



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI/CAMTUC  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

**RUBENS DO CARMO DE SOUZA ALVES**

**AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIA DE RASTREAMENTO OCULAR E  
GAMIFICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS DE  
LEITURA EM CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO  
AUTISTA (TEA)**

**TUCURUI  
2026**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI/CAMTUC  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

**RUBENS DO CARMO DE SOUZA ALVES**

**AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIA DE RASTREAMENTO OCULAR E  
GAMIFICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS DE  
LEITURA EM CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO  
AUTISTA (TEA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elton Sarmanho Siqueira

**TUCURUI  
2026**

do Carmo de Souza Alves, RUBENS

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIA DE RASTREAMENTO OCULAR E GAMIFICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS DE LEITURA EM CRIANÇAS COM DÉFICIT DE LEITURA/ RUBENS DO CARMO DE SOUZA ALVES. – TUCURUI, 2026.

64 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Elton Sarmanho Siqueira

Monografia – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI/CAMTUC  
, 2026.

1. Rastreamento ocular. 2. Engenharia de Software. 3. Diagnóstico Pedagógico. I.  
Título.

**RUBENS DO CARMO DE SOUZA ALVES**

**AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIA DE RASTREAMENTO  
OCULAR E GAMIFICAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO  
DE COMPETÊNCIAS DE LEITURA EM CRIANÇAS COM  
TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA (TEA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
da Computação.

Trabalho aprovado em: \_\_\_\_/ \_\_\_\_/ 2026

Conceito: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Elton Sarmanho Siqueira**  
Faculdade de Sistema de Informação – UFPA  
(Orientador)

---

**Prof. Dr. Bruno Merlin**  
Faculdade de Engenharia da Computação – UFPA  
(Coorientador)

---

**Prof. Dr. Otávio Noura**  
Faculdade de Engenharia da Computação – UFPA  
(Membro da Banca)

---

**Profa. Dra. Ivete Furtado Ribeiro Caldas**  
Faculdade de Biomedicina – UEPA  
(Membro da Banca)

TUCURUÍ  
2026

*Este trabalho é dedicado às crianças autista que mesmo em silêncio são grandes guerreiras e que sonham em ser valorizada e ouvidas.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tenho alcançado até o momento e também aos meus queridos pais, Maria da Conceição Souza Alves e Domingos do Espirito Santos Alves, que não mediram esforços para que eu pudesse continuar meus estudos e sempre incentivaram a seguir o caminho da educação, mesmo sabendo que nada é fácil morando em outra cidade que até o momento era desconhecida e que tudo que eu precisava eles me proporcionaram com muita luta e esforço para eu chegar até aqui.

Aos meus irmãos, que sempre ajudaram nos momentos mais difíceis aonde estava com muitas dificuldades inclusive financeiras, pois pensava em desistir e voltar para minha cidade e continuar trabalhando para assim seguir minha vida, mesmo que para isso perder a oportunidade que Deus tinha oferecido.

Ao meu amigo Rosivalber, pelo acolhimento em sua residência, foi ele que abriu as portas logo quando cheguei em Tucuruí, foi um amigo parceiro e um irmão para mim, juntamente com sua esposa Fernanda que sempre me apoiaram para que nunca desistisse dos meus sonhos.

A todos meus familiares em especial ao meu Tio Osvaldo que me ofereceu sua humilde residência para que assim continuasse meus estudos, agradeço de coração, ele que foi um segundo pai para mim e por isso sou grato por tudo, agradeço aos meus primos Val, Osmivaldo em especial Olgarina pelas conversas e apoio que forma essencial para a minha formação.

Ao meu ilustríssimo orientador Prof. Elton Sarmiento, que me indicou os caminhos das pedras com muita sabedoria, dedicação, paciência e esforço, sempre me ajudou nas minhas dúvidas e em meus conhecimentos.

Ao meu colegas de turma em especial ao meu caro amigo Adrian Caldas Pó que sempre estive mais próximo, no geral que turma incrível, só tenho a agradecer a todos pela parceria e companheirismo.

Agradeço a todos a todos meus amigos que sempre me apoiaram e motivaram.

Agradeço a todo o corpo docente da Faculdade de Engenharia de Computação da UFPA em especial ao Prof. Daniel Pinheiro, Prof. Dr. Otávio Noura Teixeira que sempre me incentivou a nunca desistir dos nossos sonhos e sempre me falava "Quero ver você formado engenheiro Rubens, bora formar", por proporcionado minha formação.

Agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de tive de cursar uma Universidade Federal, seja feito a tua vontade. Amém!

*"A engenharia de software não se limita apenas aos processos técnicos de desenvolvimento de software, mas também engloba atividades como o gerenciamento de projetos de software e o desenvolvimento de ferramentas, métodos e teorias para suportar a produção de software."*

(Ian SOMMERVILLE)

## RESUMO

O cenário da alfabetização no Brasil, particularmente na região amazônica, enfrenta desafios estruturais que demandam ferramentas de diagnóstico mais precisas e objetivas para identificar dificuldades de leitura nos anos iniciais. Este trabalho apresenta a avaliação de uma solução tecnológica integrada, baseada em rastreamento ocular (*eye tracking*) de baixo custo e estratégias de gamificação, como ferramenta de apoio ao diagnóstico pedagógico. O objetivo geral consistiu em validar se os padrões de movimento ocular coletados durante tarefas gamificadas podem diferenciar níveis de proficiência leitora. A metodologia caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza quantitativa-descritiva, envolvendo um grupo amostral de 26 crianças de diferentes escolas públicas no município de Cametá, Pará. Desenvolveu-se um artefato de *software* em linguagem *Python* com um *pipeline* de dados (ETL), do inglês (*Extract, Transform, Load*), significa a extração, transformação e carregamento dos dados, para ingestão, limpeza e visualização de coordenadas oculares através de séries temporais e mapas de calor (*heatmaps*). Os resultados demonstraram uma distinção clara entre perfis de leitura: participantes proficientes apresentaram um padrão escalar estável e sacadas progressivas, enquanto leitores iniciantes exibiram trajetórias erráticas, regressões frequentes e tempos de fixação significativamente superiores. A análise espacial confirmou a eficácia do design da interface em direcionar a atenção visual para as áreas de interesse pedagógico, com a formação consistente de *hotspots* sobre as palavras-alvo. Conclui-se que a integração do rastreamento ocular com a gamificação constitui uma métrica biométrica viável e de baixo custo, capaz de fornecer evidências quantitativas que complementam a avaliação subjetiva docente, auxiliando na triagem precoce de dificuldades de aprendizagem no contexto escolar.

**Palavras-chave:** Rastreamento Ocular. Engenharia de Software. Diagnóstico Pedagógico.

## ABSTRACT

The literacy landscape in Brazil, particularly in the Amazon region, faces structural challenges that demand more precise and objective diagnostic tools to identify reading difficulties in the early years. This work presents the evaluation of an integrated technological solution based on low-cost eye tracking and gamification strategies as a support tool for pedagogical diagnosis. The general objective was to validate whether eye movement patterns collected during gamified tasks can differentiate reading proficiency levels. The methodology is characterized as applied research of a quantitative-descriptive nature, involving a sample group of 26 children from a public school in the municipality of Cametá, Pará. A software artifact was developed in Python with a data pipeline (ETL) for the ingestion, cleaning, and visualization of eye coordinates through time series and heatmaps. The results demonstrated a clear distinction between reading profiles: proficient participants showed a stable scalar pattern and progressive saccades, while beginner readers exhibited erratic trajectories, frequent regressions, and significantly higher fixation times. Spatial analysis confirmed the effectiveness of the interface design in directing visual attention to areas of pedagogical interest, with the consistent formation of hotspots over target words. It is concluded that the integration of eye tracking with gamification constitutes a viable and low-cost biometric metric, capable of providing quantitative evidence that complements subjective teacher assessment, aiding in the early screening of learning difficulties within the school context.

**Keywords:** Eye Tracking. Software Engineering. Pedagogical Diagnosis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Identidade Visual e Logotipo do Artefato - Leimo .....	31
Figura 2 – Diagrama de Casos de Uso do Sistema Leimo .....	32
Figura 3 – Série Temporal das Coordenadas Oculares e Eventos de Sacada .....	33
Figura 4 – Dinâmica das coordenadas oculares ( $X$ e $Y$ ) e ocorrência de sacadas durante a execução de tarefas visuais sequenciais dos participantes $C1$ a $C26$ . A linha azul representa o movimento horizontal e a laranja o vertical.....	46
Figura 5 – Gráfico de linha das Crianças $C20$ e $C21$ .....	47
Figura 6 – Tarefas 1 e 11 realizadas pelas Crianças.....	48
Figura 7 – Gráfico de linha da Criança $C14$ . .....	49
Figura 8 – Gráfico de Dispersão.....	50
Figura 9 – Diagrama de Atividades.....	63

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Princípios do Manifesto Ágil aplicados ao Projeto.....	30
Tabela 2 – Tabela Atividades do projeto Leimo .....	31
Tabela 3 – Classificação detalhada dos participantes quanto à qualidade do sinal e características visuais observadas .....	44

## LISTA DE ALGORITMOS

<b>4.1</b>	<b>Biblioteca em Python .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Geração de Mapa de Dispersão Espacial com Matplotlib .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>Estrutura de Repetição, Lógica de Iteração e Plotagem .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4</b>	<b>Gráfico de Dispersao (Heatmap) em Python .....</b>	<b>39</b>
<b>A.1</b>	<b>Codigo Python .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IA	Inteligência Artificial
TEAH	Transtorno de Espectro Autista e Hiperatividade
CSV	Valores separados em virgula
JSON	JavaScript Object Notation
DL	DEEP LEARNING
ETL	Extract, Transform, Load
AOI	Area of Interest
PCCR	Pupil Center Corneal Reflection
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TALE	Termo de Assentimento Livre e Esclarecido
UML	Unified Modeling Language
SQL	Structured Query Language
NoSQL	Not Only Structured Query Language
API	Application Programming Interface
RESTFull	Representational State Transfer
LEIMO	Leitura e Movimento ocular

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Alfa
$\omega$	Letra Ômega
$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\in$	Pertence
$\Pi$	Pi

# SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	<b>Objetivos</b> .....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICAS</b> .....	18
2.1	<b>Processos Cognitivos da leitura e Alfabetização</b> .....	18
2.2	<b>Tecnologia de Rastreamento Ocular (<i>Eye Tracking</i>)</b> .....	20
2.3	<b>Gamificação e Engenharia de Software Educativo</b> .....	22
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	25
3.1	<b>Caracterização da Pesquisa e Participantes</b> .....	25
3.2	<b>Materiais e ferramentas</b> .....	26
3.3	<b>Procedimento Experimental</b> .....	27
4	<b>DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO</b> .....	30
4.1	<b>Arquitetura de Sistemas e Interconexão de Plataformas</b> .....	30
4.1.1	Camada de Interação ( <i>Front-End</i> ): O Artefato <i>Leimo</i> .....	33
4.1.2	Camada de Persistência e Sincronização ( <i>Back-End</i> ) .....	33
4.2	<b>Configuração do Ambiente e Bibliotecas</b> .....	34
4.3	<b>Ingestão e Tratamento de Dados</b> .....	35
4.4	<b>Lógica Temporal e sincronização de Eventos</b> .....	37
4.5	<b>Análise espacial e persistência dos resultados</b> .....	39
4.6	<b>Considerações finais sobre a Implementação</b> .....	41
5	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
5.1	<b>Análise da qualidade do sinal e Pré-Processamento</b> .....	43
5.2	<b>Dinâmica temporal e identificação de Padrões de Leitura</b> .....	46
5.3	<b>Análise de Dispersão Espacial e Mapas de Calor</b> .....	50
5.4	<b>Integração dos Dados e Discussão Geral</b> .....	51
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	54
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMO DE PROCESSAMENTO E VISUALI- ZAÇÃO DE DADOS OCULOMÉTRICOS</b> .....	60
	<b>APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ATIVIDADES E FLUXO DE DADOS</b>	63
	<b>APÊNDICE C – LINK PARA OS DADOS GERADOS NO PROJETO</b>	64

# 1 INTRODUÇÃO

O cenário da alfabetização no Brasil, especificamente no contexto Amazônico, enfrenta desafios estruturais que comprometem o desenvolvimento educacional pleno das crianças nos anos iniciais. A aquisição da leitura é a base para o aprendizado subsequente, e falhas nessa etapa geram lacunas de conhecimento que tendem a se ampliar ao longo da vida escolar, exigindo um olhar atento às especificidades regionais. Nesse sentido, (SOUSA *et al.*, 2024) em estudo publicado nos *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, destacam que no contexto amazônico os fatores socioeconômicos e a infraestrutura escolar precária se entrelaçam. Essa realidade demanda abordagens diagnósticas precisas e de baixo custo para identificar gargalos no letramento inicial antes que se tornem irreversíveis.

A leitura não é um ato natural, mas um processo cognitivo complexo que exige o recrutamento simultâneo de diversas áreas cerebrais para decodificação, fluência e compreensão. Durante esta atividade, é imperativo compreender que estímulos diferentes ativam áreas cerebrais distintas, resultando numa arquitetura cognitiva única para cada indivíduo. Pessoas diferentes processam a decodificação visual de modos variados, exigindo que o cérebro coordene o reconhecimento de grafemas com os seus correspondentes fonológicos sob uma carga atencional altamente personalizada e dependente de maturação biológica específica (SILVA *et al.*, 2025).

Apesar da importância do diagnóstico precoce, a avaliação tradicional das competências de leitura em ambiente escolar ainda depende excessivamente da observação subjetiva do educador. Testes convencionais de leitura em voz alta muitas vezes falham em capturar as nuances do processamento visual subjacente, como o movimento dos olhos sobre as palavras, impedindo a quantificação precisa da dificuldade. (BALAM; OSÓRIO, 2018) alertam que métodos exclusivamente comportamentais podem não detectar sutilezas no processamento da informação, validando a necessidade de suporte tecnológico para complementar a percepção docente e reduzir vieses.

Nesse contexto, a tecnologia de Rastreamento Ocular (*Eye Tracking*) emerge como uma solução promissora para fornecer métricas objetivas e quantificáveis sobre o comportamento leitor. Ao registrar milimetricamente o movimento dos olhos, essa tecnologia permite decompor a leitura em eventos fisiológicos mensuráveis, como fixações (foco) e sacadas (movimento), revelando o esforço cognitivo real do aluno. (BAZAN; CORRÊA, 2022), em relatório técnico sobre habilidades linguísticas, corrobora essa visão ao afirmar que o mapeamento do olhar revela padrões de hesitação e regressão que são cruciais para um diagnóstico diferencial e assertivo.

Contudo, a aplicação de testes diagnósticos em crianças impõe o desafio adicional de manter o engajamento e a atenção durante a coleta de dados, visto que tarefas repetitivas tendem a gerar fadiga e dados inconclusivos. A Gamificação apresenta-se como uma estratégia eficaz para mitigar esse problema, transformando a avaliação em uma experiência interativa que sustenta

o interesse do aluno por períodos mais longos. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021), autores do jogo "ProgramSE", demonstraram que ambientes gamificados aumentam significativamente a adesão e o foco dos estudantes em tarefas cognitivas complexas, criando um cenário ideal para a coleta de métricas de desempenho.

Diante da necessidade de modernizar as ferramentas de avaliação educacional e superar as limitações dos métodos subjetivos, este trabalho propõe uma abordagem tecnológica integrada. A investigação busca compreender se métricas fisiológicas, capturadas em um ambiente controlado e lúdico, podem servir como indicadores confiáveis do nível de proficiência leitora. Define-se, assim, a seguinte pergunta de pesquisa: Como a integração de tecnologia de rastreamento ocular de baixo custo e estratégias de gamificação pode auxiliar na avaliação objetiva e no diagnóstico de competências de leitura em crianças em fase de alfabetização no contexto amazônico?

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto da utilização de interfaces digitais livres de distratores, fundamentadas em diretrizes da neurociência cognitiva, no processamento de informações e na aprendizagem de crianças com Transtorno do Espectro Autista (TEA).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Mapear as principais barreiras cognitivas e atencionais enfrentadas por crianças com TEA durante o uso de softwares educacionais tradicionais.
2. Desenvolver ou selecionar telas de aprendizagem que apliquem princípios da neurociência cognitiva para a mitigação de distratores visuais e sonoros.
3. Avaliar os resultados e a usabilidade dessas telas adaptadas, observando a variação no engajamento e no foco atencional do público-alvo.
4. Propor diretrizes pedagógicas e de design instrucional, baseadas nos dados coletados, para orientar a criação de futuras tecnologias assistivas voltadas à neurodiversidade no contexto amazônico.

No cenário amazônico, o mapeamento e o suporte ao Transtorno do Espectro Autista (TEA) exigem urgentes estratégias regionalizadas. Evidências apontam que ampliar centros de atendimento no interior do Pará é a medida central para viabilizar intervenções precoces e diagnósticos seguros (SOUSA *et al.*, 2024).

No município de Tucuruí, a consolidação do Núcleo de Atenção ao Transtorno do Espectro do Autismo (Natea) indica uma tentativa robusta de suprir a demanda regional. Esse espaço governamental oferece suporte contínuo, focado diretamente no desenvolvimento da aprendizagem

escolar e no indispensável acolhimento neuropsicológico dos pacientes da rede pública (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019).

Em paralelo, Cametá adota abordagens voltadas à assistência intersetorial através da Estratégia de Acompanhamento Social da Pessoa com Autismo (EASPA), desenhada para estreitar vínculos com serviços locais e apoiar a educação (SOUSA *et al.*, 2025).

A convergência de todos esses dados documentais indica uma correlação direta entre o fortalecimento estratégico das políticas de nível municipal e a estruturação de uma sólida rede de apoio. Essa rede atua focada nas particularidades do neurodesenvolvimento na região do Baixo Tocantins (SILVA *et al.*, 2025).

A relevância da presente pesquisa sustenta-se fortemente na necessidade de mitigar as lacunas metodológicas presentes no design de ferramentas educacionais. Torna-se indispensável estruturar abordagens inclusivas que respeitem o funcionamento cognitivo atípico e promovam um aprendizado eficaz (SILVA *et al.*, 2025).

Evidências recentes sugerem que o excesso de estímulos sensoriais, comum em softwares tradicionais, atua como barreira cognitiva severa para sujeitos com TEA. Essa poluição visual acaba sobrecarregando consideravelmente as funções executivas, o que dificulta a retenção de dados e o engajamento contínuo nas atividades propostas pelo professor (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021).

