



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

JOÃO GUSTAVO FEITOSA BRITO

**ECOS: UMA EXPOSIÇÃO VIRTUAL DE ARTEFATOS ESPACIAIS BASEADA EM
WEB 3D**

QUIXADÁ
2026

JOÃO GUSTAVO FEITOSA BRITO

ECOS: UMA EXPOSIÇÃO VIRTUAL DE ARTEFATOS ESPACIAIS BASEADA EM WEB 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Fernandes Nunes.

QUIXADÁ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B876e Brito, João Gustavo Feitosa.

Ecos : uma exposição virtual de artefatos espaciais baseada em web 3D / João Gustavo Feitosa Brito. – 2026.

47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Ciência da Computação, Quixadá, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Rubens Fernandes Nunes.

1. Exposição digital. 2. Web 3D. 3. A-frame. 4. Objetos espaciais. 5. Ambiente Virtual. I. Título.

CDD 004

JOÃO GUSTAVO FEITOSA BRITO

ECOS: UMA EXPOSIÇÃO VIRTUAL DE ARTEFATOS ESPACIAIS BASEADA EM WEB 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em: 23/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rubens Fernandes Nunes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Paulyne Matthews Jucá
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João Vilnei de Oliveira Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este projeto à minha família e às pessoas que estiveram ao meu lado ao longo dessa caminhada, bem como à ciência, que possibilitou a construção do conhecimento que tornou este trabalho viável.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.

Expresso minha profunda gratidão à minha família pelo apoio constante durante esta jornada. À minha mãe, Ana, pelo amor incondicional; ao meu pai, João, pelo incentivo; à minha irmã, Ana Paula, pela cumplicidade e conselhos valiosos; e, de modo especial, à minha sobrinha e afilhada querida, Nicolly Lavínia, cujo nascimento despertou em mim a vontade de evoluir a cada dia. Se hoje sou alguém melhor, foi por conta de vocês. Obrigado.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante a graduação, Igor Gabriel, Ulisses Alves e Izael Nunes, agradeço pelo companheirismo, pelas conversas e pela companhia constante, inclusive durante as madrugadas de estudo e de jogos. Ao meu companheiro, Anderson Luis, agradeço pelo incentivo contínuo, pela paciência e pelo apoio incondicional, que foram decisivos para a minha evolução acadêmica após períodos complicados da graduação.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Rubens Fernandes Nunes, pela orientação, compreensão, e pelas contribuições acadêmicas que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos à banca examinadora, composta pela Professora Doutora Paulyne Matthews Jucá e pelo Professor Doutor João Vilnei de Oliveira Filho, pela atenção, pelas avaliações e pelas valiosas sugestões.

Agradeço também a todos os professores que fizeram parte da minha formação ao longo da graduação, bem como aos amigos com quem compartilhei vivências que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Por fim, agradeço à ciência e aos pesquisadores que, por meio do esforço coletivo ao longo do tempo, possibilitaram a construção do conhecimento que sustenta este trabalho.

Expresso aqui minha sincera gratidão.

“Equipado com seus cinco sentidos, o homem
explora o universo ao seu redor e chama essa
aventura de Ciência”

(Edwin Powell Hubble, 1929)

RESUMO

A exploração espacial, resultado de séculos de conhecimento acumulado em astronomia, gerou inúmeros artefatos de grande valor científico e histórico. Contudo, o reconhecimento dessas conquistas é frequentemente limitado por barreiras de acessibilidade e por recursos expositivos tradicionais, como painéis estáticos e vídeos, que não capturam sua complexidade tridimensional. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma exposição digital interativa voltada à visualização de artefatos espaciais lançados pelo homem, fundamentada em conceitos de astronomia, exploração espacial e ambientes virtuais interativos. A metodologia adotada compreendeu a seleção de objetos espaciais representativos, o desenvolvimento de um ambiente virtual Web 3D estruturado em três cenários interconectados, utilizando o framework A-Frame, bem como a publicação da aplicação em ambiente web.

Como resultado, foi implementada uma aplicação acessível diretamente pelo navegador, permitindo a navegação e interação com modelos tridimensionais. A experiência foi avaliada por usuários por meio de um roteiro de tarefas e questionário, cujos resultados indicam que a aplicação atende aos objetivos propostos, apresentando viabilidade quanto à navegação, interatividade e uso como ambiente virtual expositivo.

Palavras-chave: Web 3D; Objetos Espaciais; Ambiente Virtual; Exposição Digital; A-Frame.

ABSTRACT

Space exploration, the result of centuries of accumulated knowledge in astronomy, has generated numerous artifacts of great scientific and historical value. However, the recognition of these achievements is often limited by accessibility barriers and traditional exhibition resources, such as static panels and videos, which fail to capture their three-dimensional complexity.

The objective of this work is to develop an interactive digital exhibition focused on the visualization of man-made space artifacts, grounded in concepts of astronomy, space exploration, and interactive virtual environments. The adopted methodology comprised the selection of representative space objects, the development of a Web 3D virtual environment structured into three interconnected scenarios using the A-Frame framework, as well as the publication of the application in a web environment.

As a result, an application accessible directly through a web browser was implemented, allowing navigation and interaction with three-dimensional models. The user experience was evaluated through a task-based protocol and a questionnaire, whose results indicate that the application meets the proposed objectives, demonstrating feasibility in terms of navigation, interactivity, and use as a virtual exhibition environment.

Keywords: Web 3D; Space Objects; Virtual Environment; Digital Exhibition; A-Frame.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração das órbitas terrestres LEO, MEO e GEO.	17
Figura 2 – Concepção artística de uma das sondas Voyager no espaço interestelar.	18
Figura 3 – Concepção artística da sonda espacial Rosetta em órbita do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.	18
Figura 4 – Espectro eletromagnético (acima) e absorção da atmosfera em função do comprimento de onda (abaixo), com indicação das moléculas absorventes.	19
Figura 5 – Comparação entre imagens astronômicas captadas da Terra (à esquerda, telescópio Subaru) e no espaço (à direita, Telescópio Espacial Hubble). A imagem espacial apresenta maior definição e detalhe devido à ausência de distorção atmosférica.	21
Figura 6 – Diagrama representando o padrão ECS do A-Frame.	24
Figura 7 – Exemplo de primitivas no A-Frame.	25
Figura 8 – Visualização de modelo 3D de animal extinto na aplicação web do Museu Emílio Goeldi.	28
Figura 9 – Interface interativa baseada em Cesium JS para exploração do Castello Farnese.	29
Figura 10 – Cena de entrada do museu virtual “VirtuMuse” desenvolvido em Unity.	30
Figura 11 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.	31
Figura 12 – Captura de tela do início do desenvolvimento do ambiente 01.	33
Figura 13 – Visão geral do Hall de Exposição no navegador, com destaque para os artefatos espaciais.	37
Figura 14 – Sala Temática com os quatro painéis curvos de navegação (História, Tecnologias, Missões e Futuro).	38
Figura 15 – Inspeção detalhada da sonda Voyager 1 no Visualizador Orbital com controle de rotação e zoom.	39
Figura 16 – Distribuição dos dispositivos utilizados pelos participantes para acessar a exposição.	40
Figura 17 – Avaliação da facilidade de navegação e intuição da interface.	41
Figura 18 – Avaliação da qualidade dos modelos 3D e imersão do ambiente.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro comparativo entre os trabalhos analisados e o projeto proposto. . .	30
Quadro 2 – Objetos espaciais selecionados para a exposição virtual.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>13</i>
1.2	Organização do trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Astronomia e Exploração Espacial	15
<i>2.1.1</i>	<i>Introdução aos artefatos espaciais</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Satélites artificiais</i>	<i>16</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Sondas espaciais</i>	<i>17</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Telescópios espaciais</i>	<i>19</i>
2.2	Ambientes Virtuais Interativos	21
2.3	Tecnologias de Desenvolvimento Web 3D	22
<i>2.3.1</i>	<i>OpenGL e WebGL</i>	<i>22</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Three.js</i>	<i>23</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Framework A-Frame</i>	<i>24</i>
3	TRABALHOS RELACIONADOS	27
3.1	Experiência Interativa em 3D para Exibição de Animais Extintos no Museu Emílio Goeldi	27
3.2	Rediscovering Cultural Heritage Sites by Interactive 3D Exploration	28
3.3	Design of a Virtual Museum using Unity and VR	29
3.4	Análise comparativa	30
4	METODOLOGIA	31
4.1	Ambiente de desenvolvimento e recursos utilizados	31
4.2	Seleção dos Objetos Espaciais representados na aplicação	32
4.3	Desenvolvimento do projeto	32
<i>4.3.1</i>	<i>Desenvolvimento do Ambiente 01: Estrutura da exposição</i>	<i>32</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Desenvolvimento do Ambiente 02: Salas Temáticas Interativas</i>	<i>33</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Desenvolvimento do Ambiente 03: Visualizador 3D Orbital</i>	<i>34</i>
<i>4.3.4</i>	<i>Finalização e Deploy</i>	<i>34</i>

4.4	Procedimentos de Avaliação da Experiência	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	Implementação da Interface Web 3D	36
5.1.1	<i>Ambiente 01: Hall de Exposição</i>	36
5.1.2	<i>Ambiente 02: Salas Temáticas</i>	37
5.1.3	<i>Ambiente 03: Visualizador Orbital</i>	38
5.2	Avaliação da Experiência do Usuário	39
5.2.1	<i>Perfil dos Participantes</i>	39
5.2.2	<i>Análise de Experiência e Navegação</i>	40
5.2.3	<i>Qualidade Visual e Imersão</i>	41
5.2.4	<i>Percepção de Aprendizado e Conteúdo</i>	42
5.2.5	<i>Discussão dos Resultados</i>	42
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	44
6.1	Trabalhos Futuros	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização, o céu noturno desperta a curiosidade humana, e a astronomia surgiu como uma forma de compreender os padrões estelares, garantindo a sobrevivência da humanidade por meio da orientação, da agricultura e da medição do tempo (Pannekoek, 1989). Ao longo da história, essa área testemunhou progressos notáveis, desde a revolução copernicana com o heliocentrismo (Kuhn, 1957), até marcos como a chegada do homem à Lua, que, segundo Filho (2005), representa uma das maiores realizações da humanidade no contexto da corrida espacial ocorrida durante a Guerra Fria.

A partir do avanço tecnológico adquirido durante a Segunda Guerra Mundial, a humanidade passou a ver o espaço para além da observação, focando seus esforços na exploração prática do cosmos. Esse movimento marca o início da era espacial, caracterizada por inúmeros investimentos em ciência e tecnologia com o foco na conquista espacial. Entre os fatos mais simbólicos desse período estão o lançamento do satélite Sputnik em 1957 e a chegada do homem à Lua em 1969, acontecimentos amplamente reconhecidos como ícones da engenhosidade humana (Saraiva, 2006).

