

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

RAFAEL NOBRE ORSI

ANÁLISE DO OLHAR HUMANO: estudos experimentais de rastreamento ocular para
explicar padrões visuais em tarefas cognitivas

São Bernardo do Campo

2023

RAFAEL NOBRE ORSI

ANÁLISE DO OLHAR HUMANO: estudos experimentais de rastreamento ocular para explicar padrões visuais em tarefas cognitivas

Tese de Doutorado, apresentada ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Orientada pelo Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

São Bernardo do Campo

2023

Nobre Orsi, Rafael.

ANÁLISE DO OLHAR HUMANO: estudos experimentais de rastreamento ocular para explicar padrões visuais em tarefas cognitivas / Rafael Nobre Orsi. São Bernardo do Campo, 2023.
136 p. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

1. Percepção visual. 2. Reconhecimento de padrões. 3. Padrões visuais de leitura. 4. Avaliação de dor em recém-nascidos. 5. Influência de estímulos emocionais.. I. Eduardo Thomaz, Carlos, orient. II. Título.

Aluno(a): Rafael Nobre Orsi

Matrícula: 518202-7

Título do Trabalho: ANÁLISE DO OLHAR HUMANO: estudos experimentais de rastreamento ocular para explicar padrões visuais em tarefas cognitivas

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Imagens

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Data da realização da defesa: 02/06/2023

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

O aluno fez sua apresentação oral em 40 minutos, em modo virtual, e, em seguida, foi questionado pelos membros da banca. Os examinadores fizeram perguntas sobre as contribuições, os experimentos e os resultados obtidos. O aluno respondeu satisfatoriamente todas as questões levantadas. A banca elogiou o trabalho e fez sugestões de aperfeiçoamento do texto. Ao final, os examinadores parabenizaram o aluno pelas contribuições e resultados obtidos, aprovando o candidato por unanimidade.

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Prof. Dr. José Carlos de Souza Júnior

Profª Drª Maria Fernanda Branco de Almeida

Prof. Dr. Rodrigo Filev Maia

Prof. Dr. Frank Helbert Borsato

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

À minha família

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Nobre Orsi e Isaura V. de Faria Orsi, pela educação e ensinamentos fundamentais para minha formação como cidadão. À minha noiva, Aleksandras Sadzevicius, pelo apoio incondicional e incentivo para que eu pudesse estudar. E a minha família, como um todo, pela contribuição na formação dos meus valores.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz, pelos ensinamentos e aulas ministradas, pela excelente orientação na elaboração desta tese e pela confiança depositada em mim.

Aos professores do Centro Universitário FEI, pela excelência nas aulas ministradas.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa da dor, composto por professores e estudantes da UNIFESP e da FEI, pela oportunidade de participar da pesquisa sobre dor em neonatos e pela oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

Aos colegas, João Vitor Macedo Romera e Wilson Pires, pela colaboração durante a realização dos experimentos de rastreamento ocular.

A todos os voluntários que contribuíram para o desenvolvimento dos experimentos.

Aos colegas dos cursos de mestrado e doutorado, pela cooperação e compartilhamento de conhecimentos.

A FAPESP pela infraestrutura, projeto nº 2012/22377-6, a CAPES e ao Centro Universitário FEI pela bolsa de estudos de doutorado.

“Os olhos são as janelas da alma.”

William Shakespeare

RESUMO

Na área da engenharia, estudar processos cognitivos significa estudar o cérebro em funcionamento e isso requer o uso de tecnologias específicas para aquisição de sinal dinâmico em um processo que envolve estimulação, percepção e reação comportamental. Neste contexto, é comum encontrar estudos que exploram a análise de imagem com resolução temporal e espacial, como imagem por ressonância magnética funcional (fMRI) e eletroencefalografia (EEG). No entanto, também tem sido cada vez mais comum a utilização de abordagens disruptivas, como o rastreamento dos movimentos oculares para analisar a carga de trabalho mental e a interação entre a mente e os estímulos por meio de análise de padrões visuais durante a aquisição de informação. Nesta tese são apresentados três estudos experimentais guiados por um protocolo padrão para aquisição de sinal visual correspondente a percepção humana de estímulos cognitivos. Mais especificamente, é apresentada uma análise de padrões visuais em tarefas de leitura com estímulos que simulam condições de estresse visual; uma análise da atenção visual durante a avaliação de expressões faciais de dor em neonatos; e uma análise da dilatação pupilar durante a percepção de estímulos emocionais categorizados. Os resultados mostram que é possível classificar automaticamente, e com alta acurácia, os padrões visuais de leitura obtidos por processos de engenharia reversa; que o reconhecimento da dor em neonatos é uma tarefa inata e ocorre em menos de 2 segundos; e que estímulos emocionais negativos podem mobilizar mais recursos de processamento cerebral do que estímulos positivos e neutros. Acredita-se que os relatos descritos nesta tese podem ser aplicados na área clínica para realizar diagnósticos mais precisos acerca de condições de estresse visual e para fundamentar uma abordagem mais distinta e seletiva para análise de expressão facial de recém-nascidos.

Palavras-chave: Percepção visual, Rastreamento ocular, Dilatação pupilar, Reconhecimento de padrões, Padrões visuais de leitura, Avaliação de dor em recém-nascidos, Influência de estímulos emocionais.

ABSTRACT

In the engineering field, studying cognitive processes means studying the brain in operation and this requires the use of specific technologies for dynamic signal acquisition in a process that involves stimulation, perception and behavioral reaction. In this context, it is common to find studies that use image analysis with temporal and spatial resolution, such as functional magnetic resonance imaging (fMRI) and electroencephalography (EEG). However, it has also become increasingly common to use disruptive approaches, such as eye movement tracking to analyze mental workload and the interaction between mind and stimuli through analysis of visual patterns during information acquisition. In this thesis, three experimental studies guided by a standard protocol for visual signal acquisition corresponding to human perception of cognitive stimuli are presented. More specifically, an analysis of visual patterns in reading tasks with stimuli that simulate visual stress conditions; an analysis of visual attention during the evaluation of facial expressions of pain in neonates; and an analysis of pupil dilation during the perception of categorized emotional stimuli are presented. The results show that it is possible to automatically, and with high accuracy, classify visual reading patterns obtained by reverse engineering processes; that pain recognition in neonates is an innate task and occurs in less than 2 seconds; and that negative emotional stimuli can mobilize more brain processing resources than positive and neutral stimuli. It is believed that the reports described in this thesis can be applied in the clinical area to make more accurate diagnoses about conditions of visual stress and to support a more distinct and selective approach to the analysis of facial expressions in newborns.