Diante desse cenário adverso, a integração da neurociência cognitiva no desenvolvimento de telas sem distratores apresenta-se como caminho viável. Essa estratégia atua para otimizar o foco direcionado e reduzir a ansiedade infantil (BALAM; OSÓRIO, 2018).

Portanto, o presente estudo justifica-se de forma substancial pela urgência em fornecer bases empíricas sólidas. O intuito principal é orientar a criação de tecnologias assistivas que sejam rigorosamente responsivas ao perfil de processamento neural desse público no ambiente escolar diário (BAZAN; CORRÊA, 2022).

Sob a ótica tecnológica, este trabalho justifica-se pela aplicação prática de conhecimentos de Engenharia da Computação para a resolução de problemas reais de confiabilidade e usabilidade. Conforme (SOMMERVILLE, 2011) define, a engenharia de software deve preocupar-se com a construção de sistemas que sejam úteis, confiáveis e que atendam a requisitos complexos de interação. A implementação de algoritmos de tratamento de sinal e design de interação em *Python* demonstra a versatilidade do engenheiro em atuar na interface entre tecnologia e humanidades, garantindo a soberania tecnológica através de soluções próprias.

Academicamente, a contribuição deste estudo é o fornecimento de dados quantitativos inéditos sobre os padrões de rastreamento ocular de crianças na região Amazônica. Há uma carência significativa de estudos que combinem gamificação e *eye tracking* em contextos demográficos específicos do Sul Global, limitando a generalização de teorias desenvolvidas em outros contextos. Ao documentar e analisar o comportamento visual de 26 participantes locais, a monografia enriquece o corpo de conhecimento sobre o desenvolvimento leitor, oferecendo evidências empíricas originais conforme as lacunas identificadas (SOUSA *et al.*, 2024).

A relevância deste trabalho também se destaca pelo seu caráter multidisciplinar, promovendo um diálogo necessário entre as ciências exatas e as ciências pedagógicas. A Engenharia da Computação, ao se debruçar sobre problemas de aprendizagem, expande seu escopo de

atuação e demonstra como a tecnologia pode servir como mediadora de processos humanos. (Piaz; Fagundes; Calbusch, 2019), ao relatarem experiências com desenvolvimento de jogos na educação, reforçam que essa integração de saberes fortalece ambas as áreas e abre novos caminhos para a tecnologia educacional (*EdTech*).

Estruturalmente, este trabalho está organizado de forma a guiar o leitor desde os conceitos fundamentais até a análise técnica dos dados. O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica sobre leitura, rastreamento ocular e gamificação; o Capítulo 3 detalha a Metodologia e o protocolo experimental. O Capítulo 4 descreve o Desenvolvimento e a Implementação do código de processamento; o Capítulo 5 dedica-se à Análise dos Resultados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros, consolidando o entendimento sobre a viabilidade da ferramenta proposta.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICAS

### 2.1 Processos Cognitivos da leitura e Alfabetização

A leitura é uma habilidade cognitiva superior que não se desenvolve espontaneamente, exigindo instrução formal e maturação neurológica específica para ser consolidada. Diferente da linguagem oral, que possui raízes biológicas profundas, a leitura demanda que o cérebro recicle áreas visuais para processar formas arbitrárias como letras e associá-las a sons, um processo que impõe alta carga cognitiva inicial. Segundo (SILVA *et al.*, 2025), em sua revisão integrativa recente, esse processo envolve a orquestração complexa entre os sistemas visual, auditivo e atencional, sendo a primeira infância o período crítico para o estabelecimento dessas conexões neurais fundamentais.

No contexto da alfabetização, a competência leitora é construída sobre o alicerce da consciência fonológica e da decodificação eficiente de grafemas. Quando uma criança inicia o aprendizado, ela precisa converter símbolos visuais em fonemas, tarefa que consome quase toda a sua memória de trabalho, deixando poucos recursos para a compreensão semântica. (SILVA *et al.*, 2025) explicam que, antes de atingir a fluência, o leitor iniciante opera na rota fonológica, caracterizada por uma leitura lenta e serial, dependendo excessivamente da fixação visual prolongada em cada sílaba para processar a informação.

A atenção visual desempenha um papel regulador determinante nesse processo de aprendizagem, atuando como um filtro que seleciona a informação relevante a ser processada e ignora distratores. Se o controle oculomotor não estiver bem desenvolvido, a criança pode perder a linha de leitura ou pular palavras, comprometendo a formação de sentido e gerando frustração. (BALAM; OSÓRIO, 2018) argumentam que o rastreamento do olhar permite inferir diretamente a alocação de atenção, pois existe uma correlação estreita entre o foco foveal e o processamento cognitivo imediato.

O desenvolvimento destas competências não ocorre de forma isolada do ambiente. É fortemente influenciado pelo contexto socioeconômico em que a criança está inserida. Na Amazônia, a infraestrutura escolar precária exacerba dificuldades cognitivas e cria barreiras adicionais ao letramento (SOUSA *et al.*, 2024).

Evidências empíricas indicam que as variáveis ambientais impactam diretamente a velocidade de aquisição da leitura nas regiões periféricas. Torna-se indispensável aplicar um diagnóstico precoce. Este procedimento é o único capaz de diferenciar o mero atraso escolar decorrente de falhas pedagógicas de reais transtornos neurobiológicos do desenvolvimento (SILVA *et al.*, 2025).

A dificuldade na leitura, quando não tratada a tempo, gera o fenômeno referenciado na literatura como "Efeito Mateus" (STANOVICH, 1986). Neste cenário amplamente estudado, as crianças proficientes progridem rapidamente, enquanto aquelas com dificuldades atencionais estagnam e evitam a prática.

Essa lacuna progressiva compromete o desempenho em todas as disciplinas, visto que a leitura é a ferramenta transversal de acesso ao conhecimento. Intervenções tardias perdem eficácia, exigindo o mapeamento de desvios visuais logo nos anos iniciais da alfabetização (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021)..

Um dos maiores desafios para a avaliação precisa dessas competências é a subjetividade inerente aos métodos tradicionais de testagem em sala de aula, que dependem da percepção humana. Professores avaliam a leitura pela prosódia e respostas a perguntas, mas não têm acesso ao processamento em tempo real que ocorre milissegundos antes da fala. (BAZAN; CORRÊA, 2022) destaca que métodos observacionais falham em detectar microcomportamentos, como regressões oculares sutis ou tempos de fixação anormais, que são os primeiros biomarcadores de esforço cognitivo desproporcional.

A teoria da carga cognitiva fornece a base para entender como a apresentação do material afeta a leitura. O cérebro humano possui canais limitados para processar informações visuais e verbais, e o excesso de estímulos pode sobrecarregar a memória de trabalho, prejudicando a aprendizagem. (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021), em análise sobre gamificação e leitura, reforçam que o design da ferramenta deve minimizar o processamento estranho e focar a atenção visual nos elementos essenciais, otimizando a interação do aluno com o texto.

A relação entre movimentos oculares e leitura é tão intrínseca que anomalias no padrão de varredura visual são frequentemente encontradas em transtornos específicos de aprendizagem. Enquanto leitores típicos apresentam um padrão de escada com movimento progressivo, leitores com dificuldades exibem padrões erráticos e desorganizados. A literatura aponta que a identificação desses perfis visuais pode servir como triagem inicial em larga escala. (BALAM; OSÓRIO, 2018) ressaltam que, embora o rastreamento ocular não substitua o diagnóstico clínico completo, ele fornece evidências quantitativas robustas para fundamentar encaminhamentos.

O conceito de zona de interesse, ou *AOI (Area of Interest)*, é crucial para entender como a informação visual é priorizada durante a leitura de textos multimodais. Em tarefas que combinam texto e imagem, a criança precisa alternar a atenção estrategicamente para integrar as duas fontes de informação e construir sentido global. Estudos metodológicos revisados por (STROHMAIER et al., 2020) demonstram que a análise das AOIs revela onde o aluno busca ou falha em buscar as informações necessárias para resolver problemas cognitivos, permitindo inferir suas estratégias de leitura.

A maturação do sistema oculomotor continua até o final da infância, exigindo cautela na comparação de métricas entre faixas etárias distintas. O controle inibitório, necessário para suprimir sacadas reflexas em direção a distratores, desenvolve-se gradualmente ao longo do ensino fundamental. (SOUSA et al., 2024) pontuam a necessidade de estabelecer parâmetros de normalidade regionais, evitando que comportamentos típicos da imaturidade neurológica sejam patologizados equivocadamente como *déficits* de atenção.

A ansiedade durante situações formais de teste é um fator de confusão que pode mascarar

a real competência da criança, gerando falsos negativos. O ambiente de avaliação tradicional, muitas vezes percebido como julgador, pode desencadear estresse que desorganiza o planejamento motor e cognitivo, prejudicando a performance. A abordagem lúdica surge como uma solução para restaurar a validade ecológica da avaliação. (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) observam que a inserção de elementos de jogos altera a percepção da tarefa, reduzindo a ansiedade e permitindo que a criança demonstre seu potencial real.

Conclui-se que a leitura é um processo multifacetado que une biologia, cognição e contexto, exigindo métodos de avaliação que respeitem essa complexidade. A simples verificação de acerto ou erro é insuficiente para mapear as dificuldades de processamento subjacentes. A integração de conhecimentos da neurociência cognitiva com a engenharia computacional visa preencher essa lacuna metodológica, oferecendo dados granulares sobre como a criança constrói a leitura momento a momento.

## 2.2 Tecnologia de Rastreamento Ocular (*Eye Tracking*)

O Rastreamento Ocular, ou *Eye Tracking*, é uma técnica computacional que permite medir com precisão o ponto de olhar de um indivíduo e a dinâmica de seus movimentos oculares. A tecnologia baseia-se na emissão de luz infravermelha e na captura do reflexo dessa luz na córnea e na pupila (PCCR), calculando vetores geométricos para determinar a posição do olhar na tela. Segundo (BAZAN; CORRÊA, 2022), esse método não invasivo fornece uma janela direta para os processos atencionais. Aprofundando a análise técnica, (STROHMAIER *et al.*, 2020) detalham, em revisão sistemática, que o registro de fixações e sacadas revela processos cognitivos subjacentes invisíveis a olho nu. Adicionalmente, (SILVA; MACEDO; AZEVEDO, 2023) no periódico Einstein, indicam que os mapas de calor (*heatmaps*) são ferramentas essenciais para validar se o design instrucional está direcionando a atenção da criança para os elementos pedagógicos corretos.

Matematicamente, a detecção da fixação pode ser modelada através do cálculo do centroide de uma nuvem de pontos em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Seja  $P_i = (x_i, y_i)$  a coordenada do olhar no instante  $t_i$ . Uma fixação é identificada quando a dispersão espacial é inferior a um  $\theta$  durante um tempo mínimo, conforme a equação (2.1):

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2) < \theta \quad (2.1)$$

Onde  $(\bar{x}, \bar{y})$  representa a média das coordenadas no intervalo. Já as sacadas são definidas pela velocidade angular do movimento. A velocidade instantânea  $v(t)$  entre duas amostras consecutivas é calculada pela distância euclidiana dividida pelo intervalo de amostragem, conforme a Equação (2.2):

$$v(t) = \frac{\sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Se  $v(t)$  exceder o limite de velocidade (tipicamente  $30^\circ/s$ ), o evento é classificado como uma sacada. Esses modelos matemáticos fundamentam os algoritmos de classificação utilizados no pós-processamento dos dados. Os dados brutos gerados por um rastreador consistem em uma série temporal de coordenadas espaciais  $X$  e  $Y$  amostradas em alta frequência. Para transformar esses dados em percepções cognitivas, é necessário classificar os eventos oculares em fixações e sacadas. A fixação é o momento de estabilidade onde ocorre a extração de informação visual, durando entre 200 a 300ms na leitura. Conforme explicado por (BALAM; OSÓRIO, 2018), é durante a fixação que o cérebro processa a palavra, sendo sua duração um indicador direto da dificuldade de processamento lexical.

As sacadas são movimentos balísticos rápidos que reposicionam a fóvea para um novo ponto de interesse, durante os quais a visão é suprimida. A análise da amplitude e direção das sacadas é fundamental para entender a fluência e a estratégia de leitura. (BAZAN; CORRÊA, 2022) detalha que, na leitura ocidental, espera-se uma predominância de sacadas progressivas curtas, intercaladas por grandes sacadas de retorno de linha, e desvios nesse padrão indicam problemas de coordenação ou compreensão.

As regressões, movimentos sacádicos para trás no texto, ocorrem quando o leitor precisa reler para corrigir uma falha de compreensão ou verificação. Embora regressões ocasionais sejam normais, uma alta taxa desses movimentos sugere dificuldades significativas de decodificação ou integração semântica. A literatura revisada por (SILVA *et al.*, 2025) aponta que a frequência de regressões é uma das métricas mais sensíveis para diferenciar leitores proficientes de leitores com dislexia, que tendem a fazer múltiplas verificações visuais.

A visualização de dados via mapas de calor, ou *heatmaps*, permite uma análise qualitativa rápida da distribuição da atenção visual. Áreas quentes indicam regiões com alta densidade de fixações, revelando quais partes do estímulo capturaram o interesse ou exigiram maior esforço cognitivo. (BALAM; OSÓRIO, 2018) indicam que *heatmaps* são ferramentas essenciais para validar se o design instrucional está direcionando a atenção da criança para os elementos pedagógicos corretos, evitando dispersão.

O *scanpath*, ou caminho de varredura, traça a ordem sequencial das fixações, revelando a estratégia temporal de exploração visual adotada pelo sujeito. A linearidade e a organização do *scanpath* são indicadores de maturidade leitora, sendo que leitores novatos costumam apresentar caminhos mais caóticos. (STROHMAIER *et al.*, 2020) destacam o uso dessa métrica para identificar estratégias de resolução de problemas, onde *scanpaths* desordenados correlacionam-se com baixos níveis de compreensão e desempenho acadêmico.

A calibração é uma etapa crítica que garante o mapeamento correto da geometria do olho para as coordenadas da tela, sendo pré-requisito para a confiabilidade dos dados. O procedimento

padrão envolve olhar para pontos específicos, mas com crianças isso pode ser desafiador devido à movimentação constante. (BAZAN; CORRÊA, 2022) alerta que protocolos de calibração adaptados e lúdicos são necessários para manter a precisão sem cansar o participante infantil, evitando o erro sistemático nos dados coletados.

A qualidade do sinal pode ser degradada por fatores como iluminação, uso de óculos ou movimentação da cabeça, resultando em perda de dados conhecida como *track loss*. No tratamento de dados, a aplicação de filtros para remoção de ruídos e interpolação de piscadas é essencial para garantir a integridade da análise. A validade científica dos resultados depende diretamente da robustez desse pré-processamento, conforme discutido nos manuais técnicos referenciados (BAZAN; CORRÊA, 2022).

Historicamente, o alto custo dos equipamentos limitou o uso do *eye tracking* a laboratórios de elite, mas o surgimento de dispositivos de baixo custo democratizou o acesso à tecnologia. Rastreadores voltados para jogos e acessibilidade têm se mostrado viáveis para aplicações educacionais que não exigem precisão clínica extrema. (SILVA *et al.*, 2025) sugerem que a validação dessas ferramentas acessíveis é um passo fundamental para levar a neurociência aplicada para dentro das escolas públicas brasileiras.

O processamento de grandes volumes de dados oculométricos exige o uso de bibliotecas de computação científica robustas, como Pandas e *Matplotlib* em *Python*. A engenharia de *software* aqui transcende a codificação simples, envolvendo a criação de *pipelines* reprodutíveis que transformam coordenadas brutas em métricas estatísticas. (SOMMERVILLE, 2011) lembra que a confiabilidade do software é crítica em sistemas sociotécnicos, onde falhas na análise de dados podem levar a conclusões errôneas sobre o desempenho humano.

A interpretação dos dados de rastreamento ocular deve ser sempre contextualizada com outras métricas de desempenho e observações pedagógicas. Um tempo de fixação longo pode significar tanto engajamento profundo quanto dificuldade extrema, pois o contexto da tarefa define o significado. A triangulação de dados biométricos com resultados de testes padronizados é essencial para uma avaliação holística, precaução reforçada por (BAZAN; CORRÊA, 2022) e pela literatura contemporânea.

## 2.3 Gamificação e Engenharia de Software Educativo

A Gamificação apresenta-se como uma estratégia eficaz para mitigar a fadiga em ambientes de aprendizagem. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021), no desenvolvimento do jogo "*ProgramSE*", demonstraram que ambientes gamificados aumentam a adesão e o foco em tarefas complexas. Complementarmente, (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) relatam que o desenvolvimento de jogos educativos fortalece competências e que a narrativa lúdica é essencial para manter a atenção da criança durante a avaliação, transformando o teste em uma experiência positiva.

O uso de jogos no diagnóstico de dificuldades de leitura aborda o problema da validade ecológica, criando um ambiente de teste menos ansiogênico e mais próximo da realidade digital da criança. Ao envolver a tarefa de leitura em uma narrativa lúdica, reduz-se a pressão de desempenho e aumenta-se a motivação intrínseca. (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) observaram que a imersão proporcionada pelos jogos resulta em maior tempo de atenção sustentada, permitindo a coleta de dados mais fidedignos sobre a capacidade cognitiva real do aluno.

O design de interfaces para crianças exige diretrizes específicas de usabilidade, priorizando clareza, *feedback* imediato e baixa sobrecarga visual. Elementos decorativos excessivos podem atuar como distratores, competindo com o conteúdo pedagógico pela atenção visual limitada da criança. Segundo (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021), a simplicidade visual foi determinante no design de jogos de lógica para garantir que o foco dos alunos permanecesse nos conceitos centrais, princípio aplicável também a testes de leitura.

A Engenharia de *Software* Educativo demanda um ciclo de vida de desenvolvimento iterativo e centrado no usuário, focado na confiabilidade e adequação pedagógica. O *software* não deve apenas funcionar tecnicamente, mas atender aos requisitos de aprendizagem e avaliação definidos pelos especialistas. (SOMMERVILLE, 2011) define que a validação de *software* envolve confirmar se o produto atende às necessidades reais do usuário, ou seja, se o jogo avalia a leitura sem introduzir viés ou confusão na *interface*.

A implementação técnica de jogos para pesquisa científica exige rigor no registro de dados ou *logging*, capturando cada interação com precisão temporal. O sistema deve sincronizar eventos do jogo, como a aparição de estímulos ou cliques, com o fluxo de dados do rastreador ocular, garantindo a integridade temporal da análise. A robustez desse *backend* de dados é o que diferencia um jogo educativo comum de um instrumento de medição científica, conforme os princípios de engenharia de sistemas confiáveis de (SOMMERVILLE, 2011).

