusion

In Optimal 1 group, most answers were for the values 1, 2, and 3. In Optimal 7 group, most answers were for the values 5, 6, and 7. These results indicate that most of the volunteers selected answers with positive adjectives to the experiment, thus indicating that the experience was positive overall.

The comparison with the benchmark is an indicator of whether the proposed process offers a UX sufficient to be successful in the market [Schrepp *et al.*, 2017]. As the results obtained were considered excellent in all six groups, we can infer that the proposed process would be well accepted in the market.

5 Conclusion

This section presents the final considerations on the main topics addressed in this paper, including the contributions achieved and indications for future work.

5.1 Main Contributions

The present work proposed a new structural, functional, and interactive rapid prototyping process (Cyclic Process of Interactive Rapid Prototyping (CYPIRP)) for product development, exploiting the advantages of AR and 3D Printing. An architecture for an interactive prototyping system was also

proposed and implemented. This process was considered innovative for combining these two techniques (AR and 3D Printing), generating a structural, functional, and interactive prototype using a process that had not yet been applied in the literature.

To validate and address these contributions, a systematic literature review was conducted on works in interactive rapid prototyping that use AR and 3D Printing.

The secondary contributions are listed below:

- Interaction through hand gestures, allowing manipulation of the prototype using the fingers, without needing gloves or special markers.
- Prototyping experiment on a single device, with a single video camera, generating a test system of simple configuration.
- Tracking the object of interest without the need for traditional AR markers. That is, the 3D-printed object itself was used as a marker.

Of the proposed objectives, all were achieved, among them:

- Defining the architecture of the proposed prototyping system;
- Developing the proposed prototyping system;
- Developing a case study
- Analyzing the case study through the application of questionnaires
- Validating and testing the process;

Validation of this system was performed through user testing. A group of 30 users tried out the system, and after the experiment, they answered the UEQ [Schrepp *et al.*, 2017] questionnaire. The answers were analyzed, and it can be inferred that the process had a good receptivity, achieving excellent averages of satisfaction in the UEQ benchmark, among the top 10% of results.

5.2 Future Works

To continue the research work described here, this section lists proposals for future work.

- Conduct more case studies.
- Experiment on a group of industry volunteers.
- Apply the process to large products, not just manual products.

5.3 Concluding Remarks

The present work has met expectations, demonstrating that the proposed system is applicable due to its high receptivity, making the industrial prototyping phase faster, more rapid, efficient, and concise.

References

- Abulrub, A. H. G., Attridge, A. N., and Williams, M. A. (2011). Virtual reality in engineering education: The fu-

ture of creative learning. In *2011 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pages 751–757. DOI: 10.1109/EDUCON.2011.5773223.

Akaoka, E., Ginn, T., and Vertegaal, R. (2010). Displayobjects: Prototyping functional physical interfaces on 3d styrofoam, paper or cardboard models. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pages 49–56, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/1709886.1709897.

Alexander, C. *et al.* (2009). *Value proposition development of early stage computational fluid dynamics analysis in automotive product development*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

An, S.-G., Kim, Y., Lee, J. H., and Bae, S.-H. (2017). Collaborative experience prototyping of automotive interior in vr with 3d sketching and haptic helpers. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '17, pages 183–192, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/3122986.3123002.

Arrighi, P.-A. and Mougenot, C. (2019). Towards user empowerment in product design: a mixed reality tool for interactive virtual prototyping. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2):743–754. DOI: 10.1007/s10845-016-1276-0.

Balcisoy, S., Kallmann, M., Fua, P., and Thalmann, D. (2000). A framework for rapid evaluation of prototypes with augmented reality. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 61–66. ACM.

Baxter, M. (1995). *Product design: A practical guide to systematic methods of new product development*.

Brooke, J. (1996). Sus: a 'quick and dirty' usability. *Usability evaluation in industry*, 189.

Choi, S. and Chan, A. (2004). A virtual prototyping system for rapid product development. *Computer-Aided Design*, 36(5):401 – 412. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00110-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00110-6).

Fernandes, A. S., Wang, R. F., and Simons, D. J. (2015). Remembering the physical as virtual: Source confusion and physical interaction in augmented reality. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, SAP '15, pages 127–130, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/2804408.2804423.

Furht, B. (2011). *Handbook of augmented reality*. Springer Science & Business Media.

Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.

Gieser, S. N., Gentry, C., LePage, J., and Makedon, F. (2016). Comparing objective and subjective metrics between physical and virtual tasks. In Lackey, S. and Shumaker, R., editors, *Virtual, Augmented and Mixed Reality: 8th International Conference, VAMR 2016, Held as Part of HCI International 2016, Toronto, Canada, July 17-22, 2016. Proceedings*, pages 3–13, Cham. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-39907-2_1.

Hassenzahl, M., Burmester, M., and Koller, F. (2003). *AtraktDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener*