Keywords: Visual perception, Eye tracking, Pupil dilation, Pattern recognition, Visual reading patterns, Assessment of pain in newborns, Influence of emotional stimuli.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Estrutura do processo da cognição	30
Figura 2	– Funções do sistema nervoso	34
Figura 3	– Divisões do sistema nervoso: SNC e SNP	35
Figura 4	– Vista geral das subdivisões do SNA	36
Figura 5	– Anatomia do hipotálamo	37
Figura 6	– Via neural da visão	39
Figura 7	– Estrutura interna do olho	40
Figura 8	– Anatomia microscópica da retina	41
Figura 9	– Vias visuais para o cérebro e campos visuais, vista inferior	43
Figura 10	– Áreas envolvidas no processamento de informação visual	44
Figura 11	– Vias visuais através das áreas de associação multimodais	45
Figura 12	– Músculos extrínsecos do olho	46
Figura 13	– Constrição e dilatação da pupila	47
Figura 14	– Equipamento de rastreamento ocular - Tobii TX300	50
Figura 15	– Exemplo de posicionamento de um indivíduo em frente ao equipamento	51
Figura 16	– Reflexo do LED infravermelho na córnea	51
Figura 17	– Método de diferença de imagem	52
Figura 18	– Parâmetros para aquisição do sinal	53
Figura 19	– Exemplo de matriz de pontos de um mapa de calor	55
Figura 20	– Exemplo de mapa de calor com 10 fixações	55
Figura 21	– Exemplo de mapa de calor com 24 fixações	55
Figura 22	– Diagrama da aplicação experimental do método PCA + MLDA	60
Figura 23	– Exemplo de teste de validação cruzada com método <i>k-fold</i>	61
Figura 24	– Distorção visual com efeito Blurry	66
Figura 25	– Distorção visual com efeito Floating	66
Figura 26	– Distorção visual com efeito Halo	66
Figura 27	– Distorção visual com efeito Ripple	67
Figura 28	– Distorção visual com efeito Rivers	67
Figura 29	– Distorção visual com efeito SeeSaws	67
Figura 30	– Distorção visual com efeito Shaky ou Shakey	68

Figura 31 – Distorção visual com efeito Stars War	68
Figura 32 – Distorção visual com efeito Swirl	68
Figura 33 – Distorção visual com efeito Washout	69
Figura 34 – Distorção visual com efeito Wave ou Wavy	69
Figura 35 – Efeitos codificados	75
Figura 36 – Simulador: tela inicial	76
Figura 37 – Simulador: carregando uma imagem	76
Figura 38 – Simulador: ajuste do tamanho e da rotação	76
Figura 39 – Simulador: seleção das distorções visuais	77
Figura 40 – Simulador: armazenamento do efeito gerado	77
Figura 41 – Distorção visual simulada na tela do equipamento de rastreamento ocular .	77
Figura 42 – Sinal completo, com todas as fixações e sacadas	79
Figura 43 – Fixações iniciais e finais	80
Figura 44 – Sinal filtrado, sem fixações iniciais e finais	81
Figura 45 – Comparação dos parâmetros de leitura sem filtro e filtrados	84
Figura 46 – Progressões do olhar	85
Figura 47 – Regressões do olhar	85
Figura 48 – Pré-processamento do sinal de entrada.	86
Figura 49 – Projeção dos conjuntos de dados 1 e 2 nos hiperplanos discriminantes . . .	88
Figura 50 – Projeção do conjunto de dados 3 nos hiperplanos discriminantes	88
Figura 51 – Estímulos visuais	94
Figura 52 – Design experimental e simulação da configuração implementada	96
Figura 53 – Etapas do pré-processamento do sinal pupilar	97
Figura 54 – Agrupamento do sinal pupilar por estímulo	98
Figura 55 – Desempenho dos voluntários na tarefas de avaliação da dor	99
Figura 56 – Variação do diâmetro pupilar	100
Figura 57 – Análise e quantificação da área de atenção visual de um especialista que respondeu adequadamente todas as avaliações	101
Figura 58 – Análise e quantificação da área de atenção visual de um pai de recém-nascido que respondeu adequadamente todas as avaliações	102
Figura 59 – Comparação do rastreamento ocular por segundo	103
Figura 60 – Expressões faciais das emoções básicas.	109

Figura 61 – Etapas do pré-processamento do sinal	115
Figura 62 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente positivo . .	116
Figura 63 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente neutro . . .	116
Figura 64 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente negativo .	116
Figura 65 – Sinal pupilar médio por estímulo	117
Figura 66 – Análise do sinal pupilar médio após remoção da primeiro segundo de gravação	118
Figura 67 – Correlação do sinal pupilar médio entre classes	119
Figura 68 – Correlação do sinal pupilar médio intraclasse	119
Figura 69 – Correlação do sinal pupilar médio entre todos estímulos	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Relação de estímulo aos músculos da pupila.	49
Tabela 2	–	Desempenho do classificador	87
Tabela 3	–	Descrição das imagens positivas usadas como estímulo	113
Tabela 4	–	Descrição das imagens neutras usadas como estímulo	113
Tabela 5	–	Descrição das imagens negativas usadas como estímulo	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVO	26
1.2	CONTRIBUIÇÕES	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	29
2.1	FUNDAMENTOS DA COGNIÇÃO HUMANA	29
2.1.1	Cognição	29
2.1.2	Percepção e Atenção	30
2.1.3	Estado de Vigília e Estado de Atenção	31
2.2	FUNDAMENTOS DO SISTEMA NERVOSO	33
2.2.1	Sistema nervoso	33
2.2.2	Funções do sistema nervoso	33
2.2.3	Divisões básicas do sistema nervoso	34
2.2.4	Divisão autônoma do sistema nervoso	35
2.2.5	Hipotálamo	37
2.3	FUNDAMENTOS DA VISÃO	38
2.3.1	Recepção	39
2.3.2	Distribuição	42
2.3.3	Processamento	43
2.3.4	Movimento ocular	46
2.3.5	Controle do diâmetro da pupila	48
2.3.6	Análise dos movimentos oculares	49
2.4	RASTREAMENTO DOS MOVIMENTOS OCULARES	50
2.4.1	Equipamento para rastreamento ocular	50
2.4.2	Método de rastreamento ocular	51
2.5	PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA AQUISIÇÃO DO SINAL VISUAL	53
2.6	PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL	54
2.7	RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE PADRÕES	56
2.7.1	Análise de Componentes Principais (PCA)	57
2.7.2	Análise de Discriminantes Lineares (LDA)	57
2.7.3	Análise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA)	59