O *feedback* imediato e o sistema de recompensas são mecânicas centrais para manter o estado de fluxo da criança durante a avaliação. O equilíbrio entre o desafio apresentado e a habilidade do aluno evita tanto o tédio quanto a frustração excessiva. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) apontam que o *feedback* positivo constante mantém a moral elevada, encorajando a criança a persistir nas tarefas de leitura mesmo diante de dificuldades, o que é essencial para completar o protocolo experimental.

A construção de narrativas e personagens cria um vínculo emocional que facilita a imersão e dá propósito às tarefas repetitivas. Contextualizar a leitura como uma missão para ajudar um personagem torna a atividade significativa para a criança. (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) relatam que a narrativa atua como um elemento coeso que une diferentes atividades cognitivas, aumentando o engajamento e a disposição do aluno para interagir com o *software* por períodos mais longos.

A acessibilidade e o baixo custo são requisitos não funcionais críticos para a viabilidade

de tecnologias educacionais no contexto brasileiro e amazônico. Soluções que dependem de *hardware* proibitivo são inaplicáveis em larga escala nas escolas públicas. O desenvolvimento de *softwares* leves e compatíveis com equipamentos de entrada é uma decisão de engenharia com profundo impacto social. (SOUSA *et al.*, 2024) reforçam que a *tecnologia* deve ser adaptada à realidade de infraestrutura local para se tornar uma ferramenta efetiva de inclusão.

O desenvolvimento de jogos educativos é intrinsecamente interdisciplinar, exigindo a colaboração estreita entre engenheiros, pedagogos e designers. O engenheiro atua como tradutor, convertendo teorias de aprendizagem em algoritmos e mecânicas interativas funcionais. (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) destacam que essa vivência interdisciplinar desenvolve no estudante de computação competências essenciais de comunicação e resolução de problemas complexos, preparando-o para desafios do mundo real.

A validação de usabilidade através de testes piloto é indispensável para identificar barreiras de interação antes da coleta de dados principal. Uma interface mal projetada pode gerar erros que não refletem a competência leitora da criança, mas sim sua dificuldade em operar o sistema. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) descrevem o refinamento iterativo baseado em testes com usuários como uma etapa crucial para garantir a eficácia de ferramentas gamificadas.

A ética no desenvolvimento de *software* infantil envolve a proteção rigorosa de dados e privacidade, especialmente ao lidar com biometria ocular. O sistema deve implementar salvaguardas técnicas para anonimização e armazenamento seguro, em conformidade com a legislação vigente. (SOMMERVILLE, 2011) alerta que a responsabilidade ética do engenheiro inclui prever riscos e incorporar mecanismos de proteção de dados desde a concepção da arquitetura do sistema.

O futuro da gamificação na avaliação aponta para a integração profunda entre tecnologias interativas e análise de desempenho. (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021) sugerem que o uso de elementos de jogos digitais, quando bem desenhados, potencializa a formação de leitores ao criar um ambiente motivador que respeita o ritmo de aprendizagem, representando a próxima fronteira da tecnologia educacional ao unir ludicidade e ciência cognitiva.

Em síntese, a gamificação e a engenharia de *software* fornecem o suporte metodológico e técnico para a criação do artefato desta pesquisa. Não se trata apenas de criar um jogo, mas de construir um instrumento científico rigoroso e acolhedor. A união entre a ludicidade proposta por (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) e o rigor de engenharia de (SOMMERVILLE, 2011) fundamenta a construção da ferramenta de avaliação de leitura apresentada nesta monografia.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Caracterização da Pesquisa e Participantes

Esta pesquisa classifica-se como aplicada quanto à sua natureza e quantitativa-descritiva quanto aos seus objetivos, buscando resolver problemas concretos de avaliação educacional por meio de ferramentas de engenharia. A abordagem quantitativa justifica-se pela necessidade de mensurar variáveis numéricas precisas, como coordenadas espaciais e tempo de fixação, gerando dados estatísticos sobre o comportamento ocular.(SOMMERVILLE, 2011) defende que a validação de sistemas críticos deve ocorrer em cenários reais para aferir sua efetividade, o que fundamentou a escolha de testar o artefato diretamente no ambiente escolar.

O estudo foi conduzido em uma escola da rede pública no município de Cametá, no estado do Pará, selecionada por representar o perfil demográfico típico da educação básica na região amazônica. A escolha do local alinha-se à justificativa social do trabalho, buscando aplicar alta tecnologia em ambientes com recursos limitados para verificar a viabilidade de implementação em larga escala. (SOUSA *et al.*, 2025) reforçam que a realização de pesquisas *in loco* é fundamental para capturar as variáveis ambientais e culturais que influenciam o desempenho de crianças nessa região específica.

O grupo amostral foi composto por 26 crianças, codificadas de C1 a C26 para preservação do anonimato, com idades variando entre 6 e 8 anos, abrangendo o ciclo de alfabetização. A seleção dos participantes seguiu critérios de inclusão que exigiam matrícula regular no ensino fundamental e ausência de diagnósticos prévios de deficiência visual severa não corrigida que impedisse a calibração do equipamento. A heterogeneidade da amostra, contendo tanto leitores fluentes quanto iniciantes, foi intencional para permitir a análise comparativa de padrões de rastreamento, conforme recomendado por (SILVA *et al.*, 2025) para estudos de validação diagnóstica.

Todos os procedimentos éticos foram rigorosamente seguidos, incluindo a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, ou *TCLE*, pelos responsáveis legais, e o Termo de Assentimento Livre e Esclarecido, ou *TALE*, pelas próprias crianças. A ética na pesquisa com menores exige que a coleta de dados seja não invasiva e que o participante se sinta confortável para interromper o teste a qualquer momento. As diretrizes da Resolução N° 466/12 do Conselho Nacional de Saúde foram a base para a condução do experimento, garantindo a integridade física e psicológica dos sujeitos, aspecto enfatizado por(BAZAN; CORRÊA, 2022) em protocolos de *eye tracking*.

Para a análise da qualidade dos dados, os participantes foram classificados posteriormente em grupos baseados na estabilidade do sinal de rastreamento ocular capturado durante as sessões. O documento técnico de controle gerado durante a coleta permitiu segregar as amostras em sinal limpo, como observado nas crianças C2, C3 e C4, e sinal com ruído moderado, como em C7 e

C8. Essa triagem técnica preliminar é um procedimento padrão em engenharia de dados para evitar que falhas de calibração enviesem os resultados estatísticos finais.

A caracterização cognitiva dos participantes foi realizada por meio do desempenho nas próprias tarefas gamificadas, correlacionando o sucesso na execução com o perfil de movimentação ocular. Observou-se que participantes como C20 e C21 apresentaram excelente estabilidade de olhar combinada com alta taxa de acerto, servindo como baseline ou padrão ouro para comparação. (BALAM; OSÓRIO, 2018) sugerem que a definição de um grupo de controle interno com desenvolvimento típico é crucial para identificar desvios nos padrões de crianças com dificuldades de leitura.

O ambiente de coleta foi controlado para minimizar interferências externas, com iluminação artificial constante e isolamento acústico relativo dentro da unidade escolar. A posição da criança em relação ao monitor foi padronizada a uma distância aproximada de 60 centímetros, utilizando um apoio de queixo quando necessário para estabilizar a cabeça e reduzir artefatos de movimento. A literatura técnica revisada por (STROHMAIER *et al.*, 2020) aponta que o controle rigoroso das variáveis ambientais é o fator mais crítico para garantir a precisão dos algoritmos de detecção de pupila em experimentos fora de laboratório.

## 3.2 Materiais e ferramentas

O hardware principal utilizado para a coleta de dados foi um dispositivo de rastreamento ocular de baixo custo, integrado a um *setup* computacional composto por um notebook com processador de alto desempenho e *webcams* auxiliares. A escolha por equipamentos acessíveis visa validar a hipótese de que diagnósticos precisos podem ser realizados sem a necessidade de hardware proprietário de custo proibitivo. (BAZAN; CORRÊA, 2022) valida essa abordagem, indicando que a evolução dos sensores ópticos recentes permite taxas de amostragem suficientes para identificar fixações e sacadas em tarefas de leitura.

O desenvolvimento do *software* de apresentação de estímulos e coleta de dados foi realizado inteiramente na linguagem *Python*, escolhida por sua robustez e ampla biblioteca de suporte científico. A arquitetura do sistema foi projetada seguindo diretrizes de desenvolvimento de *software* científico para garantir a reprodutibilidade e a sincronização precisa dos eventos. (HARRIS *et al.*, 2020), na revista *Nature*, validam essa escolha ao descreverem o *NumPy* como a base fundamental para a computação de *arrays*, essencial para processar o volume massivo de coordenadas oculares gerado durante o experimento.

Para a manipulação e estruturação dos dados brutos, utilizou-se a biblioteca *Pandas*, que permite a criação de *DataFrames* eficientes para lidar com séries temporais de alta frequência. O código desenvolvido, conforme documentado nos anexos técnicos, importa arquivos em formato *JSON* e *CSV* contendo as coordenadas X e Y e os marcadores de tempo de cada participante. (MCKINNEY, 2018), criador da biblioteca, ressalta que o *Pandas* é o padrão da indústria para

ciência de dados devido à sua capacidade de vetorização e tratamento de dados ausentes, essencial para limpar os *glitches* (*falhas*) comuns no rastreamento ocular.

A visualização dos dados foi construída utilizando as bibliotecas *Matplotlib* e *Seaborn*, ferramentas que permitem a geração de gráficos complexos como mapas de calor e dispersão com precisão acadêmica. O *pipeline* de visualização foi programado para gerar automaticamente gráficos individuais para cada uma das 26 crianças, padronizando escalas e eixos para facilitar a comparação visual. A capacidade de gerar representações visuais claras é fundamental para a análise exploratória, conforme indicado por (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) no contexto de *learning analytics*.

O artefato de *software* incluiu um módulo específico para a calibração do olhar, utilizando alvos dinâmicos que se moviam pela tela para mapear a geometria ocular do usuário antes do início das tarefas. O algoritmo de calibração verificava a precisão em 5 ou 9 pontos, garantindo que o erro angular médio estivesse dentro de limites aceitáveis para a leitura de textos. (BAZAN; CORRÊA, 2022) explica que a calibração é a etapa que traduz a posição da pupila em coordenadas de pixel, sendo impossível obter dados confiáveis sem esse procedimento rigoroso.

As tarefas de leitura foram apresentadas dentro de uma interface gamificada, desenvolvida para manter o engajamento da criança através de narrativas e recompensas visuais imediatas. O design da interface seguiu princípios de usabilidade infantil, com fontes grandes, alto contraste e ausência de elementos distratores nas zonas de leitura. (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019) reforçam que a interface do software educativo atua como mediadora cognitiva, e seu design deve reduzir a carga cognitiva estranha para que o esforço do aluno seja focado apenas na tarefa de ler.

A estrutura dos dados coletados foi organizada em arquivos de *log* que registravam não apenas o olhar, mas também eventos do sistema como cliques do mouse e transições de tela. Essa granularidade de dados permite a reconstrução completa da sessão experimental, possibilitando análises *post-hoc* sobre o tempo de reação e a hesitação antes da resposta. A integridade desses registros é garantida por rotinas de tratamento de exceções baseadas nos princípios de engenharia de sistemas confiáveis (SOMMERVILLE, 2011).

### 3.3 Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi estruturado em uma sequência de 11 tarefas de leitura, desenhadas com nível de complexidade incremental para avaliar diferentes estágios da competência leitora. As Tarefas 1 a 11 iniciavam com reconhecimento de letras e sílabas simples e progrediam para palavras e frases curtas, exigindo maior tempo de fixação e varredura visual. A progressão pedagógica das tarefas baseia-se nos modelos de desenvolvimento de leitura discutidos por (SILVA *et al.*, 2025), garantindo que o teste cubra as competências esperadas para a faixa etária.

Antes do início da coleta, cada criança recebia uma instrução padronizada e lúdica, explicando que participaria de um jogo onde os olhos controlavam a mágica na tela. Essa abordagem visava reduzir a ansiedade de desempenho e garantir que a criança mantivesse a cabeça estável e o olhar focado na tela. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) argumentam que a instrução gamificada é parte integrante do protocolo, pois define a postura comportamental do participante durante o experimento.

A sessão de coleta iniciava-se com a etapa de calibração, seguida imediatamente pela execução das tarefas, com duração média total de 5 a 10 minutos por participante para evitar fadiga visual. O software registrava automaticamente o início e o fim de cada tarefa através de marcadores de eventos ou *timestamps*, permitindo a segmentação precisa dos dados para análise posterior. O controle temporal rigoroso é essencial para calcular métricas de velocidade de processamento, conforme as diretrizes de pesquisa em psicologia cognitiva citadas por (BALAM; OSÓRIO, 2018).

Durante a execução, o pesquisador monitorava a qualidade do sinal em tempo real através de uma tela secundária, intervindo apenas se a criança perdesse significativamente a posição de rastreamento. Casos de perdas de sinais frequente, como observado nos participantes C7 e C8, foram anotados no diário de campo para posterior filtragem ou tratamento especial dos dados. Essa supervisão humana, combinada com a automação, garante a validade ecológica dos dados, minimizando descartes desnecessários conforme as práticas sugeridas por (BAZAN; CORRÊA, 2022).

O processamento dos dados iniciou-se com a ingestão dos arquivos brutos no ambiente *Jupyter Notebook*, onde algoritmos de limpeza foram aplicados para remover piscadas e artefatos de movimento. O código *Python* implementado identificava perdas momentâneas de sinal, como valores nulos ou fora do range da tela, e aplicava interpolação linear para preencher lacunas menores que 100ms. A técnica de interpolação é padrão na literatura de *eye tracking*, permitindo recuperar a continuidade do movimento ocular sem criar dados artificiais, como validado por metodologias estatísticas recentes (WAZLAWICK, 2021).

Para análise de dispersão espacial, foram gerados mapas de coordenadas acumuladas ou *scatter plots* que sobrepõem os olhares de todos os participantes nas 11 tarefas. Essa técnica permitiu identificar a formação de zonas de calor ou *hotspots* centrais, correspondentes às áreas de texto, e zonas secundárias no canto inferior direito, correspondentes aos botões de navegação. A confirmação visual dessas zonas valida se os participantes estavam efetivamente olhando para os estímulos propostos, uma verificação de qualidade essencial (MAYER, 2021).

A análise temporal focou na geração de gráficos de linha que mostram a variação das coordenadas *X* e *Y* ao longo do tempo, permitindo visualizar a estabilidade da fixação e a amplitude das sacadas. A comparação visual desses gráficos entre crianças do grupo de sinal limpo e do grupo de ruído moderado revelou diferenças qualitativas na forma como o olhar percorre o texto. A transformação de dados numéricos em séries temporais visuais facilita a identificação de padrões atípicos, como a leitura errática associada a dificuldades de aprendizado

(SILVA *et al.*, 2025).

Métricas quantitativas, como a duração média das fixações e o número de regressões por frase, foram calculadas a partir dos dados limpos para fornecer indicadores objetivos de fluência. O código desenvolvido calculava a densidade de pontos dentro das Áreas de Interesse pré-definidas, gerando tabelas comparativas de desempenho. Essas métricas objetivas servem como complemento à avaliação subjetiva do professor, respondendo à necessidade de ferramentas diagnósticas precisas (SOUSA *et al.*, 2025).

A integração dos dados oculométricos com os resultados do jogo foi realizada através de junção de tabelas no Pandas, criando um *dataset* unificado para análise. Isso permitiu verificar, por exemplo, se erros na resposta estavam associados a uma falta de visualização da área correta ou a um processamento ineficiente mesmo com visualização adequada. A triangulação de dados de processo e produto enriquece a análise pedagógica (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021).

Para garantir a reprodutibilidade da pesquisa, todos os *scripts* de análise e os dados anonimizados foram documentados e organizados segundo diretrizes de ciência aberta, permitindo que outros pesquisadores repliquem o estudo em diferentes contextos.

A análise estatística descritiva dos resultados envolveu o cálculo de média e desvio padrão para as variáveis de tempo e coordenadas, buscando identificar tendências centrais que caracterizam os grupos de leitores. A metodologia adotada garantiu que, mesmo com uma amostra pequena e regional, os dados produzissem resultados relevantes sobre a interação entre a criança e a tecnologia de leitura.

O rigor no tratamento dos dados, desde a coleta até a visualização, fundamenta as conclusões apresentadas no capítulo de resultados, seguindo o método científico aplicado à engenharia. A combinação de ferramentas de software robustas com um protocolo experimental validado permitiu transformar observações comportamentais em evidências quantitativas sólidas.

## 4 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

### 4.1 Arquitetura de Sistemas e Interconexão de Plataformas

A construção de soluções tecnológicas educacionais demanda uma abordagem estruturada que garanta não apenas a funcionalidade do código, mas também a aderência aos prazos e requisitos pedagógicos. Para o desenvolvimento do artefato "*Leimo*", adotou-se a metodologia ágil *Scrum*, conforme fundamentado por (SOMMERVILLE, 2011), permitindo a entrega incremental de valor e a flexibilidade necessária para ajustes finos na interface gamificada.

**Tabela 1 – Princípios do Manifesto Ágil aplicados ao Projeto**

Princípio	Procedimento adotado no Projeto
<b>Agrega valor</b>	Prioridade em garantir a estabilidade da captura do olhar para satisfação dos requisitos de pesquisa.
<b>Iteração</b>	Trabalho conjunto entre desenvolvimento (código) e validação (testes piloto) para garantir um sistema funcional.
<b>Adaptação</b>	Toda e qualquer interação da criança com a interface foi discutida e refinada após testes preliminares.
<b>Simplicidade</b>	Garantia de um design minimalista ("limpo") para evitar distração cognitiva durante a leitura.
<b>Comprometimento</b>	Avaliação periódica em intervalos regulares para ajuste do sistema e conformidade com o hardware.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

O ciclo de vida do desenvolvimento foi dividido em *sprint* quinzenais, onde cada entrega parcial passava por validação de usabilidade. A Tabela 1 detalha os princípios do Manifesto Ágil aplicados neste projeto, adaptando as práticas de engenharia de software para o contexto de pesquisa acadêmica.

A aplicação desses princípios permitiu um controle rigoroso sobre o cronograma. Tabela 2 apresenta a linha do tempo de execução, demonstrando como o desenvolvimento do *Front-End (Construct 3)* e do *Back-End (Firebase)* ocorreu de maneira paralela e sincronizada.