- hedonischer und pragmatischer Qualität*, pages 187–196. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-322-80058-9_19.
- Katakura, S. and Watanabe, K. (2018). Protohole: Prototyping interactive 3d printed objects using holes and acoustic sensing. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pages LBW112:1–LBW112:6, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/3170427.3188471.
- Khan, T., Johnston, K., and Ophoff, J. (2019). The impact of an augmented reality application on learning motivation of students. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2019:7208494. DOI: 10.1155/2019/7208494.
- Kirakowski, J. and Corbett, M. (1993). Sumi: The software usability measurement inventory. *British journal of educational technology*, 24(3):210–212.
- Laugwitz, B., Held, T., and Schrepp, M. (2008). Construction and evaluation of a user experience questionnaire. In Holzinger, A., editor, *HCI and Usability for Education and Work*, pages 63–76, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, S. S. (2008). Blender. US Patent App. 29/305,015.
- Lee, W. and Park, J. (2005). Augmented foam: A tangible augmented reality for product design. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM international symposium on mixed and augmented reality*, pages 106–109. IEEE Computer Society.
- Leite, J. V. d. F., Teixeira, J. M. X. N., and Teichrieb, V. (2016). *Optimizing 3D Object Visualization on the Web*, pages 287–298. Springer International Publishing, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-39907-2_7.
- Lewis, J. R. (2002). Psychometric evaluation of the pssuq using data from five years of usability studies. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 14(3-4):463–488.
- Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D., and Wicker, R. B. (2014). 3d printing for the rapid prototyping of structural electronics. *IEEE access*, 2:234–242.
- Mantova, A. R., Ferreira, A. C. M., da Cruz Landim, P., and Marar, J. F. (2016). Escala dos questionários para análise da experiência do usuário: Estudo preliminar. *Blucher Design Proceedings*, 2(9):1130–1137.
- Marnier, M. R., Smith, R. T., Porter, S. R., Broecker, M. M., Close, B., and Thomas, B. H. (2011). Large scale spatial augmented reality for design and prototyping. In *Handbook of Augmented Reality*, pages 231–254. Springer.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (2021). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros (7nd ed.)*. LTC, Rio de Janeiro (RJ).
- Morozova, A., Rheinstädter, V., and Wallach, D. (2019). Mixe-dux: A mixed prototyping framework for usability testing in augmented reality. In *Companion Publication of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference 2019 Companion*, DIS '19 Companion, pages 41–44, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/3301019.3325146.
- Noorani, R. (2006). *Rapid prototyping: principles and applications*. John Wiley & Sons Incorporated.
- Omaia, D. (2023a). 3d car toy prototype using the cypirp. <https://www.youtube.com/watch?v=q7QN0gbb04Q>.
- Omaia, D. (2023b). 3dcar-cypirp. <https://github.com/derzu/3DCar-CYPIRP>.
- Park, H., Moon, H.-C., and Lee, J. Y. (2009). Tangible augmented prototyping of digital handheld products. *Computers in Industry*, 60(2):114–125.
- Park, H. and Park, J.-I. (2010). Invisible marker-based augmented reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 26(9):829–848. DOI: 10.1080/10447318.2010.496335.
- Porter, S. R., Marnier, M. R., Smith, R. T., Zucco, J. E., and Thomas, B. H. (2010). Validating spatial augmented reality for interactive rapid prototyping. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 265–266. DOI: 10.1109/ISMAR.2010.5643599.
- Punchoojit, L. and Hongwarittorn, N. (2017). Usability studies on mobile user interface design patterns: A systematic literature review. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2017:6787504. DOI: 10.1155/2017/6787504.
- Rauschenberger, M., Schrepp, M., Pérez Cota, M., Olschner, S., and Thomaschewski, J. (2013). Efficient measurement of the user experience of interactive products. how to use the user experience questionnaire (ueq). example: Spanish language version. DOI: 10.9781/ijimai.2013.215.
- Sauro, J. and Lewis, J. R. (2016). *Quantifying the user experience: Practical statistics for user research*. Morgan Kaufmann.
- Schrepp, M., Hinderks, A., and Thomaschewski, J. (2017). Construction of a benchmark for the user experience questionnaire (ueq). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 4:40–44. DOI: 10.9781/ijimai.2017.445.
- Schrepp, M., Hinderks, A., and Thomaschewski, J. (2022). User Experience Questionnaire (UEQ). <https://www.ueq-online.org>. [Online; accessed 30-June-2022].
- Shen, Y., Ong, S. K., and Nee, A. Y. C. (2011). Vision-based hand interaction in augmented reality environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(6):523–544. DOI: 10.1080/10447318.2011.555297.
- Simões, F., Bezerra, M., Teixeira, J. M., Correia, W., and Teichrieb, V. (2016). A user perspective analysis on augmented vs 3d printed prototypes for product's project design. In *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, pages 71–80. DOI: 10.1109/SVR.2016.22.
- Simon, T. (2012). Tangible spatial augmented reality in rapid prototyping: Multiple and differential tangible object manipulation and interaction.
- Stocklein, J., Geiger, C., Paelke, V., and Pogscheba, P. (2009). Poster: Mvce - a design pattern to guide the development of next generation user interfaces. In *2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pages 153–154. DOI: 10.1109/3DUI.2009.4811232.
- Stöcklein, J., Pogscheba, P., Geiger, C., and Paelke, V. (2010). Mireas: A mixed reality software framework for iterative prototyping of control strategies for an indoor airship. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, AFRIGRAPH '10, pages 27–36, New York, NY, USA. ACM. DOI: 10.1145/1811158.1811164.
- Teixeira, J. M., Barros, G., Teichrieb, V., and Correia, W. F. (2016). 3d printing as a means for augmenting existing sur-

- faces. In *2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, pages 24–28. DOI: 10.1109/SVR.2016.15.
- Tziouvara, I. (2012). Integration of 3d tracking systems for interaction in spatial augmented reality. DOI: uuid:acc16325-1c25-445d-ac3c-02c3e89170d4.
- Unity (2022). Unity real-time development platform | 3d, 2d vr & ar engine.
- Verlinden, J. (2014). *Developing an Interactive Augmented Prototyping Methodology to Support Design Reviews*. urn:nbn:nl:ui:24-uuid:253876ef-b158-4aa1-b39a-7d35fd76f753, TU Delft, Delft University of Technology.
- Vuforia (2020). Vuforia developer portal.
- Zampelis, D., Loudon, G., Gill, S., and Walker, D. (2012). Iris: Augmented reality in rapid prototyping.
- Zorriassatine, F., Wykes, C., Parkin, R., and Gindy, N. (2003). A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, 217(4):513–530.