2.7.4	Teste de desempenho	60
3	ANÁLISE DE PADRÕES VISUAIS EM TAREFAS DE LEITURA	63
3.1	BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO	63
3.1.1	ESTRESSE VISUAL	63
3.1.1.1	<i>Distorções visuais</i>	<i>65</i>
3.2	TRABALHOS RELACIONADOS	65
3.2.1	Considerações gerais	72
3.3	EXPERIMENTO	73
3.3.1	Projeto experimental	73
3.4	MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.4.1	Estímulo visual	74
3.4.2	Simulador de distorções visuais	75
3.4.3	Participantes	78
3.4.4	Protocolo experimental	78
3.4.5	Aquisição do sinal	78
3.4.5.1	<i>Reprodutibilidade experimental</i>	<i>79</i>
3.4.6	Análise de dados	79
3.4.7	Reconhecimento de padrão	86
3.5	RESULTADOS	87
3.5.1	Reprodutibilidade dos resultados	89
3.6	DISCUSSÃO	89
3.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	90
4	ANÁLISE DA ATENÇÃO VISUAL DURANTE A AVALIAÇÃO DE EX-	
	PRESSÕES FACIAIS DE DOR EM NEONATOS	91
4.1	BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO	91
4.2	TRABALHOS RELACIONADOS	92
4.3	EXPERIMENTO	93
4.3.1	Projeto experimental	94
4.4	MATERIAIS E MÉTODOS	94
4.4.1	Estímulo visual	94
4.4.2	Participantes	95
4.4.3	Aquisição do sinal	95
4.4.3.1	<i>Reprodutibilidade experimental</i>	<i>96</i>

4.4.4	Processamento do sinal pupilar	96
4.4.5	Classificação do desempenho na avaliação da dor	98
4.5	RESULTADOS	99
4.5.1	Reprodutibilidade dos resultados	103
4.6	DISCUSSÃO	104
4.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	105
5	ANÁLISE DA DILATAÇÃO PUPILAR DURANTE A PERCEPÇÃO DE ESTÍMULOS EMOCIONAIS CATEGORIZADOS	107
5.1	BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO	107
5.2	TRABALHOS RELACIONADOS	108
5.3	EXPERIMENTO	112
5.4	MATERIAIS E MÉTODOS	112
5.4.1	Estímulos visuais	112
5.4.2	Participantes	114
5.4.3	Aquisição de sinal	114
5.4.3.1	<i>Reprodutibilidade experimental</i>	114
5.4.4	Pré-processamento do sinal	114
5.5	RESULTADOS	116
5.5.1	Reprodutibilidade dos resultados	120
5.6	DISCUSSÃO	121
5.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	121
6	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

Ao refletir sobre os nossos comportamentos involuntários é possível perceber o quão intrigante é a cognição humana. Muitas das nossas ações são planejadas e executadas de forma consciente, mas há uma relação entre a mente e o mundo ao nosso redor que, inconscientemente, faz nosso corpo trabalhar constantemente. Por exemplo, a atividade cerebral de uma pessoa com os olhos fechados é diferente da atividade cerebral quando os olhos estão abertos (MARX et al., 2004) e isso ocorre porque cerca de 70% das células sensitivas do corpo estão presentes nos olhos (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014) e porque a visão está associada a processos cognitivos que são excitados instantaneamente ao abrirmos os olhos (ROMEI et al., 2008).

As teorias comportamentais indicam que nossos hábitos geralmente são inconscientes, ainda que sejam iniciados de maneira voluntária (NEWELL; SHANKS, 2014; CUSTERS; AARTS, 2010). Por exemplo, quando temos um texto a nossa frente é muito comum começarmos a ler, mesmo que sem querer, pois, trata-se de uma habilidade humana muito requerida para ter acesso à informação e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de outras habilidades e conhecimentos (SOLÉ, 2015).

No entanto, o nosso conhecimento sobre como os olhos, em particular, capturam essas informações é menos estabelecido. Nós possuímos uma vaga ideia de que os olhos se movimentam da esquerda para a direita durante a leitura de textos em português, mas intuitivamente não sabemos dizer se fixamos o olhar em cada palavra ou sílaba, se reconhecemos as letras mais facilmente olhando pela parte de cima ou pela parte de baixo, por exemplo.

A complexidade deste problema aumenta a medida que incluímos outros estímulos sob a mesma perspectiva, pois normalmente não é possível explicar de forma específica e quantificada como reconhecemos expressões faciais de dor ou como a intensidade emocional de um estímulo visual afeta a nossa forma de pensar.

Na verdade, pode-se dizer que a percepção visual é uma experiência subjetiva que não pode ser comparada se não for por meio de um processo de engenharia reversa, pois, embora a maioria das pessoas possa reconhecer o mesmo objeto, a percepção de luminosidade, tonalidades e texturas pode ser distinta de pessoa para pessoa (CORNSWEET, 2012).

Neste contexto, enquanto fazemos inferências de forma consciente, a aquisição da informação e algumas associações podem ocorrer de forma inconsciente, o que reforça a ideia de que observar os movimentos oculares pode ser uma abordagem promissora para obter parâmetros acerca da comunicação do ser humano com o meio ambiente.

Os primeiros estudos que utilizaram o rastreamento ocular já demonstravam ser um método válido para observar a alocação da atenção visual em tarefas cognitivas (WADE; TATLER et al., 2005) e, desde então, esse método tem sido amplamente adotado em experimentos que buscam compreender como o cérebro processa informações visuais (DUCHOWSKI, 2017; CARTER; LUKE, 2020).