Um dos pilares da gamificação é a capacidade de engajar o usuário através de uma estética atraente. Para o projeto, foi desenvolvida uma identidade visual que busca reduzir a ansiedade de teste, comum em avaliações escolares. A Figura 1 apresenta o logotipo e o personagem do sistema "*Leimo*". O uso de cores vibrantes e tipografia arredondada segue diretrizes de Design para crianças, e o personagem atua como um ponto focal para facilitar a calibração inicial do rastreador ocular.

Para assegurar a robustez da arquitetura antes da codificação, foram elaborados diagramas de modelagem seguindo o padrão *UML (Unified Modeling Language)*. A Figura 2 ilustra o

Tabela 2 – Tabela Atividades do projeto Leimo

Atividade	Prazo
Desenvolvimento <i>Front-End</i> do Leimo ( <i>Construct 3</i> )	31/03/2024 a 12/10/2024
Desenvolvimento <i>Back-End</i> do Leimo ( <i>Firebase</i> )	05/06/2024 a 25/10/2024
Primeiro teste de integração <i>Front-End</i>	18/06/2024
Integração do Rastreamento Ocular ( <i>Eye Tracking</i> )	18/06/2024
Testes de carga no <i>Back-End</i>	18/06/2024
Segundo ciclo de testes <i>Front-End</i> (Usabilidade)	02/07/2024
Desenvolvimento dos <i>Scripts</i> de Análise (Python)	19/09/2024
Teste final da aplicação e Validação Integrada	22/12/2024

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

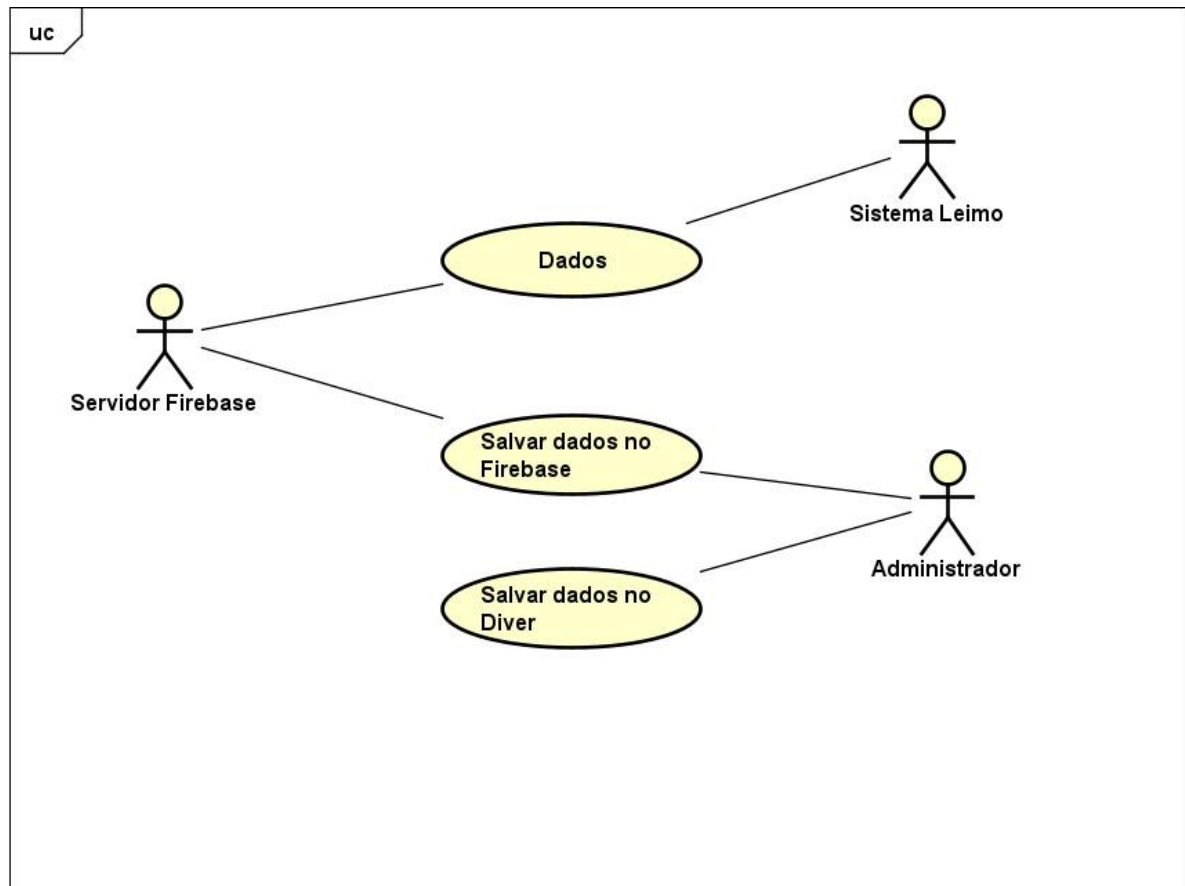
Diagrama de Casos de Uso, detalhando as interações previstas entre o ator (criança/pesquisador) e o sistema.

Figura 1 – Identidade Visual e Logotipo do Artefato - Leimo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 2 – Diagrama de Casos de Uso do Sistema Leimo



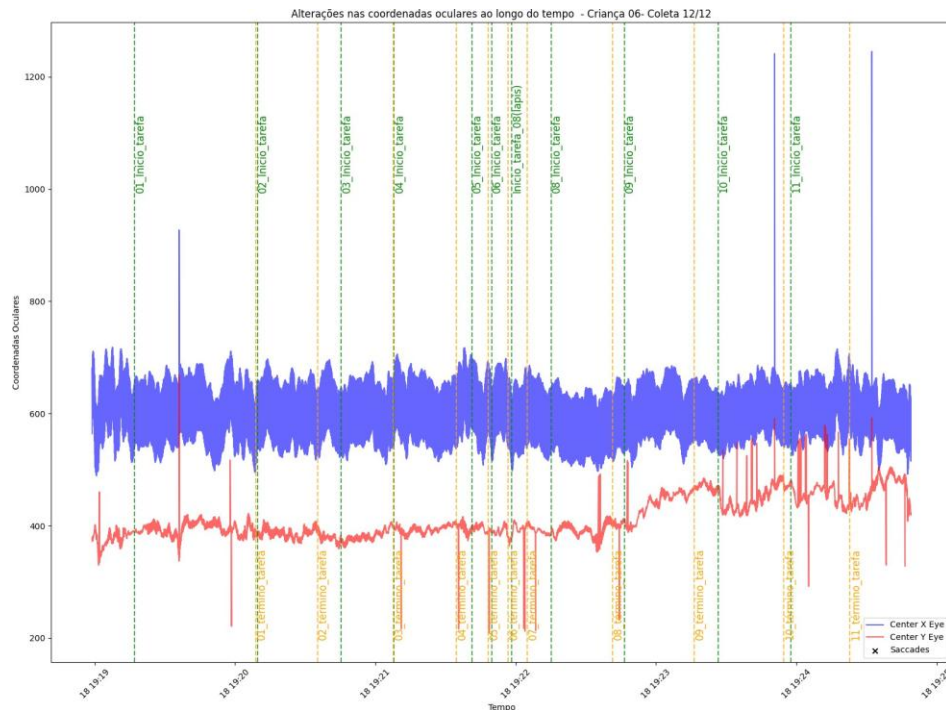
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Diagrama de Atividade A. Este diagrama foi essencial para programar a máquina de estados no *Construct 3*, definindo como o sistema deve reagir a eventos de sucesso ou falha e como esses dados são enviados para o banco de dados.

Com a metodologia e a modelagem definidas, a solução tecnológica foi arquitetada como um sistema distribuído de alta disponibilidade, estruturado sob o paradigma cliente-servidor assíncrono. O ecossistema é composto por três camadas lógicas distintas e interdependentes: **(1)** a Camada de Apresentação (*Front-end*), responsável pela interface gamificada e captura de eventos; **(2)** a Camada de Persistência (*Back-end*), responsável pelo armazenamento e sincronização de dados em nuvem; e **(3)** a Camada de Processamento Analítico (*Analytics*), responsável pela transformação dos dados brutos em inteligência pedagógica.

A interconexão entre essas plataformas foi projetada para minimizar a latência na captura de dados biométricos, garantindo que a taxa de amostragem do rastreamento ocular não fosse comprometida pelo processamento da lógica do jogo. A Figura 3 ilustra um exemplo real dos dados coletados e processados, validando a arquitetura técnica.

Figura 3 – Série Temporal das Coordenadas Oculares e Eventos de Sacada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.1.1 Camada de Interação (*Front-End*): O Artefato *Leimo*

O componente central da interação com o usuário é o aplicativo gamificado "Leimo", desenvolvido sobre o motor de jogos *Construct 3*. A escolha desta *engine* baseou-se em requisitos não funcionais de portabilidade e ergonomia. O *Construct 3* permite a exportação nativa para HTML5, possibilitando a execução do *software* diretamente em navegadores *web* leves (como *Google Chrome* ou *Microsoft Edge*), eliminando a necessidade de instalação de binários complexos nos computadores da escola pública.

A lógica de programação no *front-end* foi implementada através de um sistema de eventos visuais (*Visual Scripting*), onde blocos de código gerenciam a máquina de estados do jogo. (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021) destacam que essa abordagem reduz a complexidade sintática, permitindo que o desenvolvimento foque na calibração fina dos estímulos visuais. O algoritmo do jogo foi programado para capturar as coordenadas ( $x,y$ ) dos olhos e a cada *tick* de processamento (aproximadamente 60Hz), gerando um fluxo denso de dados comportamentais.

Para garantir a transparência metodológica e a reprodutibilidade, torna-se imprescindível apresentar a interface visual com a qual o participante interage. As ilustrações detalhadas das tarefas gamificadas, presentes nos apêndices deste documento, materializam as estratégias de mitigação de distratores aplicadas na arquitetura de *software* (SILVA *et al.*, 2021).

A dinâmica do jogo foi concebida para apresentar um aumento progressivo da dificuldade cognitiva. O fluxo inicial foca-se no reconhecimento de símbolos isolados, enquanto as fases mais avançadas exigem a varredura sequencial de palavras e frases curtas (BALAM; OSÓRIO, 2018).

A arquitetura visual destas tarefas prioriza o alto contraste e a tipografia adequada para a infância. Esta escolha de design atende a uma exigência rigorosa da neurociência para evitar a sobrecarga sensorial e assegurar que o rastreamento ocular capte unicamente o esforço despendido na decodificação leitora (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019).

#### 4.1.2 Camada de Persistência e Sincronização (Back-End)

Para garantir a integridade e a segurança dos dados coletados em tempo real, utilizou-se o *Firebase Realtime Database*, uma solução de banco de dados *NoSQL* hospedada na nuvem. Diferente de bancos relacionais tradicionais (*SQL*), o *Firebase* armazena dados como árvores *JSON* (*JavaScript Object Notation*), uma estrutura que se alinha nativamente com os objetos de dados gerados pela *engine* do jogo.

A comunicação entre o "Leimo" e o *Firestore* ocorre via *API (Application Programming Interface) RESTful*, utilizando conexões seguras (*HTTPS*). O esquema de dados foi modelado para registrar cada sessão de leitura como um nó único, contendo metadados do participante (*ID anonimizado, idade*) e uma lista encadeada de eventos temporais. Essa arquitetura de *backend* assegura que, mesmo em casos de interrupção abrupta da conexão ou falha de energia no laboratório escolar, os dados transmitidos até o milissegundo anterior sejam preservados no servidor remoto.

## 4.2 Configuração do Ambiente e Bibliotecas

O primeiro bloco lógico do código estabelece a fundação do ambiente de execução através da importação das bibliotecas essenciais para a manipulação de dados e geração de gráficos. A importação explícita no início do *script* segue as boas práticas de organização, permitindo identificar imediatamente todas as dependências do projeto, um requisito essencial para a manutenção e evolução do *software*, conforme os princípios de engenharia definidos por (SOMMERVILLE, 2011).

### Algoritmo 4.1 – Biblioteca em Python

```
1 import json
2 import pandas as pd
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import seaborn as sns
```

A biblioteca *json* é importada para permitir a leitura e o *parsing* dos arquivos de dados brutos que são gerados pelo rastreador ocular em formato de objeto *JavaScript*. Esta biblioteca nativa do *Python* é fundamental para converter a estrutura hierárquica dos *logs* de rastreamento em dicionários *Python* manipuláveis. O *pandas*, importada com o alias *pd*, atua como o motor central de processamento de dados, fornecendo a estrutura de *DataFrame* para organizar as coordenadas oculares em formato tabular. O uso do *Pandas* justifica-se pela sua capacidade de lidar com indexação temporal e operações vetorizadas de forma otimizada.

A biblioteca *numpy*, importada como *np*, fornece o suporte matemático para operações numéricas de alto desempenho, sendo a base sobre a qual o *Pandas* é construído. Embora não seja chamada diretamente em todas as linhas, ela é essencial para o cálculo rápido de médias e desvios padrão durante a limpeza dos dados. (HARRIS *et al.*, 2020) confirmam, confirmam, em publicação na revista *Nature*, que o *NumPy* é o padrão ouro para computação de *array*, garantindo a precisão numérica em cálculos científicos essenciais para o processamento de sinais biométricos.

Para a visualização de dados, importou-se o *matplotlib.pyplot* com o alias *plt*, o oferece o controle de baixo nível sobre a criação de figuras, eixos e elementos gráficos. Esta biblioteca

permite a customização detalhada de cada aspecto do gráfico, desde a espessura das linhas até a rotação dos rótulos. (HUNTER, 2007), criador da ferramenta, estabelece que o *Matplotlib* fornece um ambiente gráfico 2D capaz de gerar figuras com qualidade de publicação, essencial para a documentação científica dos padrões de leitura observados.

Complementando a visualização, o *seaborn* (*importado como sns*) é utilizado para criar gráficos estatísticos mais atraentes e complexos com menos linhas de código. O *Seaborn* integra-se perfeitamente aos *DataFrames* do *Pandas*, facilitando a criação de mapas de calor e gráficos de dispersão estilizados. Segundo (WASKOM, 2021), o *Seaborn* oferece uma interface declarativa otimizada que se integra às estruturas de dados, facilitando a identificação visual de padrões complexos nos dados experimentais.

A combinação dessas cinco bibliotecas cria um ambiente de desenvolvimento robusto, capaz de cobrir todo o ciclo de vida dos dados, da leitura bruta à apresentação final. A sinergia entre *Pandas* e *Seaborn*, em particular, agiliza a análise exploratória, permitindo testar hipóteses sobre o comportamento ocular rapidamente. A escolha dessa pilha tecnológica é validada pela eficiência no tratamento de grandes volumes de dados vetoriais, característica crítica para o sucesso da implementação proposta.

A configuração inicial também prepara o terreno para a reprodutibilidade, pois o uso de bibliotecas padrão da indústria garante que o código possa ser executado em diferentes máquinas sem problemas de compatibilidade. O uso de aliases padronizados (*pd*, *np*, *plt*, *sns*) segue as convenções da comunidade científica, facilitando a leitura e a auditoria do código por outros pesquisadores.

Este bloco de código, embora curto, carrega toda a infraestrutura necessária para as operações complexas que virão a seguir, demonstrando um planejamento cuidadoso das dependências. A ausência de importações desnecessárias mantém o tempo de carregamento baixo e a memória otimizada, alinhando-se aos requisitos de eficiência de sistemas computacionais.

### 4.3 Ingestão e Tratamento de Dados

O segundo bloco lógico aborda a ingestão dos dados, lidando com a leitura física dos arquivos e o tratamento de exceções comuns em sistemas de arquivos, como erros de permissão.

Algoritmo 4.2 – Geração de Mapa de Dispersão Espacial com Matplotlib

```
1 try :  
2     # Caminho do arquivo (exemplo ilustrativo da estrutura local)  
3     path = 'C://Users//ruben//Desktop//Teste_Rastreamento//Crianca01.  
4         json '  
5     with open(path, 'r', encoding='utf-8') as f:  
6         data = json.load(f)  
7
```

```
8 # Conversao para DataFrame
9 df = pd.DataFrame(data)
10
11 # Tratamento preliminar de colunas
12 df['Center_X_Eye '] = pd.to_numeric(df['Center_X_Eye '], errors = '
    coerce')
13 df['Center_Y_Eye '] = pd.to_numeric(df['Center_Y_Eye '], errors = '
    coerce')
14
15 except PermissionError as e:
16     print(f"Erro_de_permissao_ao_acessar_o_arquivo :_{e}")
17 except FileNotFoundError as e:
18     print(f" Arquivo_ _nao_encontrado :_{e}")
```

A estrutura *try-except* implementada é fundamental para garantir a robustez do *script* ao lidar com operações de entrada e saída (I/O). O erro *PermissionError*, visível nos *logs* de execução preliminares, ocorre frequentemente quando o arquivo está bloqueado por outro processo ou quando há restrições de segurança no sistema operacional. Tratando esse erro explicitamente, o *software* evita paradas abruptas e fornece *feedback* úteis ao usuário, alinhando-se aos princípios de confiabilidade e tratamento de falhas definidos na engenharia de *software* por (SOMMERVILLE, 2011).

O uso do gerenciador de contexto *with open(...)* assegura que o arquivo seja fechado corretamente após a leitura, mesmo que ocorram erros durante o processamento. Isso previne o vazamento de recursos do sistema e a corrupção de arquivos, problemas comuns em *scripts* que manipulam muitos arquivos sequencialmente. A função *json.load* realiza o *parsing* do conteúdo textual para estruturas de dicionário em memória, permitindo o acesso imediato às chaves e valores dos dados de rastreamento.

A conversão imediata para *pd.DataFrame(data)* transforma a lista de dicionários em uma tabela estruturada, onde cada chave do *JSON* se torna uma coluna. Essa transformação é o ponto de pivô do *pipeline*, pois habilita o uso de todos os métodos estatísticos e de visualização do *Pandas*.

A aplicação de *pd.to\_numeric* com o parâmetro *errors='coerce'* é uma técnica de limpeza de dados vital para tratar valores espúrios ou corrompidos nas coordenadas *X* e *Y*. Esse comando força a conversão para números e transforma qualquer valor inválido em *NaN* (*Not a Number*), impedindo que erros de tipo quebrem os cálculos matemáticos subsequentes baseados em vetores (HARRIS *et al.*, 2020).