Apesar desses inúmeros avanços, conectar o público a tais feitos esbarra em desafios significativos. A maioria dos artefatos espaciais é fisicamente inacessível, seja por estarem em órbita, em outra parte do sistema solar, ou em acervos de poucos museus pelo mundo. Conseqüentemente, a divulgação de seu valor histórico e científico depende de recursos tradicionais como vídeos e painéis estáticos, que, embora úteis, nem sempre conseguem representar a complexidade tridimensional desses objetos de forma cativante e interativa (Vinhas, 2021).

Para superar essas barreiras de acesso e representação, os ambientes virtuais interativos surgem como uma poderosa solução. A criação de exposições digitais em espaços gráficos 3D permite não apenas superar as limitações físicas, mas também oferece a oportunidade de exibir artefatos de locais remotos, possibilitando que uma audiência global explore coleções e conceitos complexos sem a necessidade de deslocamento físico.

Além disso, estudos demonstram que representações em 3D têm um impacto relevante no processo de compreensão, principalmente em áreas com alta complexidade gráfica como a astronomia e a engenharia espacial. A disponibilidade de artefatos tridimensionais com os quais o usuário pode interagir livremente auxilia na apreensão de suas estruturas e funções, facilitando a retenção de conhecimento por meio de experiências inovadoras e atrativas (Cardoso *et al.*, 2014).

Diante desse cenário e do potencial dos ambientes virtuais interativos, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma exposição digital interativa baseada em tecnologia Web 3D, acessível diretamente por meio de navegadores de internet. A aplicação consiste em um ambiente virtual tridimensional voltado à visualização e interação com modelos 3D de artefatos da exploração espacial lançados pelo homem, tais como veículos espaciais, telescópios orbitais, sondas de exploração e estações espaciais.

O desenvolvimento da exposição envolve a seleção de objetos espaciais representativos, a construção de ambientes virtuais interconectados e a integração de mecanismos de navegação e interação, culminando na avaliação da experiência do usuário. A proposta busca explorar o uso de ambientes virtuais como alternativa às limitações dos meios expositivos tradicionais.

A abordagem visa oferecer uma ferramenta de exploração imersiva e acessível, que transforma a observação passiva em uma experiência de engajamento ativo, tornando o conhecimento sobre esses complexos artefatos tecnológicos mais direto e interativo para um público amplo, desde estudantes a entusiastas da área.

1.1 Objetivos

A seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que orientam o desenvolvimento do projeto.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma exposição digital interativa baseada em tecnologia Web 3D, voltada à visualização e interação com modelos tridimensionais de artefatos espaciais lançados pelo homem, utilizando o framework A-Frame.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, é necessário cumprir alguns objetivos específicos:

- Realizar um estudo inicial sobre os principais marcos da exploração espacial;
- Desenvolver a aplicação Web 3D com funcionalidades de navegação no ambiente virtual e interação com os modelos tridimensionais dos artefatos selecionados;
- Realizar questionário para avaliar a experiência do usuário e a eficácia da ferramenta.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em mais cinco capítulos, estruturados a seguir:

- O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, estabelecendo os conceitos de exploração espacial e tecnologias Web 3D que sustentam a pesquisa, além da descrição de conceitos dos objetos espaciais adotados neste trabalho, e as tecnologias utilizadas;
- O Capítulo 3 dedica-se à análise de Trabalhos Relacionados, contextualizando a presente proposta frente às soluções já existentes, e destacando as semelhanças e diferenças com o presente trabalho;
- No Capítulo 4 é apresentada a Metodologia de desenvolvimento, detalhando as ferramentas e os procedimentos adotados;
- O Capítulo 5 expõe os Resultados, demonstrando o progresso alcançado na construção da aplicação;
- O Capítulo 6 conclui o trabalho, apresentando as considerações da pesquisa e os possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho. Serão abordados os conceitos-chave relacionados à astronomia, aos artefatos espaciais e aos ambientes virtuais interativos. Em seguida, são detalhadas as tecnologias de desenvolvimento Web 3D, como WebGL, Three.js e A-Frame, essenciais para a construção da exposição digital proposta.

2.1 Astronomia e Exploração Espacial

A astronomia é o estudo do espaço além do planeta Terra, incluindo também fenômenos observados na atmosfera terrestre com origens no espaço, como meteoros e auroras (Ridpath, 2012). Sua origem está profundamente ligada ao surgimento e progresso da humanidade. Desde os tempos mais remotos, o ser humano observa os céus em busca de padrões que auxiliem em atividades essenciais, como a agricultura, pesca e marcação do tempo. A observação dos corpos celestes permitiu a criação dos primeiros calendários e sistemas de orientação para viagens marítimas, sendo, então, fundamental para o desenvolvimento das primeiras sociedades organizadas (Friaça *et al.*, 2000).

2.1.1 Introdução aos artefatos espaciais

A exploração espacial impulsionou o desenvolvimento de diferentes artefatos tecnológicos destinados à observação, à coleta de dados e à interação com o ambiente espacial. Esses artefatos possibilitam a ampliação do conhecimento científico sobre o universo, bem como o desenvolvimento de aplicações práticas associadas à comunicação, navegação e monitoramento da Terra.

Neste trabalho, o foco recai sobre três categorias principais de artefatos espaciais: os satélites artificiais, as sondas espaciais e os telescópios espaciais. Nas subseções a seguir, cada um desses objetos é apresentado de forma individual, destacando suas características gerais e sua importância no contexto da exploração espacial.

2.1.2 Satélites artificiais

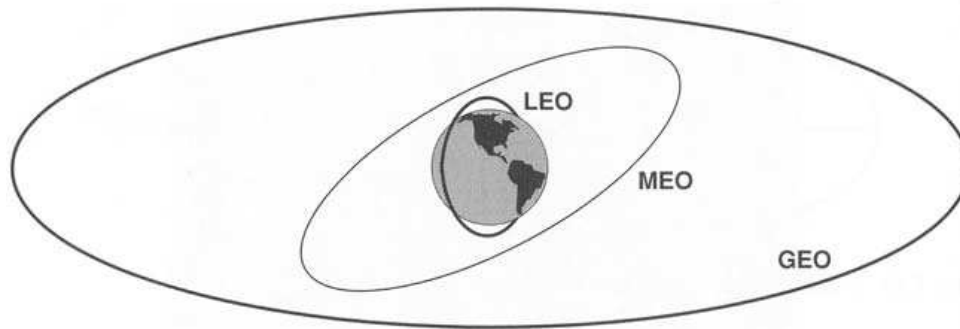
Um satélite artificial é qualquer corpo feito pelo ser humano e colocado em órbita ao redor da Terra ou de outro planeta. No contexto de comunicações, um satélite atua fundamentalmente como uma estação repetidora de micro-ondas localizada no espaço, permitindo que dois ou mais usuários em terra troquem informações através de antenas apropriadas. A operação e a aplicação destes artefatos dependem intrinsecamente da mecânica orbital (leis de Kepler), onde a altitude do satélite determina seu período de revolução e sua área de cobertura (Elbert, 2008).

De acordo com Elbert (2008), as configurações orbitais são classificadas principalmente em três categorias, essenciais para a compreensão da engenharia de sistemas espaciais:

- **LEO (*Low Earth Orbit*):** Órbita Terrestre Baixa, com altitudes típicas entre 500 km e 1.000 km. Satélites nesta órbita movem-se rapidamente em relação à superfície terrestre, completando uma volta em cerca de 90 minutos. Vantagens incluem menor atraso de sinal (latência) e menor perda de propagação, sendo ideais para sensoriamento remoto e constelações de telefonia móvel.
- **MEO (*Medium Earth Orbit*):** Órbita Terrestre Média, com altitudes em torno de 10.000 km e períodos de aproximadamente 6 horas. É comumente utilizada por sistemas de navegação como o GPS.
- **GEO (*Geostationary Earth Orbit*):** Órbita Geoestacionária, localizada a aproximadamente 36.000 km de altitude no plano equatorial. Nesta configuração, o satélite orbita em sincronia com a rotação da Terra, parecendo fixo em um ponto no céu. Isso permite o uso de antenas terrestres fixas e fornece uma cobertura ampla e constante de uma vasta área geográfica (Elbert, 2008).

Além das telecomunicações, satélites científicos carregam instrumentos para estudar a atmosfera terrestre, o campo magnético, ou observar o universo. A Figura 1 apresenta uma ilustração das principais configurações orbitais, incluindo as órbitas LEO, MEO e GEO.

Figura 1 – Ilustração das órbitas terrestres LEO, MEO e GEO.



Fonte: (Elbert, 2008)

2.1.3 Sondas espaciais

Sondas espaciais são veículos espaciais não tripulados lançados para explorar objetos celestes mais distantes, como o Sol, planetas, planetas anões, corpos menores (cometas e asteroides) e o meio interestelar. Diferentemente dos satélites artificiais, que permanecem na órbita terrestre, as sondas procuram escapar da gravidade da Terra para alcançar destinos no espaço profundo (Petrescu, 2019).

Segundo Petrescu (2019), a operação destes artefatos impõe desafios significativos de engenharia. Devido às grandes distâncias do Sol, as sondas frequentemente não podem depender apenas de painéis solares, exigindo geradores termoelétricos de radioisótopos (RTGs) para energia. Além disso, o atraso na comunicação (latência) impede o controle em tempo real por operadores humanos, exigindo que a sonda possua um alto grau de autonomia para tomada de decisões críticas e correção de trajetória.

As missões de sondas espaciais são geralmente categorizadas em diferentes tipos, dependendo do método de exploração:

- **Flyby (Sobrevoo):** A sonda passa próximo ao objeto celeste sem entrar em órbita, coletando dados durante o breve encontro (ex: New Horizons em Plutão e Voyager).
- **Orbiter:** A sonda reduz sua velocidade para ser capturada pela gravidade do corpo celeste e orbitá-lo, permitindo estudos de longa duração (ex: Cassini em Saturno).
- **Lander e Rover:** Veículos projetados para pousar na superfície e, no caso dos rovers, locomover-se para análise *in situ* (ex: missões Viking e Curiosity em Marte).