Em geral, trata-se de uma abordagem não invasiva que permite analisar uma sequência de padrões de olhar correspondentes a processos cognitivos subjacentes à atenção, aprendizado e memória que moldam a maneira como vemos o mundo. Por exemplo, ao olhar uma foto de um ambiente qualquer, como uma sala de aula, você terá uma ideia de como os móveis devem ser dispostos e se a cena não corresponder às suas expectativas, você provavelmente ficará surpreso e visualmente irá procurar obter outras informações enquanto sua “semântica de cena” é violada (DELAITRE et al., 2012). Isso ocorre porque aquele ambiente talvez não confira com as suas regras de como uma sala de aula devia ser para você.

Esse comportamento representa uma cascata de eventos que exemplifica o escopo geral desta tese, que é analisar os movimentos oculares de um sujeito após apresentar-lhe um estímulo visual que provoque reações fisiológicas impulsionadas por processos cognitivos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal desta tese é analisar as características dos movimentos oculares correspondentes a tarefas cognitivas provocadas por estímulos visuais. Mais especificamente, pretende-se:

- a) propor e realizar experimentos uniformizados de rastreamento ocular para coletar sinal correspondente a operações cognitivas;
- b) analisar os padrões visuais durante tarefas de leitura e implementar modelos estatísticos de classificação para reconhecer padrões de leitura automaticamente;
- c) analisar a variação do diâmetro pupilar durante tarefas de reconhecimento de expressões faciais de dor em neonatos;
- d) analisar a variação do diâmetro pupilar durante a observação de estímulos emocionalmente categorizados.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

A maior parte da metodologia, dos experimentos e dos resultados desta tese foi submetida ou publicada como artigos nas seguintes contribuições científicas:

- a) ORSI, Rafael. Nobre; THOMAZ, Carlos Eduardo. A reverse engineering framework to detect visual stress conditions that affect reading ability. **Multimedia Tools and Applications** (Submetido em 29 set. 2022, em revisão)
- b) ORSI, Rafael Nobre; CARLINI, Lucas Pereira; HEIDERICH, Tatiany Marcondes; DA SILVA, Gisele Valério Teixeira; SOARES, Juliana do Carmo Azevedo; BALDA, Rita de Cássia Xavier; BARROS, Marina Carvalho de Moraes; GUINSBURG, RUTH; THOMAZ, Carlos Eduardo. Visual attention during neonatal pain assessment: A 2-s exposure to a facial expression is sufficient. **Electronics Letters**, v. 59, p. 1-3, 2023.
- c) ORSI, Rafael. Nobre; ROMERA, João. Victor. Macedo. ; THOMAZ, Carlos. Eduardo. Simulador de distorções visuais baseado na Síndrome de Mears Irlen. In: **Science Meets Business**, 2020, São Paulo, SciBiz 2020.
- d) ORSI, Rafael Nobre; FABBRO, Davi Araujo Dal; THOMAZ, Carlos Eduardo. Eye-Tracking Data Analysis During Cognitive Task. **Communications in Computer and Information Science**. 2ed.: Springer International Publishing, 2019, v. 1068, p. 200-219.
- e) ORSI, Rafael. Nobre; THOMAZ, Carlos Eduardo. Classificação automática do desempenho humano em tarefas cognitivas por meio da mensuração do diâmetro pupilar. In: **Congresso Brasileiro de Automática**, 2018, João Pessoa, CBA 2018.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está dividida em 6 capítulos. No capítulo 1 foi apresentada a introdução e os objetivos. No capítulo 2, são descritos os conceitos fundamentais e os métodos dos principais tópicos que compõem o escopo desta tese. No capítulo 3, é apresentado um estudo sobre a Síndrome de Irlen, que contempla uma análise de padrões visuais de leitura. No capítulo 4, é apresentado um estudo sobre atenção visual durante avaliação de expressões faciais de dor em neonatos. No capítulo 5 é descrito um estudo sobre a dilatação pupilar durante a percepção de estímulos emocionalmente categorizados. E, no capítulo 6, tem-se a conclusão desta tese e a sugestão de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais que fornecem sustentação para as atividades desenvolvidas nesta tese. Na primeira seção, é apresentada uma visão geral sobre a cognição humana, e na segunda seção são abordadas as partes do sistema nervoso, essenciais para compreender os processos cognitivos. Na terceira seção, são descritas as características da visão humana e os componentes do sistema nervoso que são sensíveis aos processos cognitivos. Na quarta seção, são apresentados os métodos utilizados e implementados computacionalmente para medir os movimentos oculares. Na quinta seção, há uma descrição do protocolo para aquisição de sinal visual, e na sexta seção são apresentados os métodos implementados de pré-processamento deste sinal. Por fim, na sétima seção é descrito um arcabouço estatístico para o reconhecimento automático de padrões visuais.