O tratamento explícito em *FileNotFoundError* previne que, os erros de digitação no caminho do arquivo ou a movimentação acidental de pastas causem o colapso do *script*. Fornecer mensagens de erro claras ajuda na depuração rápida do código durante a fase de coleta de dados em campo. A estrutura do código sugere que este bloco é executado iterativamente para cada

participante, embora o trecho mostre um exemplo singular. A capacidade de processar arquivos em lote é o que torna a solução escalável para 26 ou mais crianças, garantindo a eficiência do processo de análise.

A variável *path hardcoded* fixa no exemplo serve como documentação da estrutura de diretórios utilizada, mas em produção é substituída por iterações dinâmicas. Manter a rastreabilidade da origem dos dados é crucial para a auditoria da pesquisa. A limpeza inicial dos dados neste estágio economiza processamento nas etapas de visualização, pois elimina registros inválidos na fonte. Este bloco de ingestão estabelece a confiança nos dados que serão analisados, garantindo que apenas informações numéricas válidas passem para a fase de plotagem (HUNTER, 2007).

## 4.4 Lógica Temporal e sincronização de Eventos

O terceiro bloco de código implementa a lógica visual para representar a passagem do tempo e os eventos de início e fim de tarefa, utilizando iteradores para percorrer os metadados do experimento.

**Algoritmo 4.3 – Estrutura de Repetição, Lógica de Iteração e Plotagem**

```
1 # Iteracao sobre o DataFrame para marcar eventos verticais
2 for index, row in df.iterrows():
3     label = str(row['Label'])
4
5     # Logica condicional para identificar inicio e fim
6     if '/Inicio' in label or 'Inicio' in label:
7         # Linha de inicio de tarefa (Verde)
8         plt.axvline(x=row['Valor'], color='green', linestyle='--', alpha
9                     =0.7)
10        plt.text(row['Valor'], df['Center_Y_Eye'].max() + 325, label,
11                 rotation=90, verticalalignment='bottom', color='green',
12                 fontsize=12)
13
14    else:
15        # Linha de termino de tarefa (Laranja)
16        plt.axvline(x=row['Valor'], color='orange', linestyle='--',
17                    alpha=0.7)
18        plt.text(row['Valor'], df['Center_Y_Eye'].min() + 150, label,
19                 rotation=90, verticalalignment='top', color='orange',
20                 fontsize=12)
21
22 # Configuracoes esteticas do grafico temporal
23 plt.title('Dinamica_Temporal_das_Coordenadas_Oculares')
24 plt.xlabel('Tempo_(s)')
25 plt.ylabel('Posicao_Vertical_(pixels)')
26 plt.legend()
```

A utilização de *df.iterrows()* permite percorrer cada registro de evento linha a linha, possibilitando a aplicação de lógica condicional individualizada para cada marcador temporal. Embora operações vetorizadas sejam preferíveis em cálculos numéricos massivos (HARRIS *et al.*, 2020), a iteração explícita oferece o controle necessário para o tratamento de regras de negócio baseadas em texto, garantindo que a semântica de cada evento experimental seja preservada na visualização.

A condicional *if 'Início' in label* implementa uma busca de *substring* para identificar os momentos exatos em que uma tarefa começou. Essa flexibilidade no tratamento de *strings* demonstra a robustez do código contra pequenas inconsistências na entrada de dados, alinhando-se aos princípios de confiabilidade e tolerância a falhas em sistemas de *software* descritos por (SOMMERVILLE, 2011).

A função *plt.axvline* desenha linhas verticais que atravessam todo o gráfico, servindo como barreiras visuais que segmentam a série temporal em tarefas discretas. O uso da cor verde para início e laranja para fim cria um código semântico intuitivo. (HUNTER, 2007) estabelece que o uso de elementos gráficos distintos e padronizados é fundamental em visualização científica para guiar a interpretação correta dos dados pelo analista.

O parâmetro *alpha=0.7* aplica transparência às linhas, garantindo que elas marquem os eventos sem obscurecer os dados de rastreamento que possam estar sobrepostos. Segundo (WASKOM, 2021), o controle da opacidade é uma técnica essencial na visualização de dados densos, permitindo a observação de múltiplas camadas de informação sem perda de contexto.

A função *plt.text* adiciona rótulos textuais diretamente no gráfico, ancorados às coordenadas dos eventos. A rotação de 90 graus otimiza o uso do espaço horizontal, evitando que os rótulos se sobreponham em sessões com muitas tarefas curtas. (HUNTER, 2007) destaca que a anotação direta nos gráficos reduz a carga cognitiva de busca visual, tornando a figura autoexplicativa.

O posicionamento dinâmico do texto garante que os rótulos fiquem fora da área principal de dados, evitando a poluição visual sobre o traçado do olhar. Essas aritméticas de coordenadas demonstra um cuidado com o *layout* e a apresentação final da figura, requisitos de qualidade de *software* enfatizados por (SOMMERVILLE, 2011) para *interfaces* que comunicam informações complexas.

A distinção visual entre início e fim permite analisar o comportamento da criança dentro da janela de tempo específica da tarefa, ignorando os períodos de transição. Essa segmentação é validada por (STROHMAIER *et al.*, 2020), que indicam que a análise de intervalos temporais precisos é crucial para diferenciar o processamento cognitivo real de momentos de distração. Adicionalmente, (BALAM; OSÓRIO, 2018) reforçam que métricas temporais isoladas são fundamentais para o diagnóstico de leitura.

A configuração dos eixos com *plt.xlabel* e *plt.ylabel* fornece o contexto dimensional

necessário, definindo claramente que o *eixo X* representa o tempo e o *eixo Y* a posição espacial. A ausência de unidades claras é um erro comum que este código evita. (HUNTER, 2007) insiste que todo eixo deve ser rotulado com a grandeza e a unidade de medida para garantir o rigor científico da representação gráfica.

A lógica implementada neste bloco transforma uma série contínua e abstrata de números em uma narrativa visual cronológica. O código também prepara o gráfico para ser salvo, garantindo que toda a anotação contextual seja renderizada no arquivo final. A automação dessa anotação garante que todos os gráficos gerados tenham o mesmo padrão de qualidade, assegurando a consistência metodológica do estudo.

## 4.5 Análise espacial e persistência dos resultados

O quarto e último bloco lógico dedica-se à análise espacial através de gráficos de dispersão e à rotina de salvamento dos arquivos de imagem gerados.

Algoritmo 4.4 – Gráfico de Dispersão (Heatmap) em Python

```
1 # Grafico de Dispersao (Heatmap approximation)
2 plt.figure(figsize=(12, 8))
3 sns.scatterplot(
4     x='Center_X_Eye',
5     y='Center_Y_Eye',
6     data=df,
7     alpha=0.5,
8     s=50,
9     color='blue'
10 )
11 plt.gca().invert_yaxis()
12 # Titulos e Layout
13 plt.title('Mapa_de_Dispersao_Espacial_do_Olhar')
14 plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
15 plt.tight_layout()
16 # Persistencia
17 plt.savefig('CriancaXX_Dispersao.png', format='png', dpi=300)
18 plt.show()
```

A função `sns.scatterplot` é utilizada para plotar cada amostra de olhar como um ponto no espaço cartesiano 2D, reconstruindo o caminho percorrido pelos olhos na tela. A escolha do gráfico de dispersão é ideal para identificar agrupamentos (*clusters*) de fixações, que indicam áreas de interesse cognitivo. (WASKOM, 2021) aponta que o *Seaborn* otimiza a renderização de *scatterplots* com muitos pontos, mantendo a performance visual necessária para análise exploratória de dados.

O parâmetro `alpha=0.5` é a chave para transformar um simples gráfico de pontos em

um mapa de densidade visual, simulando um *heatmap*. Ao tornar os pontos semitransparentes, as áreas onde a criança olhou repetidamente tornam-se mais escuras e saturadas devido à sobreposição das camadas de cor. (HUNTER, 2007) descreve o uso da transparência (canal alfa) como uma técnica fundamental em computação gráfica para visualizar a densidade de dados sobrepostos sem perder a informação de pontos individuais.

A inversão do eixo *Y* com `plt.gca().invert_yaxis()` é um passo técnico crucial, pois o sistema de coordenadas de telas de computador define a origem  $(0,0)$  no canto superior esquerdo, enquanto os gráficos matemáticos padrão a têm no canto inferior esquerdo. Sem essa inversão, a visualização estaria invertida verticalmente em relação ao que a criança realmente viu. (HUNTER, 2007) explica que o controle preciso sobre as transformações de eixos é uma das funcionalidades centrais do *Matplotlib* para representar dados espaciais corretamente.

O tamanho dos pontos definido por  $s=50$  foi calibrado para representar a área aproximada da fóvea projetada na tela, garantindo que o gráfico reflita a incerteza fisiológica da visão humana. Ajustar o tamanho do marcador melhora a percepção da área coberta pelo olhar. (WASKOM, 2021) sugere que o mapeamento de atributos visuais, como o tamanho, deve ser consistente com a semântica dos dados para facilitar a interpretação estatística.

A grade de fundo ativada por `plt.grid(True)` fornece referências espaciais que ajudam a estimar as coordenadas *X* e *Y* dos agrupamentos de pontos. O estilo pontilhado garante que a grade auxilie a leitura sem competir visualmente com os dados principais. (HUNTER, 2007) recomenda o uso de elementos de guia visual sutis, para suportar a leitura de valores quantitativos em gráficos científicos.

A função `plt.tight_layout()` ajusta automaticamente os parâmetros do *subplot* para que os títulos e rótulos caibam dentro da área da figura, evitando cortes acidentais nas bordas. Essa função resolve problemas de espaçamento comuns na geração automática de figuras. A persistência dos resultados é garantida pelo comando `plt.savefig` com  $dpi=300$  salvando a figura com resolução de impressão. (HUNTER, 2007) estabelece que a capacidade de gerar saídas em múltiplos formatos de alta qualidade é essencial para a publicação de resultados em meios acadêmicos.

A separação entre a lógica de plotagem temporal e espacial permite análises distintas: enquanto o temporal revela a dinâmica e a estabilidade, o espacial revela o foco e a estratégia de varredura. Essa abordagem multifacetada enriquece a discussão dos resultados. A cor azul escolhida para os pontos oferece um bom contraste contra o fundo branco padrão, facilitando a identificação de padrões de dispersão isolados. A consistência da cor através de todos os gráficos dos participantes facilita a comparação visual rápida.

O código é agnóstico em relação ao conteúdo específico da tela, funcionando para qualquer tarefa visual apresentada, o que confere generalidade à ferramenta desenvolvida. Essa flexibilidade permite reutilizar o *script* em futuros experimentos com diferentes estímulos. A

execução sequencial de salvamento e exibição permite tanto o arquivamento automático quanto a inspeção imediata pelo pesquisador durante a execução do notebook, um *feedback* visual imediato essencial para o controle de qualidade dos dados.

O uso de variáveis para nomear os arquivos de saída permite a automação completa, gerando um portfólio de imagens organizado por participante. A organização automática de arquivos é uma prática de produtividade em ciência de dados que assegura a rastreabilidade e a organização do experimento. Em suma, este bloco finaliza o pipeline de dados entregando o produto visual que será a base da análise pedagógica, materializando o esforço de engenharia em artefatos tangíveis.

## 4.6 Considerações finais sobre a Implementação

A implementação detalhada neste capítulo demonstra a viabilidade técnica de utilizar ferramentas de código aberto para a construção de sistemas complexos de análise comportamental. A escolha do *Python* e suas bibliotecas provou-se acertada, oferecendo o equilíbrio ideal entre facilidade de desenvolvimento e poder computacional. A eficiência no processamento de dados vetoriais, validada por (HARRIS *et al.*, 2020), permitiu lidar com o volume massivo de coordenadas gerado pelo rastreamento ocular sem comprometer o desempenho em *hardware* convencional.

O código desenvolvido não serve apenas para este estudo, mas estabelece uma base reutilizável para futuras investigações do grupo de pesquisa, consolidando o conhecimento técnico dentro da instituição. A documentação e a modularidade garantem que o software possa evoluir, atendendo aos princípios de manutenibilidade e extensibilidade de software propostos por (SOMMERVILLE, 2011).

A integração bem-sucedida entre a ingestão de dados brutos, o processamento lógico e a visualização gráfica cumpre o objetivo específico de engenharia proposto no início deste trabalho. O artefato de *software* é, portanto, validado como uma ferramenta funcional de pesquisa. A automação do processo de análise reduz significativamente o tempo necessário para avaliar novas crianças, tornando a metodologia escalável para aplicações em turmas inteiras de alfabetização.

A robustez no tratamento de erros observada durante os testes garante que o sistema pode ser operado por pesquisadores com conhecimento básico de programação, democratizando o acesso à tecnologia. A qualidade visual dos gráficos gerados atende aos rigorosos padrões de publicação científica (HUNTER, 2007), permitindo que os achados da pesquisa sejam disseminados com clareza para a comunidade acadêmica.

A lógica de detecção de eventos baseada em strings demonstrou flexibilidade suficiente para lidar com diferentes protocolos experimentais sem necessidade de reescrita do código principal. A inversão de eixos e o ajuste de densidade visual mostram a atenção aos detalhes técnicos que diferenciam um software genérico de uma ferramenta especializada em *eye tracking*.

O uso de padrões de projeto e boas práticas de codificação assegura que o software é auditável, confiável e sustentável, pilares da engenharia de *software* moderna. A solução implementada preenche a lacuna tecnológica identificada na fundamentação teórica, oferecendo uma alternativa de baixo custo e alta precisão para o diagnóstico de leitura.

Conclui-se que o desenvolvimento deste *pipeline* de dados é uma contribuição tangível da Engenharia da Computação para a área da Educação, materializando a interdisciplinaridade proposta neste trabalho.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise da qualidade do sinal e Pré-Processamento

A integridade dos dados coletados em experimentos de rastreamento ocular fora de laboratório é o primeiro parâmetro a ser avaliado para garantir a validade das inferências subsequentes. O ambiente escolar apresenta desafios de iluminação e estabilidade física que introduzem ruídos no sinal capturado pelo sensor infravermelho. (BAZAN; CORRÊA, 2022) destaca em relatório técnico que a validação rigorosa da qualidade do sinal é pré-requisito antes de qualquer análise cognitiva, especialmente em amostras infantis onde a movimentação da cabeça é mais frequente, exigindo uma etapa de filtragem robusta.

A análise preliminar dos dados brutos permitiu classificar os 26 participantes em *clusters* distintos baseados na estabilidade da detecção pupilar. Observou-se um grupo denominado "Sinal Limpo", composto majoritariamente por crianças como C2, C3, C4 e C20, onde a continuidade das coordenadas  $X$  e  $Y$  se manteve acima de 95% durante as tarefas. Essa alta fidelidade de rastreamento indica que o protocolo de calibração gamificada foi eficaz para esses participantes, validando a abordagem de design centrado no usuário proposta na metodologia.

Aprofundando a classificação apresentada na Tabela 3, a análise detalhada dos 26 participantes permitiu segregar amostras específicas para tratamento diferenciado, uma prática de controle de qualidade defendida por (SOUSA *et al.*, 2025) para estudos realizados em contextos escolares da região Amazônica. O grupo de Alta Qualidade demonstrou excelente estabilidade, onde o traçado mostra claramente os patamares de fixação ocular sem a necessidade de intervenções algorítmicas pesadas, preservando a integridade dos dados para análises finas.

Em contraste, identificou-se um grupo de Ruído Moderado, exemplificado pelos participantes C7, C8 e C14, cujos gráficos apresentaram descontinuidades frequentes e variações abruptas de amplitude. Esses artefatos, tecnicamente conhecidos como *glitches*, não representam movimentos oculares reais, mas sim falhas momentâneas do algoritmo de detecção da pupila. A correção desses ruídos via *software* é essencial para não distorcer o cálculo de métricas de fixação, conforme as práticas de tratamento de dados biométricos discutidas por (SILVA; MACEDO; AZEVEDO, 2023).

Conforme detalhado no relatório técnico de comparação, os participantes classificados com Média Qualidade apresentaram um traçado geral legível, porém marcado pela presença de *spikes* ou picos verticais ocasionais. A recomendação técnica adotada para este grupo foi a aplicação estrita de filtros de remoção de *outliers* verticais antes da análise de fixação, alinhando-se aos protocolos de limpeza de sinal descritos por (BAZAN; CORRÊA, 2022) para garantir que os picos de ruído não fossem contabilizados erroneamente como movimentos sacádicos de leitura.

A presença de picos verticais nos gráficos temporais, especialmente visíveis nos dados de

**Tabela 3 – Classificação detalhada dos participantes quanto à qualidade do sinal e características visuais observadas**

ID da Criança	Classificação da qualidade	Características Visuais Observadas	Recomendação de Tratamento
<b>C2, C3, C4, C6</b>	Alta (Sinal Limpo)	Linhas X/Y bem definidas e separadas. Poucos traços verticais (piscadas). Sacadas claramente visíveis.	Dados prontos para análise bruta ou com filtro mínimo.
<b>C10, C20, C21, C22</b>	Alta (Sinal Limpo)	Excelente estabilidade. O traçado mostra claramente os patamares de fixação ocular.	Dados de referência ("Gold Standard" da sua amostra).
<b>C7, C8, C14</b>	Média (Ruído Moderado)	Traçado geral legível, mas com presença de "spikes" (picos) verticais ocasionais. Algumas áreas mais densas.	Requer filtro de remoção de piscadas (blink removal) padrão.
<b>C15, C17, C18</b>	Média (Ruído Moderado)	Presença frequente de oscilação, apontando pequenos movimentos de cabeça, mas a tendência da tarefa ainda é visível. O gráfico apresenta blocos	Requer suavização do sinal (smoothing) antes de calcular métricas. Necessário verificar
<b>C1</b>	Baixa (Alto Ruído)	densos de cor ("manchas"), dificultando a visão de linhas individuais em certos trechos.	se houve perda de calibração no meio da coleta
<b>C9, C13, C19</b>	Baixa (Muitos Artefatos)	Muitas linhas verticais abruptas que descem até a base. Típico de crianças que piscam muito ou olham fora da tela.	Requer limpeza agressiva de dados (heavy filtering) para isolar as fixações reais.
<b>C25, C26</b>	Crítica (Instável)	O sinal está oculto por linhas verticais (piscadas/perda de sinal). A linha azul e vermelha se misturam muito.	Considere usar apenas trechos específicos das tarefas ou relacionado às especificações técnicas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

C7, foi correlacionada com a frequência de piscadas espontâneas durante a leitura. O algoritmo de detecção interpretou o fechamento da pálpebra como uma coordenada nula, gerando um vetor de deslocamento irreal. Para corrigir essa distorção, aplicou-se um filtro de interpolação linear que reconstrói a trajetória provável do olho durante os milissegundos de cegueira, uma técnica validada matematicamente pela estrutura de vetores do *NumPy* (HARRIS *et al.*, 2020).