O programa Voyager é um exemplo emblemático da categoria de sobrevoo e exploração interestelar. Lançadas em 1977 para aproveitar um alinhamento planetário favorável, as sondas gêmeas Voyager 1 e 2 exploraram os gigantes gasosos e hoje viajam pelo meio interestelar,

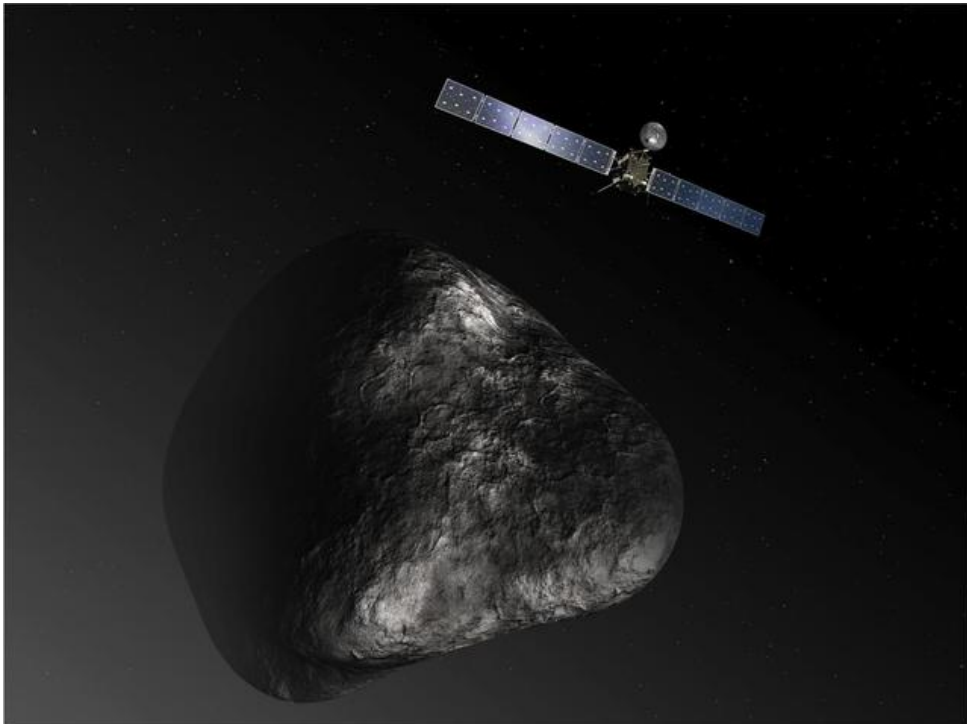
enviando dados sobre a heliosfera (Petrescu, 2019). A Figura 2 ilustra a concepção artística deste artefato. Outro marco importante foi a missão Rosetta, que realizou o estudo detalhado de um cometa, incluindo um módulo de pouso, conforme visto na Figura 3.

Figura 2 – Concepção artística de uma das sondas Voyager no espaço interestelar.



Fonte: (NASA, 2025b).

Figura 3 – Concepção artística da sonda espacial Rosetta em órbita do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.



Fonte: (NASA, 2025b).

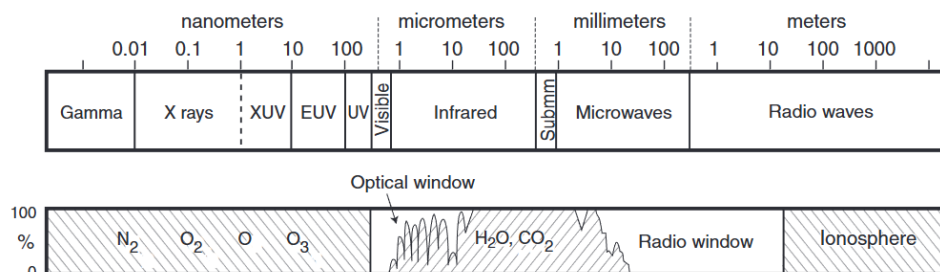
2.1.4 Telescópios espaciais

Telescópios espaciais são observatórios astronômicos posicionados além da atmosfera terrestre, uma localização estratégica que lhes confere vantagens decisivas sobre os instrumentos baseados no solo. Embora a construção e manutenção desses artefatos sejam complexas e custosas, elas se justificam pela necessidade de superar duas barreiras fundamentais impostas pela atmosfera da Terra: a extinção atmosférica (filtragem de comprimentos de onda) e a turbulência óptica (degradação da nitidez)(Bely, 2003).

A primeira barreira refere-se à extinção atmosférica. A atmosfera terrestre não é transparente para todo o espectro eletromagnético. Bely (2003) explica que moléculas presentes no ar, como o ozônio (O_3), o dióxido de carbono (CO_2) e, principalmente, o vapor d'água (H_2O), atuam como filtros que absorvem ou dispersam a radiação proveniente do espaço antes que ela atinja o solo. Enquanto a luz visível e as ondas de rádio conseguem passar por “janelas” atmosféricas, a maior parte da radiação ultravioleta (UV), raios X, raios gama e grandes porções do infravermelho são bloqueadas. Portanto, telescópios espaciais são essenciais para observar o universo nesses comprimentos de onda invisíveis a partir da superfície, permitindo o estudo de fenômenos energéticos e objetos frios ocultos por poeira cósmica.

Essa limitação imposta pela atmosfera pode ser visualizada na Figura 4, que apresenta o espectro eletromagnético e as faixas de absorção atmosférica associadas às principais moléculas presentes no ar.

Figura 4 – Espectro eletromagnético (acima) e absorção da atmosfera em função do comprimento de onda (abaixo), com indicação das moléculas absorventes.



Fonte: (Bely, 2003).

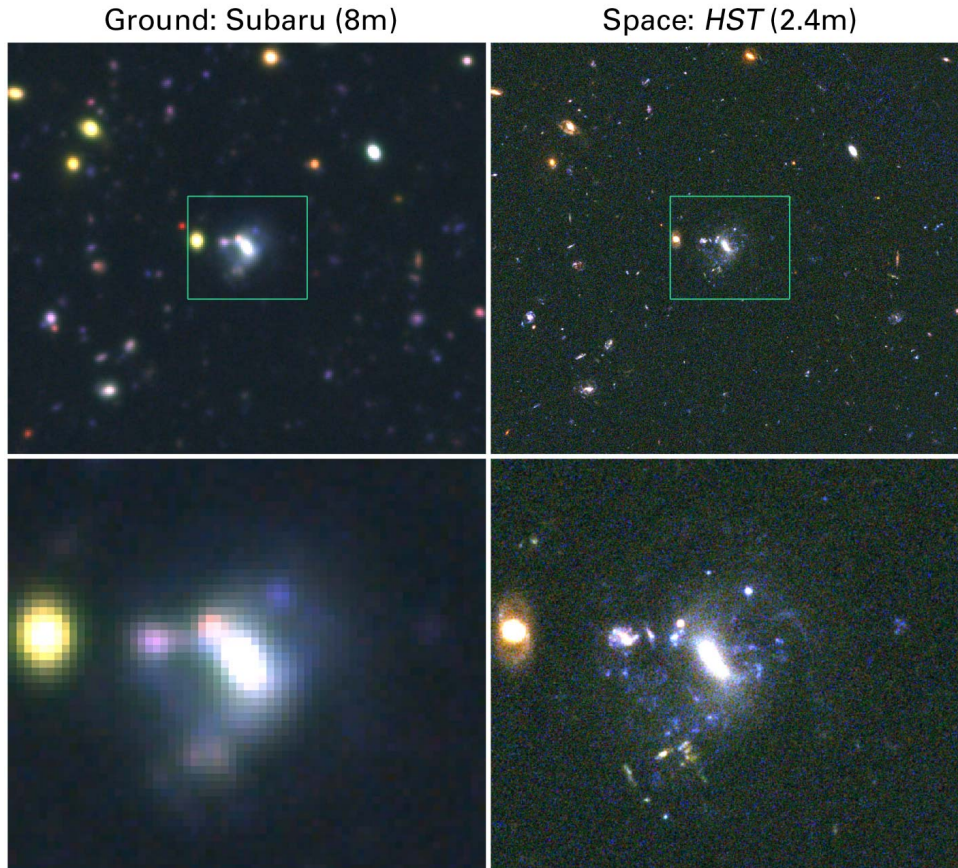
A segunda barreira, e talvez a mais crítica para a qualidade da imagem, é a turbulência atmosférica, fenômeno conhecido astronomicamente como *seeing*. Bely (2003) descreve que a atmosfera nunca está estática; ventos e convecção térmica misturam camadas de ar com diferentes

temperaturas e densidades. Como o índice de refração do ar depende de sua densidade, a luz que viaja através dessas camadas turbulentas sofre desvios constantes e aleatórios em sua trajetória. Para um observador no solo, isso faz com que as estrelas pareçam cintilar e que as imagens de objetos extensos fiquem borradas, limitando severamente a resolução angular (capacidade de distinguir detalhes finos).

No vácuo do espaço, essa limitação desaparece. Sem a interferência do ar, a luz viaja em linha reta até os espelhos do telescópio. Bely (2003) destaca que, nesse ambiente, a nitidez das imagens é limitada apenas pela ótica do instrumento e pelas leis da física (o limite de difração), e não pelas condições ambientais. Isso permite que telescópios espaciais, mesmo com espelhos menores que os gigantes terrestres, capturem imagens com uma clareza superior, revelando estruturas finas em galáxias distantes ou detalhes em nebulosas planetárias que seriam impossíveis de resolver através da atmosfera. Além disso, o ambiente espacial oferece uma estabilidade instrumental e um “céu mais escuro” (ausência de luz espalhada pela atmosfera e de emissão térmica do ar), o que aumenta a sensibilidade dos instrumentos para detectar objetos extremamente tênues e distantes.

A Figura 5 ilustra essa diferença dramática ao comparar a mesma região do céu observada por um telescópio terrestre de grande porte e pelo Telescópio Espacial Hubble. A imagem espacial apresenta estruturas definidas e contraste elevado, evidenciando o ganho científico obtido ao se eliminar a distorção atmosférica.

Figura 5 – Comparação entre imagens astronômicas captadas da Terra (à esquerda, telescópio Subaru) e no espaço (à direita, Telescópio Espacial Hubble). A imagem espacial apresenta maior definição e detalhe devido à ausência de distorção atmosférica.



Fonte: (NASA, 2025a).

2.2 Ambientes Virtuais Interativos

Os ambientes virtuais interativos são espaços digitais tridimensionais, gerados por computador, que permitem ao usuário navegar e interagir com objetos e informações em tempo real. Diferentemente de mídias estáticas, como imagens ou vídeos, esses ambientes oferecem uma experiência de imersão e exploração ativa, onde o usuário controla seu ponto de vista e suas ações dentro do cenário virtual (Lepouras *et al.*, 2004).