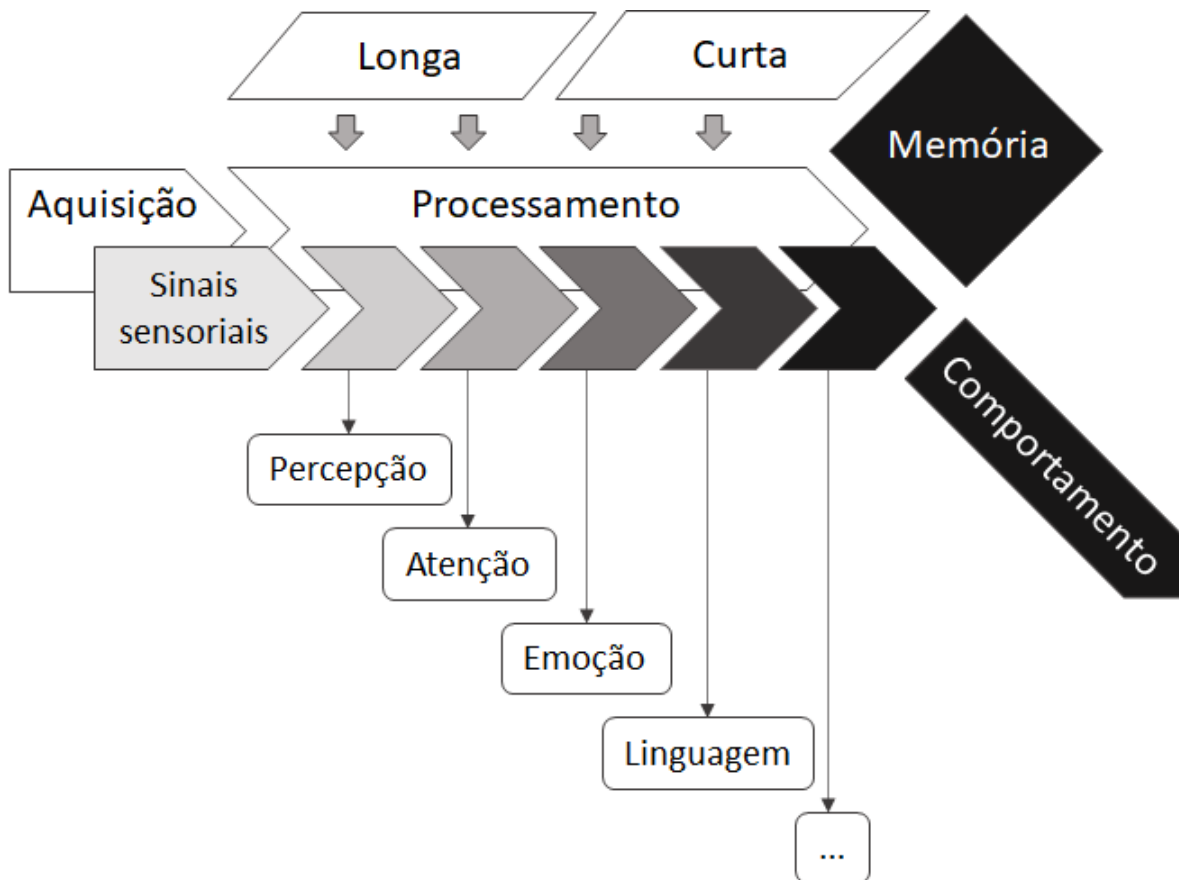
2.1 FUNDAMENTOS DA COGNIÇÃO HUMANA

Nesta seção, são descritos os conceitos introdutórios sobre a cognição humana, sobre como funcionam algumas operações mentais e a relação dessas operações com as habilidades do sujeito. As principais referências utilizadas nesta fundamentação, são: (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014; GUERRA; COZENZA, 2011; KAHNEMAN, 2011; KANDEL et al., 2014; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014)

2.1.1 Cognição

As habilidades de pensar, imaginar, aprender e tomar decisões são questões intrigantes sobre a natureza humana que inspiram inúmeras discussões sobre o conhecimento do próprio ser em uma relação entre a mente humana e o mundo que não é restrita a um único domínio. E, portanto, é um assunto complexo e multifacetado que tem sido explorado por filósofos, cientistas e psicólogos ao longo da história. Em geral, há um consenso de que a cognição é um processo que envolve a aquisição, o armazenamento, o uso e a transformação de informações através de diversas operações mentais, como percepção, atenção, memória, emoção, linguagem, raciocínio, julgamento, entre outras (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). A Figura 1 apresenta um diagrama estrutural do processo de cognição.

Figura 1 – Estrutura do processo da cognição



Fonte: Autor

Legenda: Diagrama hipotético da estrutura do processo de cognição

2.1.2 Percepção e Atenção

O corpo humano recebe vários estímulos do meio ambiente por meio de seus órgãos sensoriais, que são transmitidos como sinais ao sistema nervoso central por meio de bilhões de células nervosas e trilhões de conexões sinápticas. No entanto, há um processo cognitivo fundamental que nos permite focar apenas no que é essencialmente importante (GUERRA; COZENZA, 2011).

Esse processo realizado pelo cérebro, que seleciona os sinais sensoriais importantes para o indivíduo, é chamado de percepção, que, como o nome sugere, destaca os sinais percebidos pela consciência e conseqüentemente alimenta o processo cognitivo, que armazena parte das informações para futuras referências e transforma a outra parte em respostas comportamentais imediatas (KANDEL et al., 2014)

Os conceitos de percepção e atenção, embora possuam conotação semelhante, são processos distintos e complementares. A função da **percepção** é selecionar os sinais sensoriais

para processamento e a função da **atenção** é concentrar energia para processá-los (GUERRA; COZENZA, 2011; KANDEL et al., 2014).

2.1.3 Estado de Vigília e Estado de Atenção

Segundo Kahneman (2011), existem dois estados mentais e fisiológicos que ocorrem no cérebro humano: o estado de vigília que mantém as funções do corpo de forma automatizada sem realizar percepções de controle voluntário; e o estado de atenção que é ativado quando é necessário concentrar energia em atividades mentais complexas, como solucionar problemas, tomar decisões, filosofar, realizar cálculos complexos e diversas outras atividades que requisitam ações voluntárias e conscientes.

O estado de vigília é caracterizado por operações mentais normalmente involuntárias e até inconscientes, mas com capacidade de processamento altamente complexo fornecendo respostas muito rápidas e dinâmicas. No entanto, entende-se que são operações que exijam pouco ou nenhum esforço mental, limitando seu alcance em produzir respostas automáticas para tudo. O estado de vigília inclui habilidades inatas, como perceber o mundo ao nosso redor, evitar perdas e sentir medo, assim como habilidades que se tornam rápidas e automáticas devido à prática prolongada, formando um conjunto de operações programadas que rapidamente processam nossas percepções e convertem em comportamento, como reconhecer pessoas e expressões faciais, detectar hostilidade em uma voz, compreender expressões idiomáticas, ler placas e anúncios, calcular a possibilidade de atravessar a rua sem ser atropelado, andar de bicicleta e demais atividades do dia a dia como tomar banho e se alimentar (KAHNEMAN, 2011).

O estado de atenção é caracterizado por operações voluntárias, que direcionam e concentram energia em tarefas cognitivas conscientes, em que o indivíduo assume o controle das ações cognitivas cadenciando o pensamento de forma a raciocinar, planejar e fazer escolhas acerca de suas ações, como monitorar seu próprio comportamento em eventos sociais, concentrar-se na voz de uma determinada pessoa em uma sala cheia e barulhenta, contar a ocorrência de vogais em uma página de texto, relatar um fato episódico, verificar a validade lógica de um argumento e diversas outras atividades que exijam concentração do sujeito. As operações do estado de atenção são processos lentos que resistem às respostas por impulso do estado automático, processando informações de forma laboriosa, construindo pensamentos ordenados e em etapas sequenciais. Suas operações são altamente diversificadas, mas possuem uma característica em

comum: todas exigem atenção e são instantaneamente interrompidas quando a atenção é desviada (KAHNEMAN, 2011).