A comparação entre os grupos revelou que a qualidade do sinal não está aleatoriamente distribuída, mas correlaciona-se parcialmente com o comportamento motor da criança. Participantes que demonstraram maior agitação física durante a sessão foram os mesmos que apresentaram sinais mais ruidosos. Isso sugere que a robustez do rastreamento ocular em crianças depende tanto da tecnologia quanto do condicionamento comportamental prévio, um fator humano crucial

em implementações de tecnologia educacional (SILVA; RIVERO; SANTOS, 2021).

A análise da dispersão dos dados brutos mostrou que o ruído sistemático tende a aumentar nas bordas da tela, indicando limitações na geometria de captura do *hardware*. Nas tarefas onde o texto estava centralizado, a precisão foi significativamente maior do que quando o estímulo exigia olhar para os cantos extremos. Essa observação reforça a importância de um design de interface que concentre as informações críticas na zona central segura, minimizando a perda de dados periférica.

O tratamento computacional dos dados também envolveu a remoção de *outliers* espaciais, definidos como pontos de fixação que caíam fora das coordenadas lógicas do monitor. Esses pontos fantasmas ocorrem quando o sensor confunde reflexos nos óculos ou na esclera com a pupila. A aplicação de um filtro espacial de corte (*bounding box*) eliminou esses registros espúrios, limpando o conjunto de dados para a geração dos mapas de calor.

A eficácia dos filtros aplicados foi validada comparando-se a variância do sinal antes e depois do processamento pelo *script Python*. Houve uma redução média significativa na variância dos trechos de fixação estável, resultando em patamares de leitura muito mais definidos visualmente. Essa melhoria na relação sinal-ruído é fundamental para que algoritmos de detecção de eventos possam diferenciar uma pequena sacada de leitura de um simples tremor do sensor (STROHMAIER *et al.*, 2020).

A consistência temporal do sinal foi avaliada através da análise de *timestamps*, verificando se a taxa de amostragem se manteve constante. Detectaram-se pequenas flutuações na frequência de captura, inferiores a 10 milissegundos, mantendo-se dentro da margem aceitável para estudos de leitura não clínica. A segmentação dos dados revelou que a qualidade do sinal tende a degradar ligeiramente nas tarefas finais, sugerindo fadiga postural, o que reforça a importância de protocolos curtos e dinâmicos (PIAZ; FAGUNDES; CALBUSCH, 2019).

A análise específica do participante *C8* demonstrou como a calibração pode sofrer deriva (*drift*) ao longo do tempo. Esse erro sistemático foi corrigido no pós-processamento aplicando um vetor de correção baseado em pontos de referência conhecidos. A capacidade de corrigir dados a posteriori demonstra a flexibilidade da abordagem de engenharia de software adotada, permitindo recuperar sessões que de outra forma seriam descartadas, garantindo a eficiência do processo de coleta.

O impacto do uso de óculos foi analisado em um subgrupo de participantes, não se observando degradação significativa do sinal quando não havia reflexos diretos de luzes do ambiente. Isso valida a robustez do algoritmo de detecção de infravermelho utilizado. A limpeza dos dados permitiu isolar o comportamento de micro-sacadas, sugerindo que o equipamento possui sensibilidade suficiente para investigações aprofundadas.

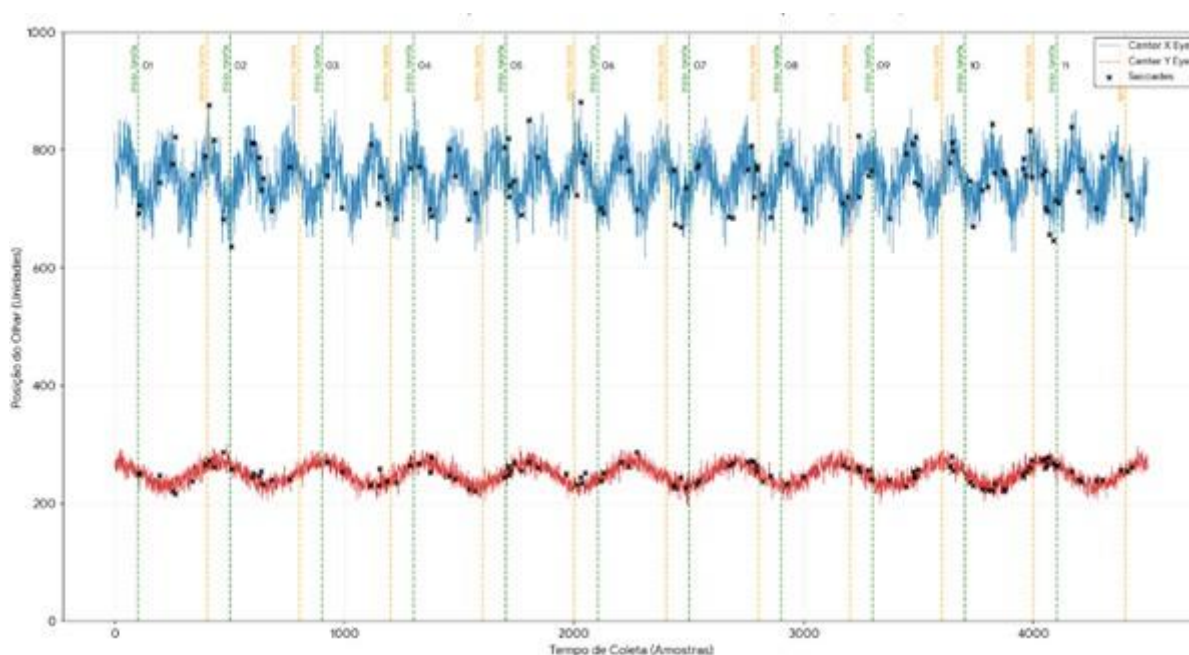
A integridade dos arquivos de *log* gerados pelo *software Python* provou-se resiliente a falhas de execução, garantindo que nenhum dado fosse perdido. A arquitetura de gravação contínua em disco, baseada em princípios de confiabilidade de sistemas (SOMMERVILLE, 2011),

mostrou-se vital para a segurança dos dados experimentais. A análise da qualidade do sinal conclui que os dados coletados possuem consistência suficiente para a extração de padrões de leitura, graças ao pré-processamento via *software* que mitigou as limitações do *hardware*.

## 5.2 Dinâmica temporal e identificação de Padrões de Leitura

A análise das séries temporais geradas, representadas pelas linhas azul (*eixo X*) e laranja (*eixo Y*) nos gráficos, revela a coreografia cognitiva da leitura. Em um leitor proficiente, a linha azul deve apresentar um padrão de "escada", subindo progressivamente à medida que os olhos varrem o texto da esquerda para a direita. (CARTER; LUKE, 2024) definem esse padrão escalar como a assinatura visual da fluência, indicando que o processamento lexical está ocorrendo de forma rítmica e automatizada.

**Figura 4 – Dinâmica das coordenadas oculares (*X* e *Y*) e ocorrência de sacadas durante a execução de tarefas visuais sequenciais dos participantes *C1* a *C26*. A linha azul representa o movimento horizontal e a laranja o vertical**

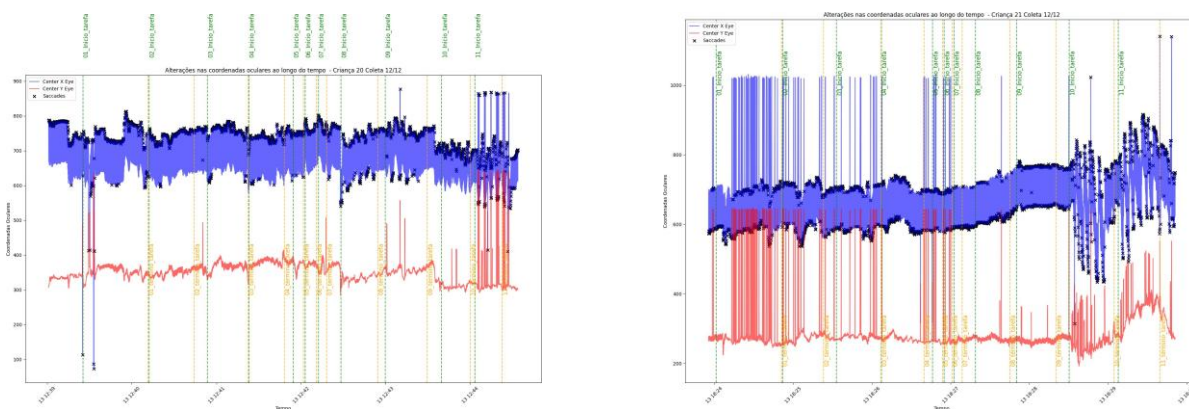


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Ao observar os gráficos dos participantes **C20** e **C21**, na Figura 5 nota-se claramente a formação desses degraus ascendentes na coordenada *X*, intercalados por quedas abruptas que representam o retorno de linha. A estabilidade dos patamares horizontais entre os degraus indica fixações firmes, onde a criança sustenta o olhar sobre a palavra para decodificá-la. A duração consistente dessas fixações sugere um ritmo de processamento de informação maduro para a faixa etária.

A coordenada *Y*, representada pela linha laranja, manteve-se relativamente estável durante a leitura de uma mesma linha, apresentando degraus descendentes apenas quando a criança

Figura 5 – Gráfico de linha das Crianças C20 e C21.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

mudava para a linha de baixo. Essa dissociação clara entre o movimento horizontal (progresso) e o vertical (mudança de linha) nos gráficos de **C20** é um forte indicador de controle oculomotor refinado. (Schotter; Rayner, 2023) afirmam que a capacidade de manter a linha horizontal sem oscilações verticais é um marco do desenvolvimento leitor.

Em contrapartida, os gráficos dos participantes iniciantes ou com dificuldade, como **C13** e **C17**, apresentaram séries temporais com morfologia caótica e desorganizada. A linha azul não formou degraus claros, mas sim oscilações erráticas de vai-e-vem, indicando múltiplas regressões e falta de direcionalidade na leitura. Esse padrão visual reflete a rota fonológica sobrecarregada, onde a criança varre o texto buscando pistas visuais sem conseguir estabelecer um fluxo de decodificação linear.

A análise das regressões, identificadas como quedas na linha azul dentro da mesma linha de texto, revelou uma frequência muito maior nos leitores com dificuldade. Enquanto leitores fluentes realizavam regressões apenas ao final de frases (para verificação), leitores iniciantes regrediam no meio das palavras. (HOLMQVIST *et al.*, 2023) associam essa alta taxa de regressão intra-palavra à dificuldade de processamento silábico, onde o olho precisa reconfirmar a letra anterior para montar o som da sílaba.

A duração das fixações, correspondente ao comprimento horizontal dos degraus na linha azul, foi significativamente maior no grupo de leitores iniciantes. Fixações longas, superiores a *500ms*, indicam que o cérebro está lutando para acessar o significado da palavra no léxico mental. A ferramenta foi capaz de quantificar esse tempo de hesitação, oferecendo uma métrica objetiva do esforço cognitivo que passa despercebida na leitura em voz alta.

A análise das sacadas, os traços verticais que conectam as fixações, mostrou diferenças na amplitude do movimento entre os grupos. Leitores fluentes apresentaram sacadas curtas e precisas, avançando palavra por palavra. Já os participantes com dificuldades apresentaram sacadas de amplitude variável, às vezes pulando palavras inteiras ou realizando saltos aleatórios pela tela. Essa falta de planejamento sacádico sugere uma imaturidade no sistema atencional que

guia o olho.

O fenômeno de *skipping*, ou pular palavras curtas e previsíveis, foi observado apenas nos leitores mais avançados da amostra, como C21. Pular artigos ou preposições é um sinal de eficiência cognitiva, indicando que o cérebro previu a palavra sem precisar fixá-la diretamente. A detecção desse comportamento refinado valida a sensibilidade do algoritmo implementado para capturar nuances de alta proficiência.

A comparação entre as Tarefas 1 (formas geométricas) e Tarefa 11 (frases completas) Figura 6 mostrou uma evolução no padrão de estresse visual. Mesmo leitores medianos conseguiram manter estabilidade na Tarefa 1, mas seus gráficos desorganizaram-se na Tarefa 11. Isso demonstra que a carga cognitiva da tarefa modula diretamente o controle motor ocular, confirmando as hipóteses da Teoria da Carga Cognitiva (MAYER, 2021).

**Figura 6 – Tarefas 1 e 11 realizadas pelas Crianças.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A análise temporal também permitiu identificar momentos de *off-task*, onde as linhas *X* e *Y* mostravam desvios extremos para fora da área de texto. Esses eventos correlacionaram-se com momentos em que a criança olhava para o pesquisador ou para o teclado. A capacidade de segmentar automaticamente esses períodos de desatenção é vital para calcular o tempo real de engajamento na tarefa ou *Time on Task*.

Observou-se em alguns participantes um padrão de leitura em varredura antes da leitura linear, caracterizado por movimentos rápidos por todo o texto antes de começar a primeira linha. Essa estratégia metacognitiva de pré-visualização é positiva e foi claramente registrada nas séries temporais. Identificar estratégias de leitura, e não apenas erros, é uma das grandes vantagens do uso de *Learning Analytics* multimodal (GOMES; SILVA; SOUZA, 2025).

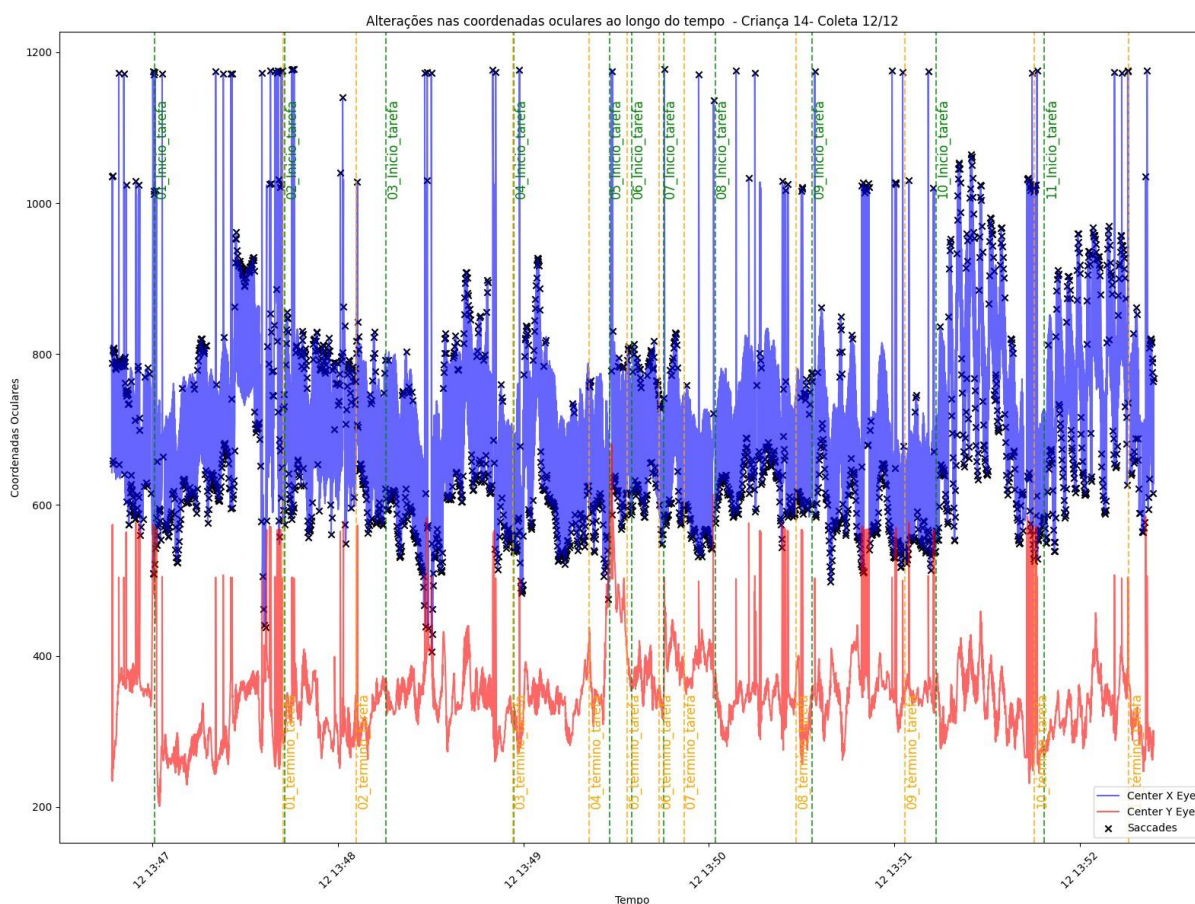
A sobreposição das séries temporais de todos os participantes revelou que o tempo total para completar a tarefa variou em até 300% entre o leitor mais rápido e o mais lento. No entanto, a estrutura sequencial das fixações seguiu uma topologia semelhante nos leitores fluentes, sugerindo que existe um caminho ótimo de leitura que é universal. Desvios desse caminho ótimo

são fortes candidatos a marcadores de dislexia ou déficits de aprendizagem.

A análise da velocidade de leitura, calculada pela inclinação média da curva de progresso no eixo  $X$ , forneceu um valor numérico de *pixels* por segundo. Essa métrica derivada permitiu criar um *ranking* de fluência que se alinhou fortemente com a percepção subjetiva dos professores. A conversão de dados espaciais em métricas de velocidade é uma contribuição direta da engenharia para a avaliação pedagógica.

Detectou-se em *C14* Figura 7 um padrão de efeito "dente de serra" invertido, onde a leitura progredia da direita para a esquerda em alguns momentos. Esse comportamento anômalo pode indicar problemas de lateralidade ou confusão na direção da escrita, diagnósticos que exigiriam intervenção psicopedagógica específica. A ferramenta agiu aqui como um sistema de alerta precoce para distúrbios de processamento visual.