Para compreender o potencial dessas ferramentas, é fundamental distinguir os conceitos de tecnologia e experiência do usuário. Segundo Slater (2009), a imersão não é uma sensação subjetiva, mas sim uma descrição objetiva das capacidades tecnológicas de um sistema. Um sistema é considerado mais imersivo quanto maior for a fidelidade de suas imagens e, crucialmente, quanto melhor ele suportar as contingências sensorio-motoras (SCs).

As SCs referem-se às ações que o usuário realiza para perceber o ambiente. No

mundo físico, movemos a cabeça para mudar o campo de visão. Em ambientes virtuais de alta imersão, o sistema responde a esses movimentos naturais. No entanto, em sistemas baseados em monitores ou Web 3D (conhecidos como sistemas de desktop), Slater (2009) argumenta que ocorre um processo distinto. Embora o usuário não tenha a “Ilusão de Lugar” (Place Illusion) automática — a sensação instintiva de “estar lá” física — ele engaja em um processo de recriação mental. Ao utilizar interfaces como mouse e teclado para rotacionar um artefato espacial ou navegar pelo cenário, o usuário traduz ações motoras em percepção visual, criando uma forma de engajamento ativo que supera a passividade de vídeos ou fotos.

Além disso, a eficácia de uma exposição virtual depende da Ilusão de Plausibilidade (Plausibility Illusion - Psi). Slater descreve a Psi como a ilusão de que os eventos ou objetos representados estão realmente ocorrendo ou existem, baseada na credibilidade da interação. No contexto de artefatos espaciais, isso significa que a renderização realista de materiais (metais, painéis solares) e a física correta dos objetos contribuem para que o visitante aceite aquele modelo digital como uma representação fidedigna do objeto real, validando o aprendizado (Slater, 2009).

Com o avanço das tecnologias web, tornou-se possível disponibilizar esses ambientes 3D diretamente em navegadores de internet (Web 3D), eliminando a necessidade de instalação de softwares dedicados ou equipamentos de alto custo. Isso democratiza o acesso a conteúdos complexos, permitindo que qualquer pessoa com um dispositivo conectado à internet possa explorar modelos tridimensionais detalhados, promovendo a disseminação do conhecimento científico de forma ampla e inclusiva.

2.3 Tecnologias de Desenvolvimento Web 3D

O desenvolvimento de aplicações gráficas interativas para a web evoluiu significativamente, passando de plug-ins proprietários para padrões abertos e nativos. A seguir, são descritas as principais tecnologias que fundamentam a criação da exposição digital proposta neste trabalho.

2.3.1 *OpenGL e WebGL*

A base para a geração de imagens computacionais tridimensionais de alto desempenho reside em interfaces de programação gráfica robustas. O OpenGL (*Open Graphics Library*) consolidou-se historicamente como um padrão industrial independente de hardware para a rende-

rização de computação gráfica 2D e 3D. Segundo Hearn e Baker (2004), o OpenGL fornece um conjunto abrangente de comandos e funções que permitem a especificação de formas geométricas e o controle detalhado de como essas formas são renderizadas, atuando como uma camada essencial de abstração entre o software desenvolvido e o hardware gráfico (GPU).

Com a evolução da internet, surgiu a necessidade de levar essas capacidades gráficas aceleradas por hardware para o ambiente web, sem a dependência de *plugins* externos proprietários. Nesse contexto, o WebGL (*Web Graphics Library*) estabeleceu-se como uma API JavaScript projetada para renderizar gráficos 3D interativos diretamente em navegadores compatíveis. De acordo com Parisi (2012), o WebGL é derivado do OpenGL ES (*Embedded Systems*) e permite que o código gráfico acesse diretamente a GPU do dispositivo do usuário através do elemento HTML5 <canvas>.

Embora o WebGL forneça o poder de processamento necessário para criar exposições virtuais imersivas, sua implementação direta (“pura”) exige um conhecimento técnico profundo sobre a *pipeline* gráfica, *shaders* e matemática matricial (Parisi, 2012). Por essa razão, no desenvolvimento deste trabalho, o WebGL atua como a tecnologia fundamental subjacente, sobre a qual bibliotecas e frameworks de mais alto nível — como Three.js e A-Frame — são construídos para abstrair a complexidade e agilizar a criação dos ambientes virtuais.

2.3.2 *Three.js*

Conforme discutido anteriormente, embora o WebGL forneça o poder computacional necessário para renderização gráfica na web, sua utilização direta impõe uma barreira técnica significativa devido à verbosidade e complexidade do código. Para mitigar essa dificuldade, Danchilla (2012) apresenta o Three.js como um dos frameworks mais amplamente utilizados para abstrair as chamadas de API de baixo nível do WebGL.

O objetivo central dessa biblioteca é tornar o desenvolvimento de aplicações gráficas mais acessível e produtivo. Segundo Danchilla (2012), o Three.js atua como uma camada intermediária que simplifica a criação de cenas tridimensionais, permitindo que desenvolvedores manipulem câmeras, objetos geométricos e modelos de iluminação através de chamadas de API intuitivas. Dessa forma, elimina-se a necessidade de escrever rotinas complexas de inicialização ou gerenciar manualmente a matemática matricial exigida pelo WebGL puro.

No contexto deste trabalho, o Three.js é particularmente relevante pois serve como o motor gráfico subjacente sobre o qual frameworks de mais alto nível, como o A-Frame,

são construídos, garantindo a performance da renderização enquanto oferece uma interface de programação simplificada.

2.3.3 Framework A-Frame

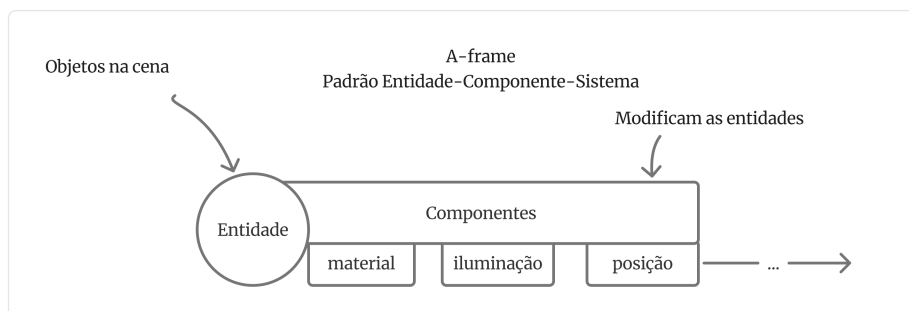
O A-Frame é um framework de código aberto desenvolvido inicialmente pela equipe da Mozilla VR em 2015, com o objetivo de democratizar a criação de experiências de Realidade Virtual na web. A biblioteca encapsula a complexidade das APIs WebGL e Three.js, permitindo que desenvolvedores estruturam cenas tridimensionais utilizando uma sintaxe declarativa baseada em HTML (Neelakantam; Pant, 2017).

A principal característica técnica do A-Frame é a adoção do padrão de arquitetura *Entity-Component-System* (ECS), amplamente utilizado no desenvolvimento de motores de jogos de alto desempenho. De acordo com Neelakantam e Pant (2017), o ECS permite uma separação clara entre dados e lógica, sendo composto por três elementos fundamentais:

- **Entidades:** Representadas pela *tag* `<a-entity>`, são objetos genéricos que, por si só, não possuem aparência ou comportamento. Funcionam como contêineres vazios no espaço tridimensional.
- **Componentes:** São módulos de dados e lógica que podem ser acoplados às entidades para lhes conferir características. Por exemplo, ao adicionar componentes de geometria, material e posição a uma entidade, ela passa a ser visível e localizada na cena.
- **Sistemas:** Responsáveis por gerenciar grupos de componentes, fornecendo serviços globais e lógica de estado para a cena.

A Figura 6 apresenta um diagrama simplificado do padrão *Entity-Component-System* (ECS) utilizado pelo A-Frame.

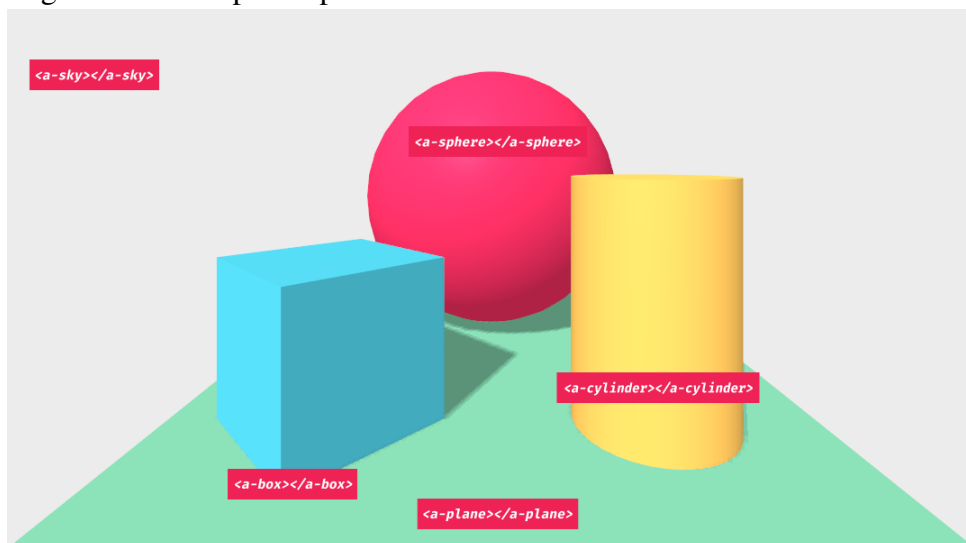
Figura 6 – Diagrama representando o padrão ECS do A-Frame.



Fonte: Adaptado de Neelakantam e Pant (2017)

Para facilitar o desenvolvimento, o A-Frame fornece as chamadas Primitivas. Segundo Neelakantam e Pant (2017), primitivas são abstrações de entidades que já possuem componentes predefinidos para representar formas geométricas comuns. Em vez de definir manualmente a geometria e o material de uma esfera, o desenvolvedor pode utilizar apenas a tag `<a-sphere>`. A Figura 7 ilustra a correspondência visual entre as tags declarativas do framework e os objetos renderizados na cena.

Figura 7 – Exemplo de primitivas no A-Frame.



Fonte: (AFrame, 2025)

Diferente do modelo de programação orientada a objetos (POO) tradicional, onde a funcionalidade é herdada, no A-Frame a funcionalidade é composta. Isso permite que desenvolvedores estendam o framework criando seus próprios componentes em JavaScript, garantindo alta flexibilidade na customização de comportamentos, como rotações orbitais ou interações de clique, para os artefatos espaciais usados neste trabalho.