Embora sejam processos distintos e que se modificam conforme as nossas necessidades, o estado de vigília nunca cessa, o que faz com que o estado de atenção gere acúmulo de trabalho, aumentando a intensidade de processamento do cérebro durante suas operações (KAHNEMAN, 2011). Desta forma, os processos do estado de atenção ficam limitados a capacidade de processamento do cérebro e as vias neurais envolvidas, que normalmente não permitem a execução simultânea de duas tarefas complexas que exigem concentração, como calcular o produto de "43 x 89" ao mesmo tempo em que se compara o custo-benefício entre dois equipamentos de marca distintas. Nestas situações, certamente perderíamos a concentração e falharíamos em ambas as atividades, pois a intensidade de processamento necessária atingiria o limite da capacidade cognitiva em um determinado momento, o que interromperia imediatamente o estado de atenção (KAHNEMAN, 2011; GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

O fato de não conseguirmos nos concentrar em duas tarefas complexas ao mesmo tempo não acontece apenas por serem tarefas distintas. Também pode acontecer com uma única tarefa que se estende por um longo período. Isso ocorre porque há um mecanismo que tenta constantemente conservar energia e reduzir o nível de processamento cessando o estado de atenção imediatamente após a resolução de uma tarefa ou, se não conseguirmos resolvê-la, interrompendo o processo para priorizar a conservação de energia. Esse mecanismo é descrito por Kahneman (2011) como **Lei do Menor Esforço**, que controla efetivamente o estado atencional conservando o máximo de energia possível e permitindo sua atuação apenas em situações de extrema necessidade, que ocorrem apenas quando estamos diante de problemas que estão além da capacidade do estado automático e requerem processos especializados do estado consciente.

Segundo Kahneman (2011), a lei do menor esforço indica que há muitas maneiras de atingir o mesmo objetivo e que as pessoas tendem a escolher o curso de ação menos exigente. Assim, na economia da ação, o esforço é um custo, e sabendo que o grau de esforço mental varia de acordo com as habilidades do sujeito, podemos dizer que quanto maior a intensidade do esforço mental, menos eficiente é o processo cognitivo (RYPMA et al., 2006; KAHNEMAN, 2011).

Desta forma, considerando que a capacidade cognitiva é inversamente proporcional ao consumo de energia e que quanto mais eficiente for a forma de pensar menos energia será empregada na operação mental, pode-se por meio de experimentos modelados comparar a capacidade cognitiva entre indivíduos medindo o esforço mental aplicado na resolução de tarefas.

2.2 FUNDAMENTOS DO SISTEMA NERVOSO

Nesta seção, é apresentada uma visão geral sobre o funcionamento do sistema de controle e comunicação do corpo humano. Serão abordados os aspectos fundamentais da anatomia do sistema nervoso, como a composição do tecido nervoso, a função das células neurais, a natureza dos sinais biológicos, o processo de comunicação intercelular, os diferentes tipos de circuitos neurais e as divisões anatômicas e funcionais de cada parte do sistema nervoso. As principais referências utilizadas nesta fundamentação, são: (KANDEL et al., 2014; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014)

2.2.1 Sistema nervoso

O sistema nervoso é constituído por neurônios, que são células nervosas, responsáveis por transmitir informações através de sinais elétricos e químicos. Sua função é integrar e controlar todos os outros sistemas fisiológicos no corpo humano. É por meio dessas células que ocorrem todos os processos cognitivos, desde a percepção de um estímulo até uma resposta comportamental (KANDEL et al., 2014; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

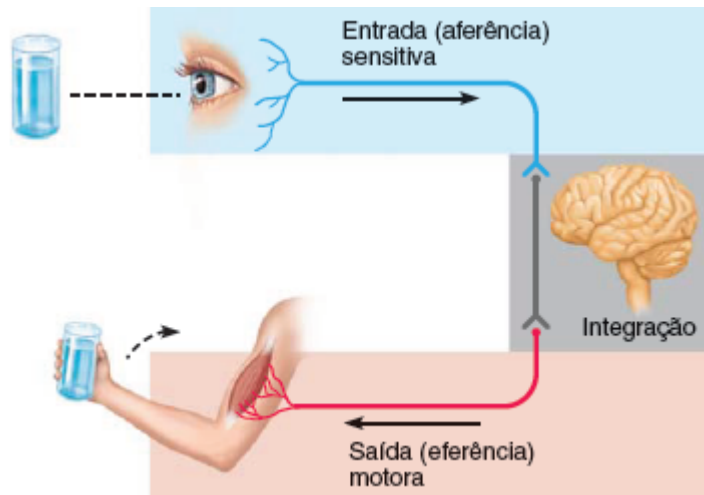
2.2.2 Funções do sistema nervoso

O sistema nervoso possui três funções: a entrada sensitiva chamada de **aferência**, a conexão entre neurônios e processamento chamado de **integração** e a saída motora chamada de **eferência**. Na Figura 2 é apresentada um exemplo dessas funções.

A aferência é a função de entrada de informação ao sistema nervoso e ocorre por meio de um processo que combina diversos estímulos produzidos por receptores sensíveis, capazes de detectar mudanças dentro e fora do corpo.

A integração neural é a capacidade do sistema nervoso de processar e interpretar as informações recebidas pelos neurônios através da aferência. Essa função é essencial para a tomada de decisões e elaboração de respostas apropriadas para cada estímulo ou situação. A integração neural ocorre em diversas áreas do sistema nervoso e envolve a interação entre diferentes neurônios e regiões cerebrais, permitindo a interpretação e análise das informações sensoriais, além da coordenação de respostas motoras e hormonais.