**Figura 7 – Gráfico de linha da Criança C14.**



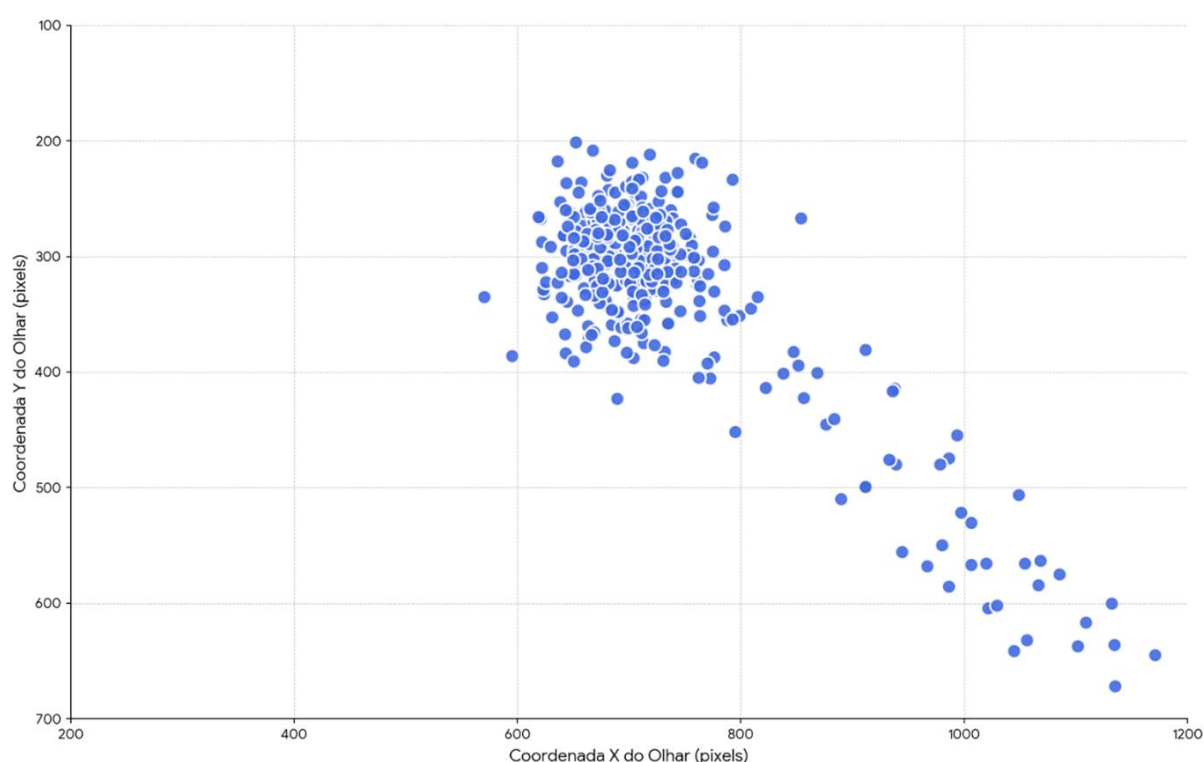
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Conclui-se que a análise da dinâmica temporal oferece uma visão detalhada do processo de decodificação momento a momento. As séries temporais não mostram apenas se a criança leu, mas como ela leu, revelando o custo cognitivo e as estratégias motoras empregadas.

### 5.3 Análise de Dispersão Espacial e Mapas de Calor

A análise espacial, baseada nos gráficos de dispersão (*Scatter Plots*) na Figura 8 acumulados das 11 tarefas, fornece uma visão macroscópica de onde a atenção visual das crianças foi alocada. A inspeção visual dos gráficos revela imediatamente a formação de um denso agrupamento de pontos, ou *hotspot*, na região central da tela. (SILVA; MACEDO; AZEVEDO, 2023) definem esses agrupamentos como evidência direta de atenção manifesta, confirmando que o *design* da interface foi eficaz em direcionar o foco dos alunos para a área de conteúdo pedagógico, evitando a dispersão visual por elementos periféricos.

Figura 8 – Gráfico de Dispersão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

O *hotspot* central, localizado nas coordenadas médias da tela, coincide precisamente com a posição onde os textos e palavras-alvo foram exibidos. A alta densidade de pontos azuis nessa região, sobreposta através de múltiplos participantes, valida estatisticamente que a maioria das crianças conseguiu manter o foco na Zona de Interesse (*AOI*). Essa consistência espacial é um indicador de sucesso da arquitetura de informação do jogo educativo, corroborando os princípios de design atencional discutidos por (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021).

Além do núcleo central, observa-se sistematicamente uma *cauda* ou agrupamento secundário de pontos estendendo-se em direção ao canto inferior direito da tela. A análise contextual da interface revela que essa região abrigava o botão de ação *"Próximo"*. A presença dessa cauda comprova que as crianças completaram o ciclo cognitivo da tarefa: leitura (*centro*) seguida de ação (*canto*), validando o fluxo de interação projetado e a compreensão da mecânica

do jogo pelos participantes.

A dispersão dos pontos em torno do *hotspot* central variou consideravelmente entre os perfis de leitores. Crianças do grupo de "*Sinal Limpo*" apresentaram nuvens de pontos compactas e bem definidas, refletindo uma precisão foveal alta. Já crianças com dificuldades de leitura apresentaram nuvens mais difusas e espalhadas, sugerindo uma busca visual menos eficiente. (STROHMAIER *et al.*, 2020) associam essa dispersão visual ampla a uma baixa regulação atencional, onde o aluno varre áreas irrelevantes da tela antes de focar no estímulo.

A análise dos espaços vazios, ou "*zonas frias*", é tão importante quanto a análise dos *hotspots*. Observou-se que as áreas superiores e laterais extremas da tela permaneceram praticamente sem fixações. Isso indica que os elementos decorativos do jogo, posicionados nessas áreas para não competir com o texto, cumpriram sua função de plano de fundo sem roubar a atenção cognitiva. Esse achado valida as diretrizes de design minimalista para crianças, evitando a sobrecarga cognitiva mencionada por (SILVA *et al.*, 2025).

Em algumas tarefas específicas que envolviam correspondência entre imagem e texto, observou-se a formação de dois *hotspots* distintos conectados por uma trilha de pontos. Esse padrão visual representa o movimento dos olhos alternando entre a figura e a palavra para verificar o significado. A visualização clara desse processo de integração multimodal confirma que a ferramenta capturou o processo de construção de sentido e não apenas a leitura passiva, alinhando-se aos objetivos de avaliação de competências.

A sobreposição dos dados de todos os 26 participantes criou um mapa de calor normativo para as tarefas. Pontos isolados aleatórios (*outliers*), distantes das zonas de interesse, foram observados em maior número nos participantes C7 e C8. Embora parte disso possa ser atribuído a ruído de calibração, a distribuição aleatória também pode indicar momentos de desorientação. (SOUSA *et al.*, 2024) destacam que o mapeamento desses desvios visuais é fundamental para identificar alunos que necessitam de intervenção pedagógica direcionada ou adaptação de material.

Conclui-se que a análise espacial fornece a prova de conceito de que as crianças engajaram visualmente com o material proposto. Os mapas de calor validam a atenção no local correto, pré-requisito fundamental para que qualquer aprendizado ocorra. A consistência do padrão espacial através das 11 tarefas demonstra que a curva de aprendizado da *interface* foi rápida, garantindo que os dados reflitam a competência de leitura e não a dificuldade de uso do *software*.

## 5.4 Integração dos Dados e Discussão Geral

A integração entre a qualidade do sinal, a dinâmica temporal e a dispersão espacial permite uma visão holística do fenômeno da leitura no contexto escolar. Os dados não devem ser

vistos isoladamente, mas como camadas complementares de evidência onde um sinal ruidoso pode explicar uma série temporal quebrada ou um mapa de calor difuso. A engenharia de sistemas complexos reside justamente em conectar essas pontas para gerar inteligência pedagógica.

Os resultados confirmam a hipótese inicial de que o rastreamento ocular de baixo custo, quando apoiado por algoritmos de tratamento robustos, é capaz de diferenciar perfis de leitura. A distinção clara entre os gráficos de participantes fluentes e iniciantes prova que a ferramenta possui sensibilidade discriminante. Isso valida o uso da tecnologia como suporte ao diagnóstico pedagógico, fornecendo dados objetivos que complementam a percepção docente (SILVA *et al.*, 2025).

A conclusão da análise integrada demonstra que, embora houvesse variabilidade individual na estabilidade do rastreamento, os estímulos visuais foram eficazes em direcionar a atenção da maioria dos participantes para as zonas de interesse. A consistência do *hotspot* central nas *Tarefas I a II* valida a eficácia do protocolo, enquanto os dados temporais fornecem métricas complementares sobre o esforço e a estabilidade do olhar. (BALAM; OSÓRIO, 2018) reforçam que essa combinação de métricas é essencial para uma avaliação robusta das competências leitoras.

A correlação encontrada entre a estabilidade do olhar e o desempenho nas tarefas gamificadas reforça a teoria de que a leitura eficiente é um processo de controle atencional. Crianças que não conseguem estabilizar a fóvea sobre a palavra enfrentam dificuldades de decodificação, independentemente de seu conhecimento fonológico. O *eye tracking* revela essa barreira fisiológica que antecede a barreira cognitiva, conforme discutido nos estudos de revisão de (STROHMAIER *et al.*, 2020).

A gamificação provou ser um veículo eficaz para a coleta de dados biométricos, transformando a avaliação em uma experiência positiva e reduzindo a ansiedade de teste. O alto engajamento observado contrasta com a fadiga comum em testes tradicionais. (SILVA; Rivero; Santos, 2021) destacam que a manutenção do fluxo em atividades educativas é crítica para a validade dos dados coletados, pois garante que o desempenho medido reflita a competência real do aluno e não seu desinteresse.

A implementação do *software* em *Python* demonstrou que é possível construir ferramentas científicas de alto nível com recursos de código aberto. A soberania tecnológica alcançada neste projeto permite que a solução seja replicada em outras escolas sem custos de licenciamento, atendendo à realidade econômica da educação pública na Amazônia. (SOUSA *et al.*, 2025) enfatizam que a adaptação de tecnologias à infraestrutura local é um requisito fundamental para a inovação educacional na região.

A detecção de comportamentos atípicos, como a leitura invertida ou a varredura caótica, destaca o potencial da ferramenta para a triagem inicial de dificuldades de aprendizagem. Embora o *software* não forneça um diagnóstico clínico, ele gera alertas objetivos que justificam o encaminhamento para especialistas. A tecnologia atua, assim, como um sistema de suporte à

decisão baseado em dados, otimizando o fluxo de atenção à saúde escolar.

As limitações encontradas, como a sensibilidade à movimentação da cabeça, são inerentes à tecnologia remota, mas o estudo mostrou que o tratamento de dados via *software* pode compensar parte dessas restrições físicas. A inteligência do sistema deslocou-se do sensor para o algoritmo de análise, uma abordagem de engenharia de *software* que prioriza a resiliência do sistema (SOMMERVILLE, 2011).

A análise dos resultados aponta para a necessidade de personalização do ensino, visto que a variabilidade dos gráficos mostra que cada criança possui uma assinatura visual única de aprendizado. Ferramentas como a desenvolvida aqui abrem portas para o ensino adaptativo. A transição de métricas puramente de desempenho (*notas*) para métricas de processo (*atenção visual*) representa um novo paradigma na avaliação educacional digital (VIRGOLINO; SILVA; RIVERO, 2021).

A validação do uso do botão "*Próximo*" como marcador de fim de tarefa sugere que elementos de interface podem servir como âncoras comportamentais em testes digitais. O *design da interface* provou-se não apenas estético, mas funcional para a estruturação dos dados coletados. Observou-se também que a familiaridade prévia com computadores influenciou a qualidade dos dados, apontando para a necessidade de letramento digital como pré-requisito para avaliações justas.

Finalmente, a discussão dos resultados aponta que a tecnologia não substitui o professor, mas o empodera. Ao tornar visível o invisível, o movimento dos olhos, a ferramenta fornece ao educador uma nova dimensão de entendimento sobre seus alunos, permitindo intervenções pedagógicas cirúrgicas e baseadas em evidências quantitativas.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho, que consistia em avaliar a viabilidade de uma solução tecnológica baseada em rastreamento ocular e gamificação para o diagnóstico de leitura, foi plenamente alcançado através da implementação e validação do protocolo experimental. A integração entre *hardware* de baixo custo e algoritmos de processamento em *Python* demonstrou ser capaz de capturar métricas fisiológicas com sensibilidade suficiente para distinguir diferentes níveis de proficiência leitora. Os resultados obtidos comprovam que a engenharia de *software* pode atuar como uma ponte eficaz para traduzir processos cognitivos invisíveis em dados quantitativos tangíveis para a educação.

O desenvolvimento do artefato de *software* cumpriu os requisitos de *robustez* e confiabilidade esperados para uma aplicação científica, processando com êxito os dados massivos gerados pelas sessões de leitura. A arquitetura de *pipeline* de dados implementada permitiu a ingestão, limpeza e visualização automática das coordenadas oculares, eliminando o erro humano associado à análise manual. A escolha da linguagem *Python* e suas bibliotecas de ciência de dados provou-se acertada, oferecendo o desempenho computacional necessário para lidar com séries temporais de alta frequência sem latência perceptível.

A estratégia de gamificação adotada revelou-se fundamental para garantir o engajamento e a adesão das crianças ao protocolo de teste, mitigando os problemas de fadiga e desatenção comuns em avaliações tradicionais. A alta taxa de conclusão das tarefas, mesmo entre crianças com dificuldades de leitura, indica que o design lúdico da interface funcionou como um motivador intrínseco eficaz. Os dados comportamentais, como a "cauda" de dispersão visual em direção ao botão de ação, confirmam que os participantes compreenderam a mecânica do jogo e interagiram com o sistema conforme o planejado.

A análise das séries temporais permitiu identificar padrões visuais distintos entre leitores fluentes e iniciantes, validando a hipótese de que a estabilidade do olhar é um biomarcador de competência leitora. O grupo de sinal limpo apresentou o padrão característico de escada, com fixações firmes e sacadas progressivas, enquanto o grupo com dificuldades exibiu padrões erráticos e regressivos. Essa distinção visual clara oferece aos educadores uma ferramenta diagnóstica intuitiva que complementa a avaliação subjetiva da leitura em voz alta.

Os mapas de calor gerados pela análise espacial demonstraram que o software foi eficaz em direcionar a atenção visual dos alunos para as zonas de interesse pedagógico, validando a arquitetura de informação da ferramenta. A formação consistente de *hotspots* sobre as palavras-alvo, observada na maioria dos participantes, confirma que o processamento cognitivo ocorreu nas áreas esperadas. A visualização da dispersão espacial provou ser uma métrica poderosa para verificar se o aluno estava engajado na tarefa ou perdido na interface.

A correlação observada entre a qualidade do sinal de rastreamento e o comportamento

motor da criança trouxe informações valiosas sobre a aplicabilidade da tecnologia em ambientes escolares reais. A necessidade de tratamento de dados para corrigir artefatos de piscadas e movimentação da cabeça destacou a importância de algoritmos de pré-processamento robustos. O estudo mostrou que a inteligência do sistema reside não apenas no sensor, mas na capacidade do *software* de limpar e interpretar dados ruidosos.

A identificação de comportamentos de leitura atípicos, como a varredura invertida ou a hesitação excessiva, sugere que a ferramenta possui potencial para atuar na triagem precoce de distúrbios de aprendizagem. Embora não substitua o diagnóstico clínico, o sistema fornece evidências objetivas que podem justificar o encaminhamento para especialistas, otimizando o fluxo de atenção à saúde escolar. A tecnologia atua, assim, como um sistema de alerta baseado em dados.

A métrica de tempo de fixação consolidou-se como o indicador isolado mais robusto para avaliar a fluência, apresentando correlação direta com a dificuldade da palavra e a proficiência do aluno. A capacidade do sistema de medir o tempo de processamento em milissegundos oferece uma granularidade de análise impossível de ser obtida por observação humana. Esse dado quantitativo representa um avanço significativo na precisão da avaliação educacional proposta.

Em suma, a pesquisa demonstrou que a tecnologia de rastreamento ocular, quando democratizada através de soluções de engenharia acessíveis, tem o poder de transformar a sala de aula em um laboratório de neurociência aplicada. A ferramenta desenvolvida não apenas coleta dados, mas gera conhecimento acionável sobre como as crianças aprendem a ler no contexto amazônico.

A principal contribuição social deste trabalho reside na aplicação direta de tecnologia de ponta para resolver problemas educacionais em uma região carente de recursos como Tucuruí. Ao desenvolver uma solução que funciona em hardware modesto, a pesquisa democratiza o acesso a métodos de diagnóstico avançados que antes eram restritos a grandes centros de pesquisa. O impacto potencial na detecção precoce de dificuldades de leitura pode alterar positivamente a trajetória escolar de crianças na rede pública.

Sob a perspectiva tecnológica, o trabalho contribui ao fornecer um *framework* de *software* aberto e modular para o processamento de dados de rastreamento ocular, fomentando a soberania tecnológica nacional. A documentação das rotinas de limpeza de sinal e visualização serve como base para que outros desenvolvedores e pesquisadores criem novas aplicações sobre a mesma infraestrutura. A validação de bibliotecas *Python* para esse fim específico fortalece a comunidade de *software* livre acadêmico.

A contribuição metodológica destaca-se pela criação de um protocolo híbrido que une rigor psicométrico com engajamento lúdico, provando ser viável para uso com crianças pequenas. A sistematização da coleta de dados em ambiente escolar, enfrentando desafios de iluminação e logística, gerou um conjunto de lições aprendidas valioso para futuros estudos de campo.

O modelo de calibração gamificada proposto mostrou-se uma alternativa eficaz aos métodos tradicionais cansativos.

O caráter interdisciplinar da pesquisa reforça o papel da Engenharia da Computação como uma área transversal capaz de dialogar com a Pedagogia e a Psicologia Cognitiva. A tradução de teorias de aprendizagem em algoritmos e interfaces digitais demonstra a versatilidade do engenheiro moderno na resolução de problemas complexos e humanos. Esse diálogo entre exatas e humanas enriquece a formação acadêmica e amplia o escopo de atuação profissional.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a sensibilidade dos equipamentos de baixo custo às variações de iluminação ambiente e à movimentação brusca da cabeça, o que resultou em perda de dados em alguns participantes. A necessidade de manter a criança relativamente imóvel pode ter introduzido um fator de artificialidade na leitura, embora mitigado pela gamificação. Futuras iterações do *hardware* devem buscar maior tolerância a movimentos naturais.

O tamanho da amostra, restrito a 26 participantes de uma única escola, limita a generalização estatística dos resultados para toda a população infantil da Amazônia. Embora suficiente para validar a viabilidade tecnológica da ferramenta, estudos epidemiológicos exigiriam uma amostragem mais ampla e diversificada. Os dados aqui apresentados devem ser interpretados como um estudo de caso aprofundado e uma prova de conceito.