Outro aspecto técnico relevante abordado por Neelakantam e Pant (2017) é o Sistema de Gerenciamento de Ativos (*Asset Management System*). Através da tag `<a-assets>`, o framework permite o pré-carregamento (*preloading*) e o cache de modelos 3D, texturas e áudios. Essa prática é essencial para a performance da aplicação, pois garante que a renderização da cena só seja iniciada após o download completo dos recursos críticos, evitando falhas visuais ou latências perceptíveis pelo usuário.

Além disso, o A-Frame fornece ferramentas integradas para depuração e composição visual, como o *Inspector* (acionado via atalho de teclado), que permite a manipulação direta das entidades e seus componentes no navegador, facilitando o ajuste fino de iluminação e

posicionamento dos modelos representados na exposição.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são apresentados trabalhos e pesquisas que utilizam tecnologias de Realidade Virtual (RV) e WEB 3D no contexto de exposições virtuais. O objetivo é analisar implementações existentes, destacando abordagens baseadas em motores de jogos e bibliotecas gráficas para web, a fim de situar a proposta desenvolvida neste trabalho.

3.1 Experiência Interativa em 3D para Exibição de Animais Extintos no Museu Emílio Goeldi

O trabalho Pina *et al.* (2025) apresenta o desenvolvimento de uma aplicação web interativa baseada em WebGL para a visualização de modelos tridimensionais de animais extintos do território brasileiro, no contexto do Museu Paraense Emílio Goeldi. O artigo investigou como a visualização 3D interativa pode melhorar o engajamento dos visitantes e a retenção de conhecimento em comparação com exposições tradicionais.

A aplicação foi desenvolvida utilizando a biblioteca *React Three Fiber* (uma abstração para Three.js utilizando ReactJS), com foco em otimização para dispositivos móveis e design responsivo. O estudo contou com 150 participantes e demonstrou que o grupo que utilizou a aplicação 3D obteve resultados significativamente superiores em engajamento e retenção de conhecimento (imediate e a longo prazo) em relação ao grupo de controle.

Assim como este trabalho, a proposta de Pina *et al.* (2025) utiliza tecnologias Web 3D para promover o acesso a acervos que possuem limitações de acesso físico ou que não existem mais. Ambos compartilham o uso de bibliotecas baseadas em JavaScript para garantir acessibilidade via navegador. A diferença principal reside no domínio de aplicação: enquanto Pina *et al.* (2025) foca na paleontologia e na fauna brasileira, este trabalho concentra-se na tecnologia espacial e artefatos de engenharia humana.

A Figura 8 ilustra a interface da aplicação desenvolvida, exibindo o modelo 3D de uma preguiça-gigante *Megalonyx jeffersonii*.

Figura 8 – Visualização de modelo 3D de animal extinto na aplicação web do Museu Emílio Goeldi.



Fonte: (Pina *et al.*, 2025).

3.2 Rediscovering Cultural Heritage Sites by Interactive 3D Exploration

O artigo Gaspari *et al.* (2023) discute o uso de ferramentas WebGL de código aberto para a documentação e exploração interativa de sítios de patrimônio cultural. O estudo de caso focou no Castello Farnese (Itália), utilizando dados de fotogrametria por drones e escaneamento a laser terrestre.

Foram avaliadas duas bibliotecas principais: *Potree* (para nuvens de pontos) e *Cesium JS* (para dados geoespaciais e modelos 3D em larga escala). A aplicação web resultante permite a navegação 3D, medições e visualização de evoluções históricas do sítio através de *storytelling* digital. O trabalho destaca a importância de soluções *open-source* para garantir a reprodutibilidade e acessibilidade dos dados patrimoniais.

Semelhante a este trabalho, a pesquisa realizada em Gaspari *et al.* (2023) utiliza o navegador web como meio de distribuição de conteúdo 3D. Contudo, enquanto lida com dados massivos de digitalização de ambientes reais (nuvens de pontos de edifícios e terrenos) focados em preservação arquitetônica e planejamento urbano, este projeto foca na renderização de modelos 3D otimizados de objetos (artefatos espaciais) em um ambiente controlado, priorizando a performance em dispositivos de consumo comum.

A Figura 9 mostra a interface baseada em Cesium JS com a visualização do modelo

3D do castelo sobreposta a imagens de satélite.

Figura 9 – Interface interativa baseada em Cesium JS para exploração do Castello Farnese.



Fonte: (Gaspari *et al.*, 2023).

3.3 Design of a Virtual Museum using Unity and VR

O trabalho Sequeira (2024) aborda o desenvolvimento do projeto “VirtuMuse”, um ambiente de museu virtual imersivo focado na fusão entre tecnologia, arte e educação. A aplicação foi construída utilizando o motor de jogos Unity, visando criar exposições futuristas onde os visitantes podem viajar virtualmente para descobrir obras de arte.

Esteve presente o uso do *XR Interaction Toolkit* para implementar interações em Realidade Virtual (RV), permitindo que usuários com headsets (como o Meta Quest) manipulem objetos e naveguem pelo espaço. O projeto enfatiza a gamificação e a imersão sensorial proporcionada por motores gráficos robustos, abordando desafios de design de ambientes virtuais e interface de usuário em RV.

A abordagem utilizada serve como um contraponto importante à abordagem Web 3D adotada nesta pesquisa. Enquanto Sequeira (2024) opta por uma solução “nativa” baseada em *game engine* (Unity) que exige hardware específico (headsets VR) ou instalação de software para atingir alta fidelidade gráfica e imersão total, o presente projeto prioriza o acesso através de tecnologias web (WebGL/A-Frame), sem exigir instalação local, permitindo o acesso imediato via navegador em computadores e celulares, ainda que com limitações gráficas em comparação a motores nativos.

A Figura 10 ilustra uma das cenas do ambiente virtual desenvolvido em Unity, destacando a qualidade visual e a disposição dos artefatos.

Figura 10 – Cena de entrada do museu virtual “VirtuMuse” desenvolvido em Unity.



Fonte: (Sequeira, 2024).

3.4 Análise comparativa

O Quadro 1 apresenta uma comparação entre os estudos analisados e o trabalho proposto, considerando o objetivo principal, a tecnologia empregada e o diferencial de cada abordagem.

Quadro 1 – Quadro comparativo entre os trabalhos analisados e o projeto proposto.

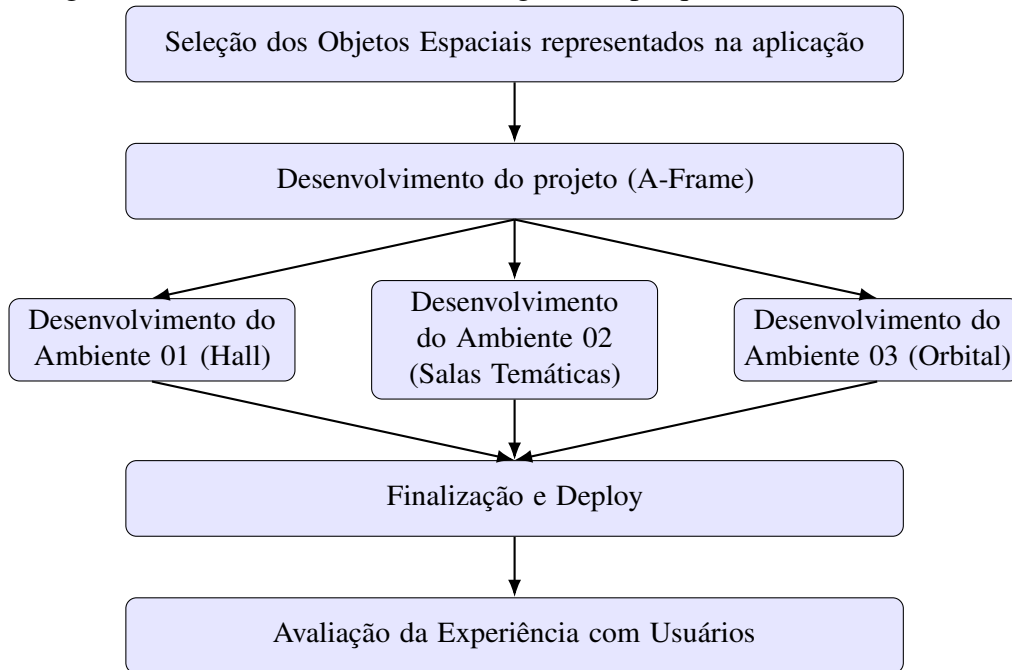
Trabalho	Objetivo	Tecnologia	Diferencial
Este Trabalho	Ambiente virtual com exposição de artefatos espaciais acessível via navegador.	WebGL / A-Frame	Foco em tecnologia espacial; Acesso direto via navegador, dispensando instalação local, e otimização web.
Pina <i>et al.</i> (2025)	Ensino de paleontologia através de modelos 3D interativos.	WebGL / React Three Fiber	Validação do impacto educacional e otimização para mobile.
Gaspari <i>et al.</i> (2023)	Documentação e exploração de sítios de patrimônio cultural em larga escala.	Potree / Cesium JS (Open Source)	Foco em dados geoespaciais massivos (nuvens de pontos) e arquitetura.
Sequeira (2024)	Criação de experiência imersiva e gamificada de arte.	Unity / VR Headsets	Alta fidelidade gráfica e imersão total via hardware de RV.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 METODOLOGIA

O ambiente utilizado e os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho estão descritos a seguir. O fluxo principal, desde a concepção até a validação com usuários, pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 Ambiente de desenvolvimento e recursos utilizados

A aplicação foi projetada como uma plataforma Web 3D, permitindo o acesso via navegadores modernos em computadores pessoais e dispositivos móveis, sem a necessidade de instalação de aplicativos externos ou plugins proprietários. Essa escolha técnica visa a máxima portabilidade e facilidade de acesso, garantindo compatibilidade tanto com sistemas Android (via Chrome/Firefox) quanto iOS (via Safari).

O desenvolvimento foi estruturado sobre o framework A-Frame, uma biblioteca de código aberto construída sobre Three.js e WebGL. O A-Frame foi selecionado por sua arquitetura baseada em Entity-Component System (ECS), que facilita a criação de ambientes virtuais imersivos através de uma sintaxe declarativa em HTML.

4.2 Seleção dos Objetos Espaciais representados na aplicação

Nesta seção, foram definidos os modelos tridimensionais que representam artefatos espaciais lançados pelo homem, que compõem o acervo da exposição virtual.

A seleção dos objetos foi baseada em critérios históricos e científicos, visando abranger diferentes tipos de artefatos espaciais, como veículos espaciais, telescópios e sondas de exploração. A escolha considerou a disponibilidade de modelos 3D otimizados e liberados para uso.