Figura 2 – Funções do sistema nervoso



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: Exemplo de entrada de sinal no sistema nervoso por meio de um receptor sensitivo e de saída por um órgão motor

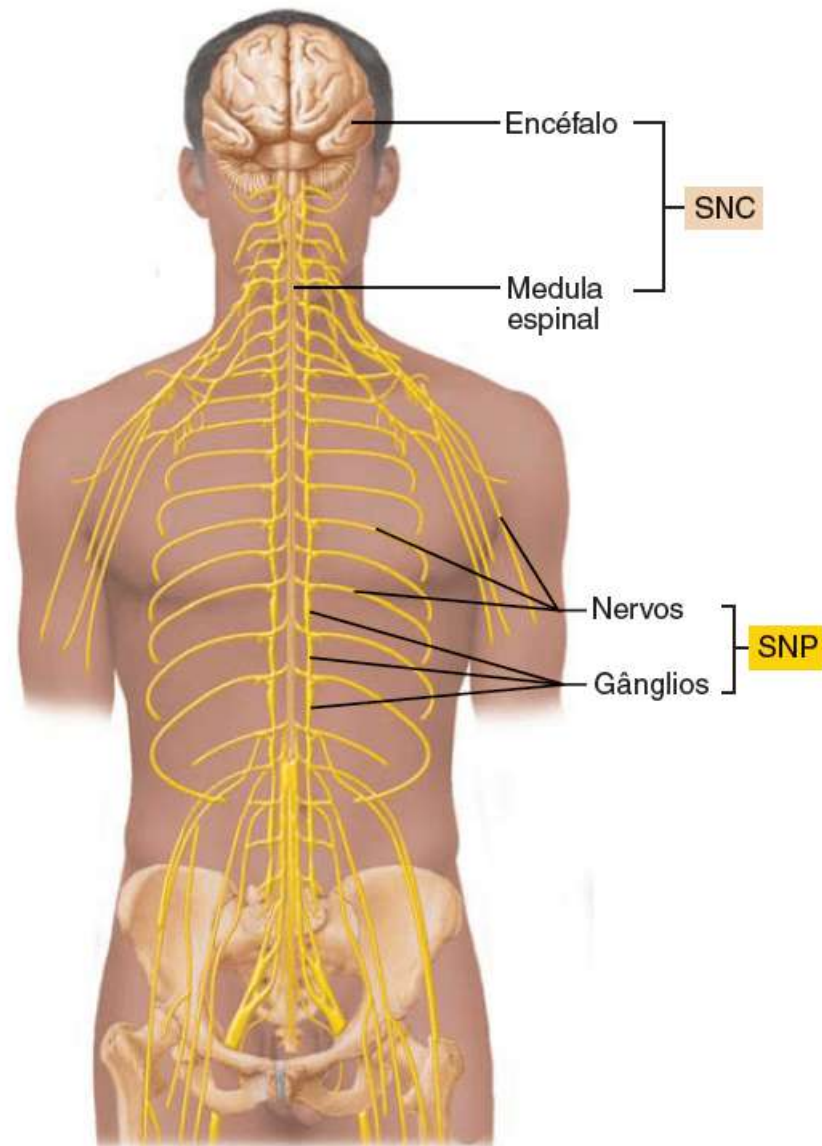
E a função de eferência corresponde à saída do processo de tomada de decisão, que resulta na ativação dos órgãos efetores, compostos por músculos e glândulas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.2.3 Divisões básicas do sistema nervoso

O sistema nervoso é dividido em duas grandes partes: o sistema nervoso central (SNC) e o sistema nervoso periférico (SNP). O SNC é composto pelo cérebro e pela medula espinhal, que são responsáveis por processar e interpretar as informações sensoriais, controlar a atividade motora e realizar funções cognitivas e emocionais mais complexas. O SNP é formado pelos nervos e gânglios nervosos, que conectam o SNC ao resto do corpo (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; KANDEL et al., 2014; PURVES et al., 2010). Na Figura 3 é apresentada esta divisão.

O SNP apresenta quatro subdivisões: a sensitiva somática (SS), responsável pela inervação sensorial do tubo externo, que inclui pele, parede corporal e membros; a sensitiva visceral (SV), responsável pela inervação sensorial das vísceras; a motora somática (MS), que controla a inervação motora do tubo externo, composta pelos músculos esqueléticos; e a motora visceral (MV), também conhecida como sistema nervoso autônomo (SNA), responsável pela inervação motora involuntária do tubo interno, que inclui músculo liso, músculo cardíaco, glândulas e algumas estruturas do tubo externo, como músculo liso nos vasos sanguíneos e glândulas doríferas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Figura 3 – Divisões do sistema nervoso: SNC e SNP



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: Nesta figura é apresentada a localização e identificação das partes do SNC (encéfalo e medula espinal) e do SNP (nervos e gânglios)

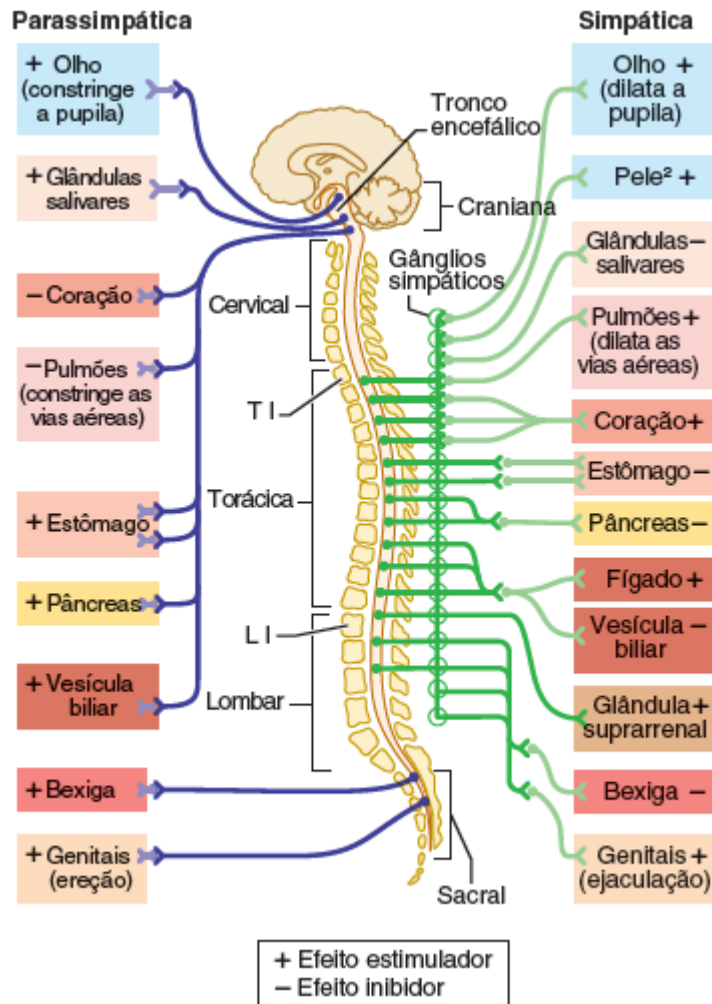
2.2.4 Divisão autônoma do sistema nervoso

O SNA é formado por neurônios motores que inervam a musculatura lisa, regulando funções viscerais como pressão arterial, frequência cardíaca, sistema digestivo, sistema respiratório e outras funções essenciais para manter o funcionamento do corpo que não exigem controle consciente do próprio ser (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

O SNA é dividido em duas partes, a parte simpática e a parte parassimpática, ambas formadas por uma cadeia de neurônios motores que inervam o mesmo órgão visceral, mas que provocam efeitos opostos. Enquanto uma divisão estimula os órgãos efetores, a outra divisão

inibe essas ações. Na Figura 4, é ilustrada uma visão geral das subdivisões do SNA e as ações de estímulo e inibição mobilizadas por cada divisão.