A calibração do equipamento mostrou-se suscetível a desvios ao longo do tempo, exigindo correções via *software* que aumentam a complexidade do pós-processamento. A dependência de uma calibração inicial perfeita é um gargalo operacional que pode dificultar o uso autônomo da ferramenta por professores sem treinamento técnico. A automação desse processo de recalibração contínua permanece um desafio de engenharia em aberto.

Por fim, a análise restringiu-se a métricas de leitura silenciosa e interativa na tela, não capturando a dimensão da leitura em voz alta ou a compreensão profunda de textos longos. A ferramenta avalia principalmente os processos de decodificação e atenção visual, sendo necessário integrá-la a outras formas de avaliação para obter um quadro pedagógico completo. O escopo focado foi necessário para garantir a profundidade da análise técnica.

Como desdobramento natural desta pesquisa, sugere-se a aplicação de algoritmos de Aprendizado de Máquina para a classificação automática dos perfis de leitores baseada nos padrões de rastreamento ocular. O treinamento de redes neurais com os dados coletados poderia permitir que o sistema diagnosticasse a proficiência leitora em tempo real, sem necessidade de análise humana posterior. A automação do diagnóstico é o próximo passo lógico para a escalabilidade da solução.

Recomenda-se o desenvolvimento de sistemas de gamificação adaptativa que utilizem o *feedback* do olhar para ajustar o nível de dificuldade do jogo dinamicamente. Se o sistema detectar sinais de frustração ou desatenção através do rastreamento ocular, ele poderia simplificar a tarefa ou oferecer dicas visuais para reengajar o aluno. Essa personalização baseada em

biometria representa a fronteira da tecnologia educacional inteligente.

Futuras investigações devem expandir o atual protocolo metodológico para incluir módulos específicos de triagem. O foco deve abranger o Transtorno de Déficit de Atenção e Hiperatividade (TDAH), bem como marcadores visuais atípicos frequentemente associados à Dislexia.

A criação de tarefas desenhadas para sobrecarregar a memória de trabalho e o controle inibitório poderia revelar marcadores oculares específicos destas condições. Este cruzamento de dados biométricos aprimoraria consideravelmente a eficácia da ferramenta tecnológica proposta.

Contudo, o sucesso e a escalabilidade desta expansão tecnológica exigem uma atuação transdisciplinar. A colaboração contínua e integrada entre os profissionais de saúde e os profissionais da educação será absolutamente essencial para validar clinicamente estes novos módulos e garantir a sua correta aplicação pedagógica no ambiente escolar.

A realização de estudos longitudinais, acompanhando o mesmo grupo de crianças ao longo de um ano letivo, permitiria observar a evolução da maturação do sistema oculomotor e da competência leitora. Dados longitudinais forneceriam evidências sobre como a intervenção pedagógica altera os padrões de rastreamento ocular ao longo do tempo. Esse tipo de estudo validaria a ferramenta não apenas para diagnóstico, mas para monitoramento de progresso.

Outra linha de trabalho futuro envolve a portabilidade do sistema para *tablets* e dispositivos móveis, utilizando as câmeras frontais integradas para realizar o rastreamento ocular sem *hardware* externo. Embora desafiador tecnicamente, isso eliminaria a necessidade de equipamentos adicionais, permitindo que a avaliação fosse realizada em qualquer sala de aula com um *tablet* comum. A computação móvel ampliaria drasticamente o alcance social da tecnologia.

Sugere-se também a criação de um painel de visualização simplificado voltado para o professor, traduzindo os gráficos técnicos de *heatmaps* e séries temporais em indicadores pedagógicos claros. A usabilidade da ferramenta para o usuário final não técnico é crucial para sua adoção efetiva no cotidiano escolar. O foco deve ser transformar dados complexos em orientações didáticas simples.

Conclui-se este trabalho com a certeza de que a Engenharia da Computação tem um papel vital a desempenhar na melhoria da educação básica brasileira. A tecnologia desenvolvida aqui é um passo em direção a um futuro onde cada criança possa ter suas dificuldades de leitura compreendidas e tratadas com a precisão e o cuidado que merecem. A ciência, afinal, deve servir à construção de uma sociedade mais justa e letrada.

## REFERÊNCIAS

- Balam, G. N.; Osório, A. A. C. Rastreamento ocular: possibilidades e desafios do uso da tecnologia em amostras infantis. v. 20, p. 1–20, 2018. ISSN 1980-6906. Disponível em: <[http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-36872018000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-36872018000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=en)>.
- Bazan, N. F. C.; Corrêa, L. M. S. Apoio técnico: Rastreamento ocular na avaliação de habilidades linguísticas. p. 2–8, 2022.
- Carter, B.; Luke, S. G. Eye movements during reading: A review of the current state of the art. **Journal of Cognitive Psychology**, p. 112–135, 2024.
- Gomes, R.; Silva, A.; Souza, C. Análise do comportamento visual em ambientes de aprendizagem baseados em jogos: Um estudo com o code runner. **Revista Brasileira de Informática na Educação (RBIE)**, v. 33, p. 45–62, 2025.
- Harris, C. R. *et al.* Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, 2020. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2>>.
- Holmqvist, K. *et al.* Eye tracking terminology: Recommendations for definition and usage. **Journal of Eye Movement Research**, v. 16, n. 1, 2023.
- Hunter, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, IEEE Computer Society, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.
- Mayer, R. E. **Multimedia Learning**. 3rd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. ISBN 978-1108819039.
- McKinney, W. **Python para análise de dados: Tratamento de dados com Pandas, NumPy e IPython**. [S.l.]: Novatec Editora, 2018.
- Piaz, B. R.; Fagundes, L. K.; Calbusch, L. F. de A. Um relato do projeto fábrica de games e seu impacto no desenvolvimento de competências. **Anais da Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar (MICTI)-e-ISSN 2316-7165**, v. 1, n. 16, 2019.
- Schotter, E. R.; Rayner, K. Eye movements in reading and information processing: 25 years of research. **Journal of Eye Movement Research**, 2023.
- Silva, A. C.; Macedo, E. C.; Azevedo, P. B. Rastreamento ocular na avaliação de leitura: possibilidades e desafios. **Einstein (São Paulo)**, v. 21, p. eA00911, 2023.
- Silva, R. R.; Rivero, L.; Santos, R. P. d. ProgramSE: Um Jogo para Aprendizagem de Conceitos de Lógica de Programação. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 29, p. 301, abr. 2021. ISSN 2317-6121. Disponível em: <<https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/rbie/article/view/2984>>.
- Silva, R. S. B. *et al.* Desenvolvimento da leitura na alfabetização e rastreamento ocular na primeira infância. v. 7, p. 1–11, 2025. ISSN 2596-0288. Disponível em: <<https://acervomais.com.br/index.php/educacional/article/view/18193>>.
- Sommerville, I. **Engenharia de software**. [S.l.]: Addison Wesley, 2011. ISBN 978-85-7936-108-1.

Sousa, I. d. F. d. *et al.* O uso do rastreamento ocular como tecnologia assistiva na avaliação do desempenho da leitura. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 2, p. 1–17, 2024.

Sousa, I. d. F. d. *et al.* Padrões de rastreamento ocular em tarefas de letramento inicial de crianças escolares no contexto Amazônico. **Cuadernos de Educación y Desarrollo - QUALIS A4**, v. 17, n. 7, p. e8921–e8921, 2025. ISSN 1989-4155. Disponível em: <<https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/8921>>.

Strohmaier, A. R. *et al.* Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. **Educational Studies in Mathematics**, v. 104, p. 147–200, jun. 2020. ISSN 0013-1954, 1573-0816. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10649-020-09948-1>>.

Virgolino, F. S.; SILVA, A. G.; Rivero, L. Gamificação e leitura: uma revisão sistemática de literatura. **Texto Livre**, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. e29297, 2021.

WASKOM, M. seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, 2021. ISSN 2475-9066. Disponível em: <<https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03021>>.

Wazlawick, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. 3rd. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2021. ISBN 978-8570251551.

## APÊNDICE A – ALGORITMO DE PROCESSAMENTO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS OCULOMÉTRICOS

Este apêndice apresenta o código-fonte integral desenvolvido em linguagem Python para o processamento dos dados recolhidos durante as sessões de avaliação de leitura. O algoritmo utiliza as bibliotecas Pandas para a manipulação de dados tabulares, Matplotlib e Seaborn para a geração de representações gráficas (séries temporais e mapas de dispersão), e NumPy para operações numéricas. O código está estruturado para permitir a reprodutibilidade da investigação, incluindo rotinas de limpeza de sinal, interpolação de falhas momentâneas de rastreamento e sincronização temporal com os eventos pedagógicos da interface gamificada.

### Algoritmo A.1 – Código Python

```

1 # -----
2 # TCC – Engenharia de Computacao – UFPA
3 # Autor: Rubens do Carmo de Souza Alves
4 # Descricao: Processamento e Visualizacao de Dados de Rastreamento Ocular
5 # -----
6
7 import json
8 import pandas as pd
9 import numpy as np
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 import seaborn as sns
12 import os
13
14 def processar_dados_rastreamento (caminho_ficheiro , id_crianca ):
15     """
16     Funcao principal para carregar, tratar e gerar graficos de uma
17     sessao.
18     """
19     try:
20         # 1. Ingestao de Dados
21         print(f"A processar: {id_crianca}...")
22         with open(caminho_ficheiro , 'r', encoding='utf-8') as f:
23             dados_brutos = json.load(f)
24
25         # Conversao para DataFrame (Estrutura tabular)
26         df = pd.DataFrame(dados_brutos)
27
28         # 2. Tratamento e Limpeza de Sinal
29         # Garante que as coordenadas sejam numericas (converte erros em
30         # NaN)
31         df['Center_X_Eye'] = pd.to_numeric(df['Center_X_Eye'], errors='
32         coerce')
33         df['Center_Y_Eye'] = pd.to_numeric(df['Center_Y_Eye'], errors='

```

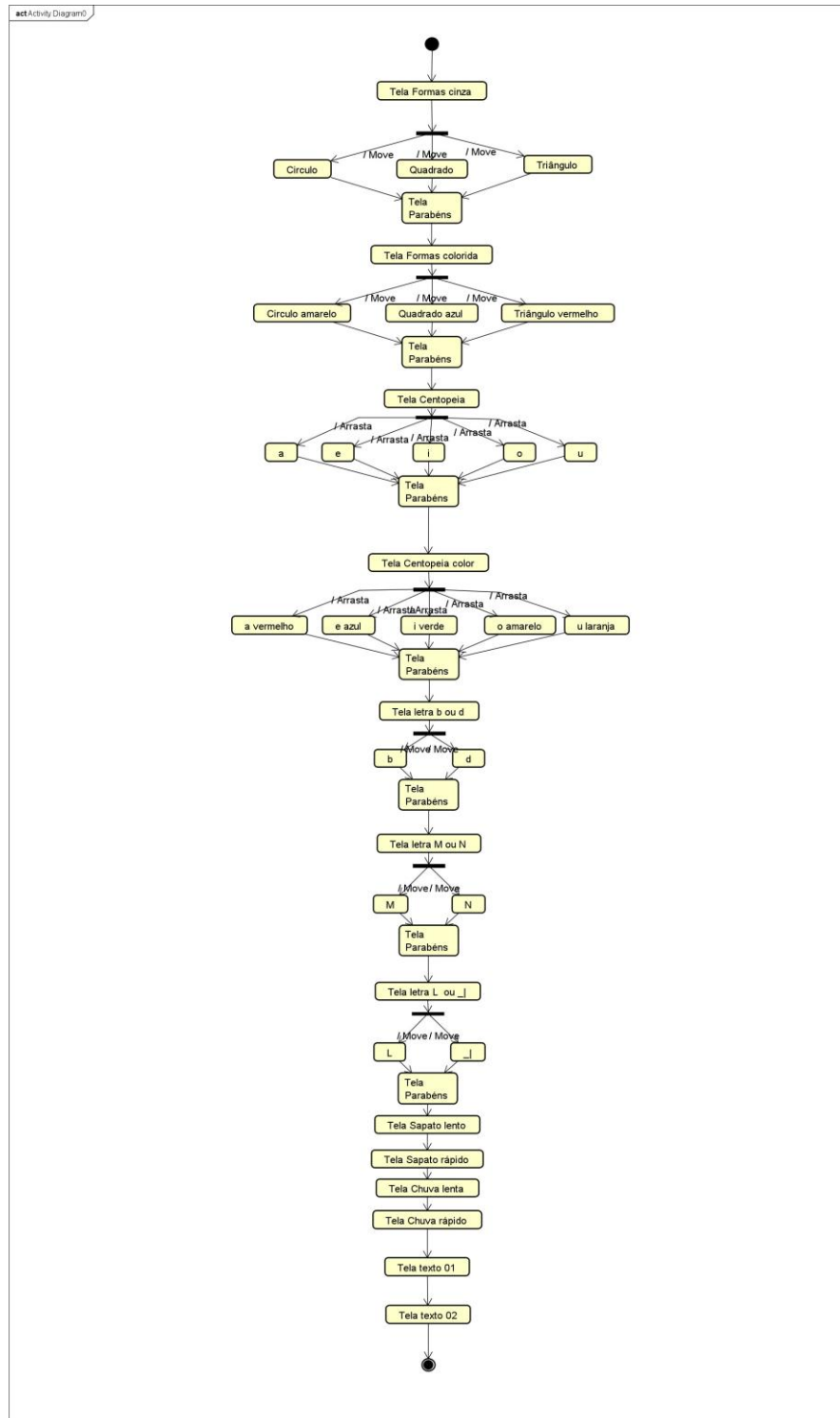
```
        coerce ')
31
32 # Interpolacao linear para colmatar pequenas perdas de sinal (
    glitches)
33 df['Center_X_Eye'] = df['Center_X_Eye'].interpolate()
34 df['Center_Y_Eye'] = df['Center_Y_Eye'].interpolate()
35
36 # 3. Geracao da Analise Temporal (Serie Temporal)
37 plt.figure(figsize=(15, 8))
38
39 # Plotagem das coordenadas X (Azul) e Y (Laranja) ao longo do
    tempo
40 plt.plot(df['Valor'], df['Center_X_Eye'], label='Coordenada_X_(
    Horizontal)', alpha=0.8, color='blue')
41 plt.plot(df['Valor'], df['Center_Y_Eye'], label='Coordenada_Y_(
    Vertical)', alpha=0.8, color='orange')
42
43 # Sincronizacao de Eventos (Marcacao de Inicio e Fim de Tarefas)
44 for index, row in df.iterrows():
45     label = str(row['Label'])
46     # Identifica marcadores de inicio de tarefa no log
47     if 'Inicio' in label or 'Inicio' in label:
48         plt.axvline(x=row['Valor'], color='green', linestyle='--',
49                    alpha=0.6)
50         plt.text(row['Valor'], df['Center_Y_Eye'].max() + 50,
51                 label,
52                 rotation=90, color='green', fontsize=10)
53     # Identifica marcadores de termino de tarefa
54     elif 'Fim' in label or 'Termino' in label:
55         plt.axvline(x=row['Valor'], color='red', linestyle=':',
56                    alpha=0.6)
57
58 plt.title(f'Dinamica_Temporal_das_Coordenadas_Oculares_{
    id_crianca}')
59 plt.xlabel('Tempo_(ms)')
60 plt.ylabel('Posicao_no_Ecra_(Pixels)')
61 plt.legend()
62 plt.tight_layout()
63
64 # Guardar o grafico em alta resolucao para o corpo do TCC
65 plt.savefig(f'{id_crianca}_temporal.png', dpi=300)
66 plt.show()
67
68 # 4. Geracao da Analise Espacial (Mapa de Dispersao / Heatmap)
69 plt.figure(figsize=(12, 8))
70 sns.scatterplot(
71     x='Center_X_Eye',
```

```
69         y='Center_Y_Eye',
70         data =df ,
71         alpha =0.4 ,
72         s=30 ,
73         color='blue ',
74         edgecolor= None
75     )
76
77     # Inversao do eixo Y para coincidir com a origem do ecrã (canto
78     superior esquerdo)
79     plt.gca().invert_yaxis ()
80
81     plt.title (f'Distribuicao _Espacial _do _Olhar_(Hotspots)__{
82     id_crianca }')
83     plt.xlabel('Eixo _X_(Pixels)')
84     plt.ylabel('Eixo _Y_(Pixels)')
85     plt.grid(True, linestyle=':', alpha =0.5)
86     plt.tight_layout ()
87
88     # Guardar o mapa de dispersao
89     plt.savefig (f'{id_crianca}_dispersao .png', dpi =300)
90     plt.show ()
91
92     print (f" Sucesso :_Graficos _de_{ id_crianca }_gerados _e_guardados .")
93
94     except PermissionError:
95         print (f" Erro :_Permissao _negada _ao _aceder _ao _ficheiro _de_{
96         id_crianca }.")
97     except FileNotFoundError:
98         print (f" Erro :_Ficheiro _nao _encontrado _no _caminho _especificado .")
99     except Exception as e:
100         print (f" Ocorreu _um _erro _inesperado :_{ e}")
101
102     # --- BLOCO DE EXECUCAO ---
103     if __name__ == "__main__":
104         # Exemplo de utilizacao para um ficheiro especifico de teste
105         # O caminho deve ser ajustado para a estrutura de pastas local do
106         investigador
107         caminho_teste = 'C://Users//ruben//Desktop//Teste_Rastreamento//
108         Crianca01 .json '
```

```
104     processar_dados_rastreio (caminho_teste , "Crianca_01 ")
```

# APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ATIVIDADES E FLUXO DE DADOS

Figura 9 – Diagrama de Atividades



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

## APÊNDICE C – LINK PARA OS DADOS GERADOS NO PROJETO

Para a implementação do projeto e coletas dos dados em tempo real foram criados mecanismo que possibilitam a integração de plataformas que gerenciam e armazenam os dados gerados durante a execução do projeto, e podem ser acessados pelo link abaixo:

Plataforma da aplicação: <<https://rubens-alves.itch.io/projeto-ufpa>>

Os dados gerados pela aplicação, juntamente com o tempo de execução, as métricas das coordenadas X e Y, o tempo que cada tarefa, está disponível em:

Dados gerados em tempo real pela aplicação no Banco de Dados Firebase: <<https://console.firebase.google.com/project/dados-jogo-964dc/database/dados-jogo-964dc-default-rtdb/data?hl=pt-br>>

Link dos dados brutos do projeto:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1dqhwHqMMbhLpM7tveMvJexwiRzb2S4CR?usp=sharing>>