Os modelos 3D foram obtidos a partir de repositórios públicos, como o Sketchfab e bases da NASA, selecionados conforme disponibilidade e adequação para uso em aplicações Web 3D.

Os objetos selecionados estão organizados conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Objetos espaciais selecionados para a exposição virtual.

Categoria	Objeto	Justificativa
Veículos espaciais	Saturn V	Lançou as missões Apollo.
Telescópios	Hubble	Telescópio espacial responsável por imagens científicas icônicas.
	James Webb	Telescópio lançado no fim de 2021, capaz de observar o universo primitivo.
Sondas de exploração	Voyager 1	Sonda que representa a exploração interestelar.
Estações espaciais	ISS	Principal laboratório orbital de cooperação internacional.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 Desenvolvimento do projeto

Nesta etapa, é detalhado o processo técnico e metodológico para o desenvolvimento do ambiente virtual da exposição. O objetivo principal desta fase é a construção da aplicação completa, estruturada em três ambientes interconectados.

4.3.1 Desenvolvimento do Ambiente 01: Estrutura da exposição

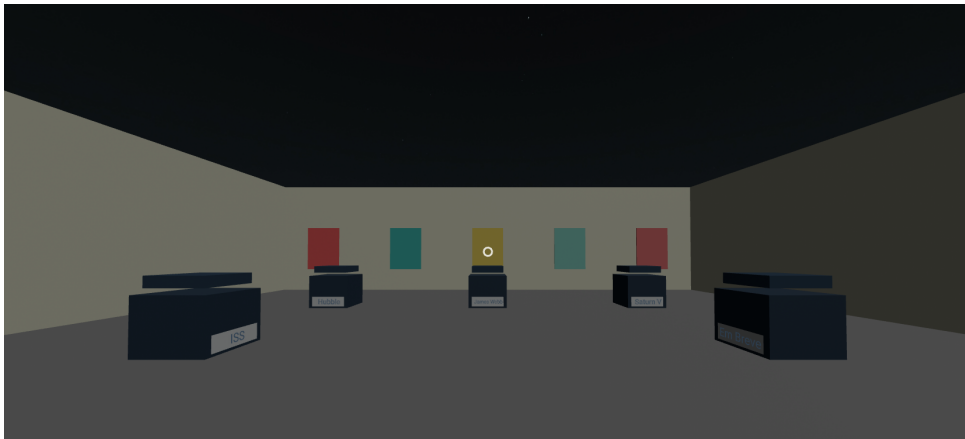
O primeiro ambiente, denominado “Hall da Exposição”, atua como o ponto central da aplicação, onde os cinco modelos tridimensionais estão dispostos. O desenvolvimento desta etapa

foi estruturado em três fases: construção arquitetônica, integração dos ativos 3D e implementação da interatividade.

A construção do cenário virtual utilizou primitivas geométricas básicas, como cubos (<a-box/>) e planos (<a-plane/>), para delimitar paredes, teto e piso. A escolha de criar uma réplica de um espaço arquitetônico físico, ao invés de um ambiente mais textual, visa facilitar a expansão futura do projeto para dispositivos de Realidade Virtual (VR), considerando aspectos de orientação e percepção espacial do usuário.

Após a estruturação física, configurou-se o sistema de iluminação virtual para garantir a visibilidade e destacar os elementos centrais. O protótipo inicial do hall da exposição é exibido na Figura 12.

Figura 12 – Captura de tela do início do desenvolvimento do ambiente 01.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, a lógica de navegação foi implementada através de componentes interativos (*hotspots*). O desenvolvimento seguiu a seguinte lógica:

- **Interatividade dos Modelos:** Scripts foram associados a cada artefato 3D para que, ao serem selecionados pelo usuário, exibam uma pequena descrição sobre o item e um botão que, ao ser clicado, aciona a transição para o Ambiente 02.
- **Portal de Retorno:** Foi desenvolvido um componente A-frame personalizado na cena que atua como um portal, similar à tag <a-link/>, cuja função programada é recarregar a tela de apresentação inicial.

4.3.2 Desenvolvimento do Ambiente 02: Salas Temáticas Interativas

O segundo ambiente foi concebido como o núcleo informativo da aplicação. Para cada objeto espacial, foi desenvolvida uma cena dedicada (“Sala Temática”), contendo o modelo

3D em destaque e painéis organizados para fornecer informações ao toque ou clique.

Tecnicamente, o desenvolvimento desta etapa priorizou a integração de elementos de Web 3D com conteúdos de uma página web tradicional. A construção seguiu os passos abaixo:

1. **Implementação arquitetônica da sala temática:** Foram criados painéis interativos curvos ao redor do objeto, categorizados em quatro tópicos principais: *História, Tecnologias, Missões e Futuro*.
2. **Navegação Híbrida:** A exibição do conteúdo textual detalhado foi desenvolvida por meio de páginas HTML convencionais. Ao interagir com os painéis na cena 3D, scripts acionam a abertura dessas páginas externas, garantindo melhor legibilidade para textos longos e vídeos.
3. **Lógica de Transição:** O modelo 3D presente na sala atua também como um objeto interativo. Foi associado a ele um evento de clique (*input trigger*) que carrega a cena subsequente, transportando o usuário para o visualizador detalhado.

4.3.3 *Desenvolvimento do Ambiente 03: Visualizador 3D Orbital*

O terceiro ambiente tem como objetivo técnico o isolamento do artefato para inspeção visual detalhada. Diferente dos ambientes anteriores, o foco desse ambiente foi a manipulação da câmera e a fidelidade da renderização, sem a interferência de cenários complexos.

O desenvolvimento deste visualizador concentrou-se na programação da câmera e na iluminação:

- **Script de Câmera Orbital:** A movimentação da cena foi implementada através do componente `orbit-controls`, disponível na biblioteca open-source A-Frame Extras. Este recurso permite ao usuário rotacionar, dar zoom e orbitar livremente ao redor do objeto.
- **Otimização da Cena:** O ambiente foi configurado com um fundo neutro e um sistema de iluminação de três pontos (*three-point lighting*) para realçar a volumetria do modelo espacial.

4.3.4 *Finalização e Deploy*

A etapa final do projeto focou na transformação das cenas isoladas em um sistema integrado.

1. **Componente de Navegação:** Foi desenvolvido um componente personalizado utilizando

a função `AFRAME.registerComponent` para gerenciar as transições e o pré-carregamento dos modelos, visando reduzir a latência.

2. **Publicação:** O sistema integrado foi publicado em ambiente de produção utilizando o serviço GitHub Pages, garantindo acesso público via URL.

4.4 Procedimentos de Avaliação da Experiência

Para validar a aplicação desenvolvida e coletar feedback sobre a experiência do usuário, foi delineada uma etapa de avaliação quantitativa e qualitativa. O procedimento foi realizado remotamente, utilizando um formulário eletrônico (Google Forms) divulgado para voluntários.

A metodologia de avaliação foi estruturada em três fases:

1. **Roteiro de Tarefas:** Antes de responder ao questionário, os participantes foram instruídos a realizar um conjunto de ações na aplicação para garantir que explorassem todas as funcionalidades. As tarefas incluíam: navegar pelo Hall, interagir com um artefato específico, acessar uma Sala Temática para leitura de conteúdo e utilizar o Visualizador Orbital.
2. **Coleta de Perfil:** Identificação do dispositivo utilizado (PC ou Mobile) e do sistema operacional (Android ou iOS/iPhone), bem como o nível de conhecimento prévio sobre exploração espacial. Essa distinção de hardware visa correlacionar o desempenho técnico da aplicação com as especificidades de renderização dos diferentes navegadores móveis.
3. **Questionário de Avaliação:** Aplicação de perguntas baseadas na escala Likert de 5 pontos (1 = Discordo Totalmente a 5 = Concordo Totalmente) e campos de feedback aberto. As perguntas foram divididas em três eixos:
 - **Experiência:** Facilidade de navegação e intuição dos controles.
 - **Qualidade Visual e Imersão:** Realismo dos modelos 3D e sensação de presença no ambiente virtual.
 - **Percepção de Conteúdo:** Clareza das informações apresentadas e relevância para a divulgação científica.

Os dados coletados nesta etapa serviram de base para a análise dos resultados apresentada no Capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento da aplicação ECOS, detalhando os ambientes virtuais construídos e a implementação das funcionalidades propostas. A aplicação final consiste em uma exposição virtual acessível via navegador, composta por três ambientes principais: o Hall de Entrada, as Salas Temáticas e o Visualizador Orbital. A versão final da aplicação foi hospedada e disponibilizada publicamente no endereço <https://gustavobritof.github.io/exposicao-ecos>.

5.1 Implementação da Interface Web 3D

A aplicação foi desenvolvida utilizando o framework A-frame, e as tecnologias básicas para desenvolvimento web, HTML e CSS, resultando em um sistema leve e compatível com dispositivos móveis e desktops. A seguir, são descritos os resultados visuais e funcionais de cada módulo.

5.1.1 Ambiente 01: Hall de Exposição

O Hall de Exposição (Ambiente 01) foi consolidado como o ponto central de navegação. A estruturação geométrica utilizando primitivas do A-Frame permitiu um carregamento rápido da cena. A iluminação foi ajustada para destacar os pedestais onde os artefatos (Saturn V, Hubble, James Webb, Voyager e ISS) estão dispostos.

A Figura 13 ilustra a visão inicial do usuário ao acessar o hall da aplicação, demonstrando a disposição dos modelos e a interface de interação (*hotspots*).

Figura 13 – Visão geral do Hall de Exposição no navegador, com destaque para os artefatos espaciais.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Visualmente, o Hall de Exposição foi concebido para mimetizar um ambiente de exposição real, porém de forma simplificada. Essa escolha visa oferecer uma referência espacial familiar ao usuário, facilitando a navegação inicial e permitindo futuras expansões da aplicação para experiências em realidade virtual, onde ambientes mais complexos podem impactar o desempenho.

5.1.2 Ambiente 02: Salas Temáticas

As Salas Temáticas foram projetadas como núcleos de transição entre a experiência imersiva e o conteúdo informativo. Para garantir a legibilidade e a organização do conhecimento, optou-se por uma arquitetura de navegação híbrida.

Neste ambiente, o modelo 3D do artefato permanece em destaque no centro, rodeado por quatro painéis curvos interativos. Cada painel funciona como um portal de acesso a um tópico específico sobre o objeto em questão. Ao interagir (clique ou toque) com um desses painéis, o usuário é redirecionado para uma página web dedicada, estruturada em HTML padrão, facilitando a leitura e o consumo de mídias.

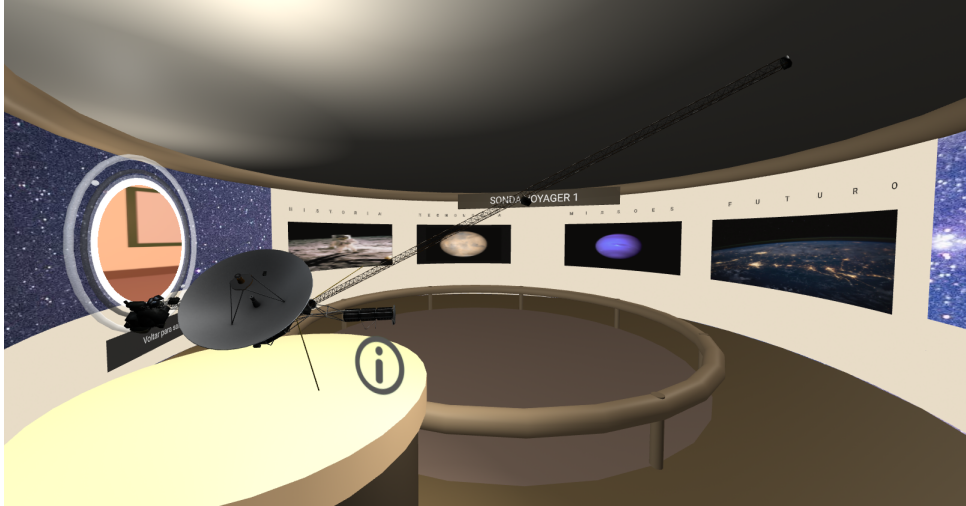
Os quatro módulos de conteúdo implementados para cada artefato foram:

1. **História:** Contexto histórico, data de lançamento e motivação da missão.
2. **Tecnologias:** Detalhes sobre a engenharia, instrumentos e inovações do artefato.
3. **Missões:** Principais descobertas ou objetivos cumpridos pelo objeto.
4. **Futuro:** O legado do artefato ou seus próximos passos (como a aposentadoria da ISS).

A Figura 14 ilustra a disposição dos painéis curvos ao redor do modelo na cena 3D,

servindo como menu de navegação espacial.

Figura 14 – Sala Temática com os quatro painéis curvos de navegação (História, Tecnologias, Missões e Futuro).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

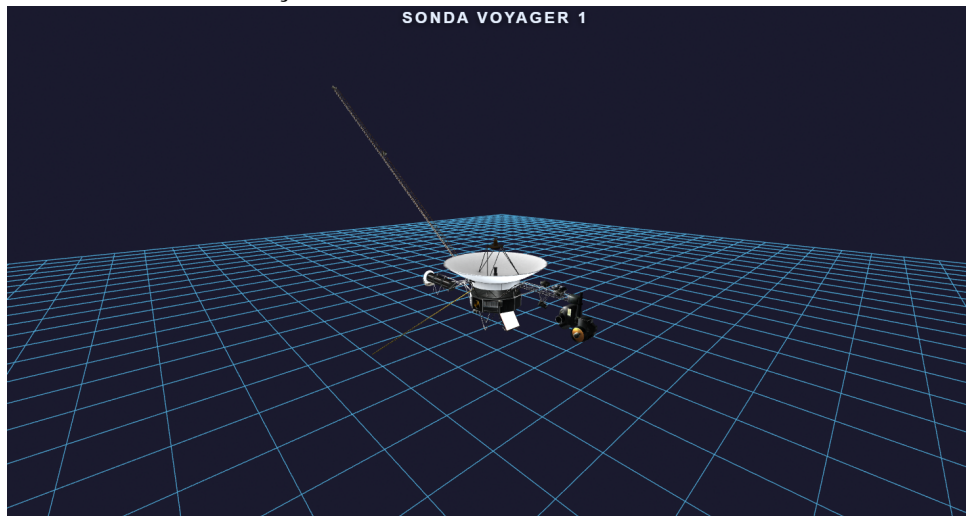
O formato circular das Salas Temáticas foi adotado para garantir que todo o conteúdo estivesse ao alcance visual e interativo do usuário. Essa decisão reduz a necessidade de deslocamento, mantém o foco nos painéis centrais e busca favorecer uma experiência mais objetiva e intuitiva.

5.1.3 Ambiente 03: Visualizador Orbital

O terceiro ambiente alcançou o objetivo de permitir uma inspeção detalhada. A implementação dos controles orbitais (*orbit-controls*) possibilitou que o usuário rotacionasse a câmera livremente ao redor do objeto, observando detalhes da modelagem que não são visíveis nos outros ambientes. O fundo neutro e a iluminação de três pontos garantiram o foco total no artefato.

A Figura 15 demonstra a visualização detalhada da sonda Voyager 1 no módulo orbital.

Figura 15 – Inspeção detalhada da sonda Voyager 1 no Visualizador Orbital com controle de rotação e zoom.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O Visualizador Orbital adota o modelo tradicional de visualização de objetos 3D, no qual o artefato permanece centralizado enquanto a câmera pode ser rotacionada pelo usuário. Essa escolha facilita a inspeção do modelo e a observação de seus detalhes.

5.2 Avaliação da Experiência do Usuário

Para validar a aplicação ECOS sob a perspectiva do usuário final, foi realizado um estudo exploratório com a participação de 26 voluntários. O instrumento de coleta de dados foi um questionário online, aplicado após a utilização da ferramenta, estruturado para avaliar três dimensões principais: Experiência, Qualidade Visual/Imersão e Percepção de Aprendizado.

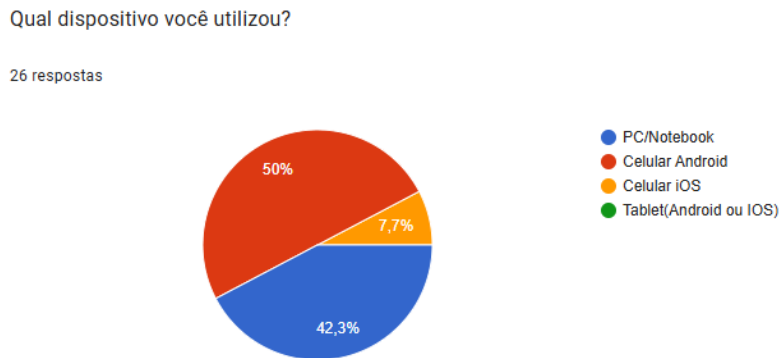
A participação foi voluntária, mediante aceite do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), com garantia de anonimato e sem coleta de dados pessoais identificáveis.

5.2.1 Perfil dos Participantes

O grupo de respondentes apresentou um perfil heterogêneo quanto ao dispositivo de acesso e nível de conhecimento prévio. A diversidade de dispositivos (PC/Notebook, Celulares Android e iOS) foi fundamental para testar a responsividade do framework A-Frame em diferentes hardwares.

A Figura 16 apresenta a distribuição dos dispositivos utilizados para acessar a aplicação, evidenciando a predominância de dispositivos móveis e uma participação relevante de computadores pessoais, ressaltando a importância da compatibilidade multiplataforma.

Figura 16 – Distribuição dos dispositivos utilizados pelos participantes para acessar a exposição.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação ao conhecimento sobre exploração espacial, a maioria dos participantes se declarou com nível “Baixo”(53,8%) ou “Médio”(42,3%), validando o público-alvo da aplicação: pessoas leigas ou entusiastas que buscam introdução ao tema mediante divulgação científica.

5.2.2 *Análise de Experiência e Navegação*

A experiência foi avaliada por escalas de concordância (1 a 5). Os resultados indicaram uma dicotomia na experiência de navegação dependendo do dispositivo utilizado.

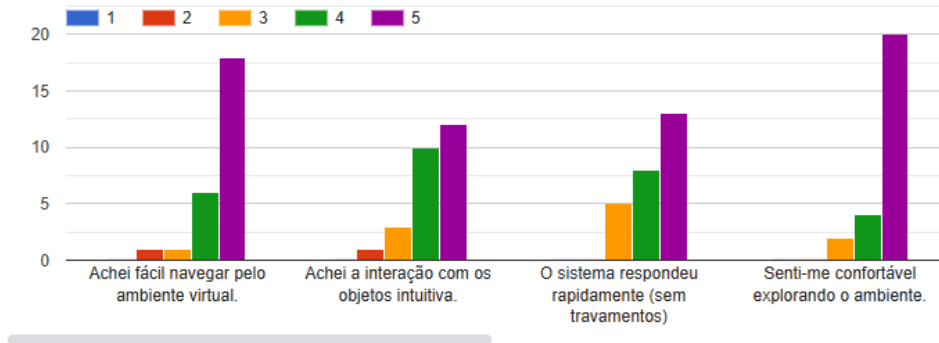
Usuários de computadores (PC/Notebook) relataram facilidade na navegação utilizando teclado (WASD) e mouse. Entretanto, usuários de dispositivos móveis reportaram maiores dificuldades. Conforme observado nos feedbacks qualitativos, a sensibilidade do toque e a velocidade de movimentação foram citadas como barreiras, ocasionando travamentos leves em aparelhos com menor poder de processamento gráfico.

Um ponto de melhoria identificado foi a ausência de um tutorial inicial (*onboarding*). Diversos participantes relataram que precisaram descobrir “por intuição” como se movimentar e interagir com os objetos.

A Figura 17 apresenta a avaliação dos participantes quanto à facilidade de navegação e à intuição da interface, evidenciando diferenças na experiência de uso.

Figura 17 – Avaliação da facilidade de navegação e intuição da interface.

Com base na sua experiência na exposição, responda.
Sendo 1 = *Discordo Totalmente* e 5 = *Concordo Totalmente*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.3 Qualidade Visual e Imersão

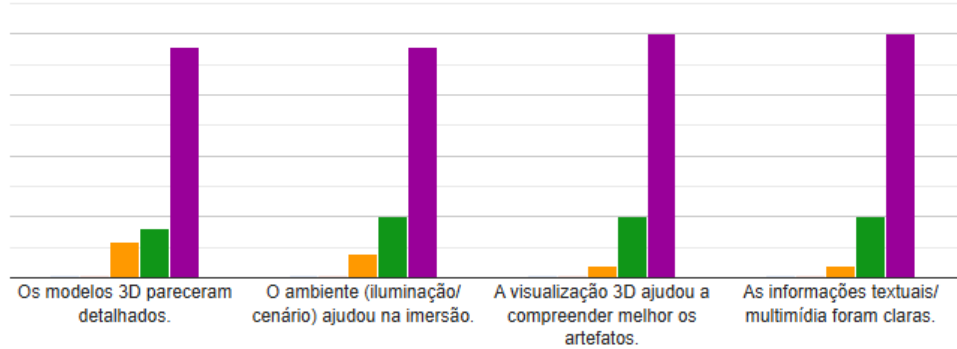
A avaliação da qualidade visual refere-se à percepção dos usuários quanto ao nível de detalhamento e realismo dos modelos apresentados na aplicação, independentemente da autoria dos modelos 3D, obtidos de repositórios públicos.

Este foi o aspecto mais bem avaliado da aplicação. A grande maioria dos participantes atribuiu notas máximas (5) para o detalhamento dos modelos 3D e para a sensação de imersão. Comentários como “Amei os modelos 3D” reforçam que o uso de WebGL pode entregar alta fidelidade visual diretamente no navegador.

Alguns usuários relataram sintomas de desconforto ou tontura ao girar a câmera rapidamente, um fenômeno comum em aplicações de realidade virtual e ambientes 3D, especialmente em telas pequenas de smartphones.

A Figura 18 apresenta a avaliação da qualidade visual e do nível de imersão proporcionado pela aplicação, indicando elevada satisfação dos usuários em relação aos modelos 3D e ao ambiente virtual.

Figura 18 – Avaliação da qualidade dos modelos 3D e imersão do ambiente.
Com base na sua experiência na exposição, responda.
Sendo 1 = *Discordo Totalmente* e 5 = *Concordo Totalmente*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.4 *Percepção de Aprendizado e Conteúdo*

O ECOS também obteve resultados expressivos na base de divulgação científica, mesmo não possuindo foco nesse fator. A quase totalidade dos participantes concordou que a visualização 3D ajudou a compreender melhor a escala e a forma dos artefatos do que imagens estáticas.

A organização das informações (História, Tecnologia, Missões) foi considerada clara. No entanto, houve sugestões para expandir o acervo e detalhar ainda mais as descrições dos itens. O interesse despertado pelo tema foi alto, indicando que a ferramenta cumpre seu papel de engajar o usuário através da tecnologia.

5.2.5 *Discussão dos Resultados*

A análise cruzada entre os dados quantitativos e os comentários abertos permite elencar três conclusões principais sobre o estado atual do projeto:

1. **Indícios de viabilidade do Web 3D:** A avaliação positiva da experiência visual e da imersão sugere que a abordagem baseada em Web 3D, utilizando o framework A-Frame, mostrou-se adequada para a proposta da aplicação, especialmente por sua acessibilidade via navegador, sem necessidade de instalação adicional.
2. **Limitações de desempenho percebidas:** Parte dos participantes relatou dificuldades de desempenho durante o uso da aplicação em dispositivos móveis. Contudo, não foram coletados dados técnicos sobre hardware, navegador ou qualidade da conexão de rede,

impedindo a identificação precisa das causas desses problemas, indicando a necessidade de investigações futuras mais controladas.

3. **Necessidade de Guias de Interface:** A falta de instruções explícitas sobre os controles (interação via clique/toque e movimentação) foi a principal fonte de dúvidas. A implementação de um tutorial interativo na primeira visita é uma melhoria prioritária identificada.

Nos comentários abertos do questionário, alguns participantes descreveram a aplicação como “criativa”, “imersiva” e “rica em detalhes”, reforçando a percepção positiva da experiência.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento do ECOS, uma exposição virtual de artefatos espaciais baseada em tecnologias Web 3D. A motivação principal foi superar as barreiras físicas e geográficas de museus e exposições tradicionais, utilizando a internet como meio de democratização do acesso ao conhecimento científico.

O uso do framework A-Frame mostrou-se eficaz para a construção de ambientes virtuais imersivos que rodam diretamente no navegador. Diferentemente de abordagens anteriores que utilizavam Realidade Aumentada baseada em marcadores físicos e aplicativos instaláveis, a solução Web 3D proposta garantiu maior acessibilidade e facilidade de distribuição.

Os resultados de desenvolvimento demonstraram ser possível criar experiências educativas ricas, combinando modelagem 3D, interatividade e conteúdo multimídia, sem a necessidade de hardware de alto custo. A estrutura modular da aplicação (Hall, Salas e Visualizador) permitiu organizar o conteúdo progressivamente, guiando o usuário desde uma visão geral dos artefatos até níveis mais detalhados de exploração.

O projeto ECOS, portanto, cumpre seu objetivo ao demonstrar o desenvolvimento de uma aplicação Web 3D imersiva, explorando o uso de tecnologias modernas para a criação de ambientes virtuais interativos executáveis diretamente no navegador. O trabalho estabelece uma base técnica sólida para futuras extensões e evoluções da aplicação.

6.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade desta pesquisa, sugerem-se as seguintes melhorias e expansões:

- **Implementação de WebXR (VR):** Expandir a aplicação para oferecer suporte nativo a dispositivos de Realidade Virtual, desde soluções mais simples, como o *Google Cardboard*, até dispositivos dedicados, como o Meta Quest, por meio da API WebXR. Essa integração permitirá uma visualização imersiva dos artefatos em escala real dentro do ambiente virtual.
- **Gamificação:** Incorporar elementos de jogos, como *quizzes* interativos integrados às salas temáticas, com o objetivo de aumentar o engajamento e estimular a participação ativa dos usuários.
- **Áudio-guia Inteligente:** Integrar recursos de narração por voz por meio de técnicas de *Text-to-Speech*, ampliando a acessibilidade do ambiente virtual para usuários com

deficiência visual ou dificuldades de leitura.

- **Expansão do Acervo:** Ampliar o conjunto de artefatos disponíveis, incluindo objetos como o *rover Perseverance* e artefatos nacionais, como o satélite Amazônia 1, mantendo a plataforma alinhada aos avanços da exploração espacial e evidenciando a participação brasileira no setor.

REFERÊNCIAS

- AFrame. **A-Frame Documentation: Html & primitives**. 2025. Disponível em: <https://aframe.io/docs/1.7.0/introduction/html-and-primitives.html>. Acesso em: 14 out. 2025.
- Bely, P. Y. **The Design and Construction of Large Optical Telescopes**. 1. ed. New York, NY: Springer New York, 2003. 508 p. ISBN 978-03-87226-06-4.
- CARDOSO, R. G.; PEREIRA, S. T.; CRUZ, J. H.; ALMEIDA, W. R. Uso da realidade aumentada em auxílio à educação. **Anais do Computer on the Beach**, v. 5, p. 330–339, 2014.
- DANCHILLA, B. Three.js framework. In: **Beginning WebGL for HTML5**. Berkeley, CA: Apress, 2012. p. 173–203. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3997-0_7. Acesso em: 10 out. 2025.
- ELBERT, B. R. **Introduction to satellite communication**. Boston, MA: Artech House, 2008. 447 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=_vqOgUwtWfIC. Acesso em: 19 nov. 2025.
- FILHO, J. B. P. O contexto histórico da corrida espacial. In: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA (ITA), 2005, São José dos Campos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, 2005.
- FRIAÇA, A. C.; PINO, E. D.; PEREIRA, V. J. S.; JR, L. S. **Astronomia: Uma visão geral do universo vol. 28**. São Paulo: Edusp, 2000. 278 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=GF_SsuJIn4sC. Acesso em: 02 jun. 2025.
- GASPARI, F.; IOLI, F.; BARBIERI, F.; RIVIERI, C.; DONDI, M.; PINTO, L. Rediscovering cultural heritage sites by interactive 3d exploration: A practical review of open-source webgl tools. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 29., 2023, Florence, Italy. **Proceedings...** Göttingen: Copernicus Publications, 2023. p. 661–668. Disponível em: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-M-2-2023/661/2023/>. Acesso em: 12 dez. 2025.
- Hearn, D.; Baker, M. P. **Computer graphics with OpenGL**. Pearson Education India, 2004. 842 p. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004cgog.book.....H>. Acesso em: 1 dez. 2025.
- KUHN, T. S. **The Copernican revolution: Planetary astronomy in the development of western thought**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1957. 297 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=sWScX_aduGMC. Acesso em: 27 mai. 2025.
- LEPOURAS, G.; KATIFORI, A.; VASSILAKIS, C.; CHARITOS, D. Real exhibitions in a virtual museum. **Virtual Reality**, n. 2, p. 120–128, Apr 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10055-004-0121-5>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Comparison of Imaging from the Ground and Space**. 2025. Disponível em: <https://science.nasa.gov/asset/hubble/comparison-of-imaging-from-the-ground-and-space/>. Acesso em: 17 mai. 2025.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Image and Video Library**. 2025. Disponível em: <https://images.nasa.gov>. Acesso em: 20 jun. 2025.

NEELAKANTAM, S.; PANT, T. Introduction to A-Frame. In: **Learning Web-based Virtual Reality: Build and Deploy Web-based Virtual Reality Technology**. Berkeley, CA: Apress, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2710-7_4. Acesso em: 13 out. 2025.

PANNEKOEK, A. **A history of astronomy**. Dover Publications, 1989. 521 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=I1LGdDe0NYcC>. Acesso em: 12 mai. 2025.

PARISI, T. **WebGL: up and running**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2012. 211 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=uYnyaBCIb3IC>. Acesso em: 10 dez. 2025.

PETRESCU, R. V. Space probes. **SSRN Electronic Journal**, Elsevier BV, Rochester, NY, 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3417329>. Acesso em: 23 mai. 2026.

PINA, I.; SOUZA, T.; FILHO, F. S.; SERUFFO, M.; CARDOSO, D. Experiência interativa em 3d para exibição de animais extintos no museu emílio goeldi: Uma abordagem educacional e tecnológica baseada em webgl. In: **Anais...** Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2025. p. 220–228. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/webmedia/article/view/37965>. Acesso em: 29 nov. 2025.

RIDPATH, I. **A dictionary of astronomy**. Oxford, UK: Oxford University Press, 2012. 544 p. Disponível em: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199609055.001.0001/acref-9780199609055>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SARAIVA, G. J. de P. Exploração espacial: Primórdios, evolução, estágio atual. **Revista da Escola Superior de Guerra**, v. 21, n. 46, p. 52–79, 2006.

SEQUEIRA, C. S. **Design of a Virtual Museum using Unity and VR**. 118 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de computação) – Universidad de Valladolid, Valladolid, Espanha, 2024. Disponível em: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/71427>. Acesso em: 15 dez. 2025.

SLATER, M. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 364, n. 1535, p. 3549–3557, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>. Acesso em: 1 dez. 2025.

VINHAS, L. V. **DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA: Eventos presenciais e perspectivas dos divulgadores-science outreach: Face-to-face events and communicators perspectives**. Tese (Mestrado em Desenvolvimento Humano) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2021.