Figura 4 – Vista geral das subdivisões do SNA



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: A imagem ilustra os efeitos das partes simpática e parassimpática em cada órgão e a diferença anatômica do local de origem e comprimento de seus nervos

O sistema nervoso parassimpático é responsável por promover ações para o corpo descansar, relaxar e recuperar, mantendo as frequências cardíaca e respiratória em níveis baixos, economizando energia corporal e direcionando esforços somente para funções vitais, como a digestão e eliminação de resíduos metabólicos (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

O sistema nervoso simpático, por sua vez, é responsável por mobilizar o corpo em atividades vigorosas, como enfrentar situações perigosas, realizar atividades físicas intensas ou resolver tarefas cognitivas complexas. As ações do sistema nervoso simpático são evidenciadas pelo aumento da frequência cardíaca e respiratória, fornecendo mais sangue e oxigênio para

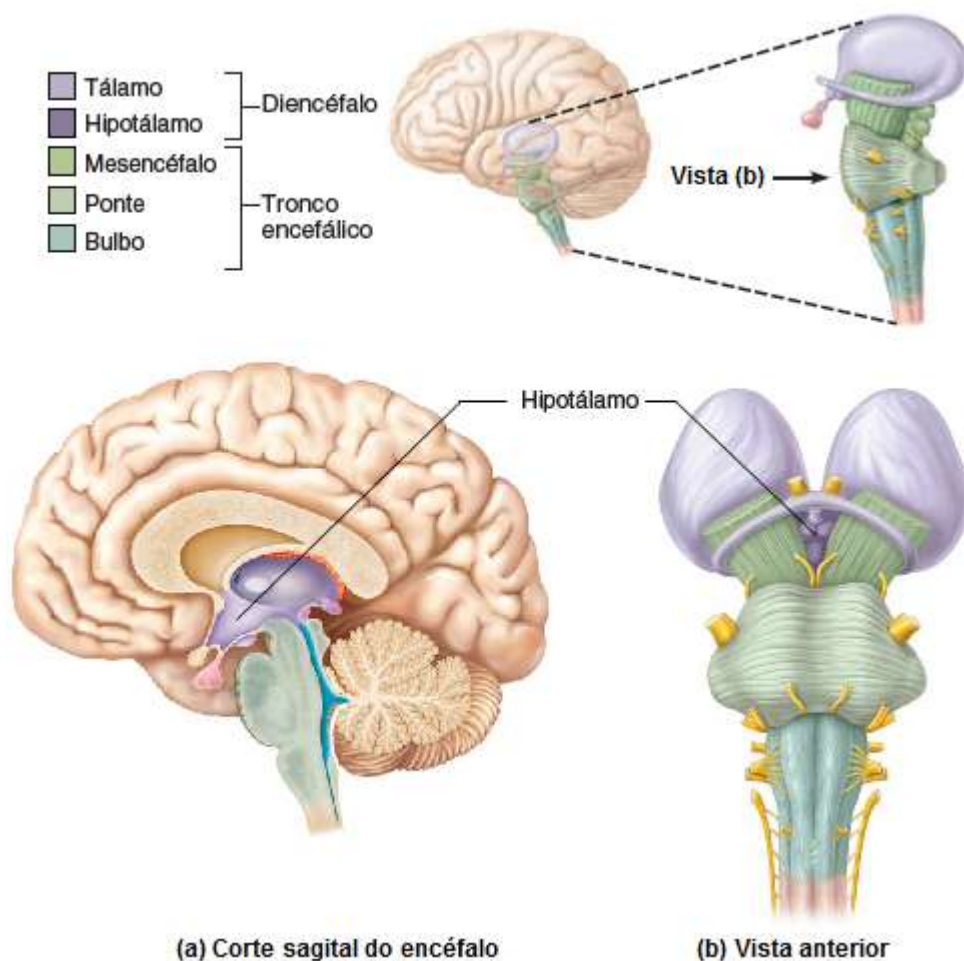
os músculos, aumento do açúcar no sangue para fornecer energia e dilatação das pupilas para melhorar a visão (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

A região do encéfalo que exerce controle sobre as ações da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso é o Hipotálamo (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.2.5 Hipotálamo

O hipotálamo é uma parte importante do encéfalo que exerce controle sobre as ações da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso, ajudando a manter o equilíbrio e a homeostase do corpo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). Conforme ilustrado na Figura 5, o hipotálamo fica localizado na parte inferior do diencefalo, entre o quiasma óptico e os corpos mamilares.

Figura 5 – Anatomia do hipotálamo



Fonte: Adaptado de Marieb, Wilhelm e Mallat (2014), p. 394

Legenda: Nesta figura é indicada a localização da estrutura do hipotálamo, inserida no conjunto formado por diencefalo e tronco encefálico

As principais funções do hipotálamo incluem (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014):

- a) Regulação da temperatura corporal;
- b) Regulação das sensações de sede e fome;
- c) Regulação dos ciclos de sono e vigília;
- d) Controle do sistema endócrino;
- e) Controle de respostas emocionais;
- f) Controle de comportamento motivacional;
- g) Formação da memória.

Todas essas funções são realizadas através do envio de sinais nervosos, que podem estimular o sistema cognitivo, provocando reações comportamentais, como sentir sede e, conseqüentemente, procurar água para beber; ou inversamente ser estimulado por processos cognitivos, como sentir medo e desencadear reações no ritmo cardíaco e na produção de hormônios por glândulas endócrinas.

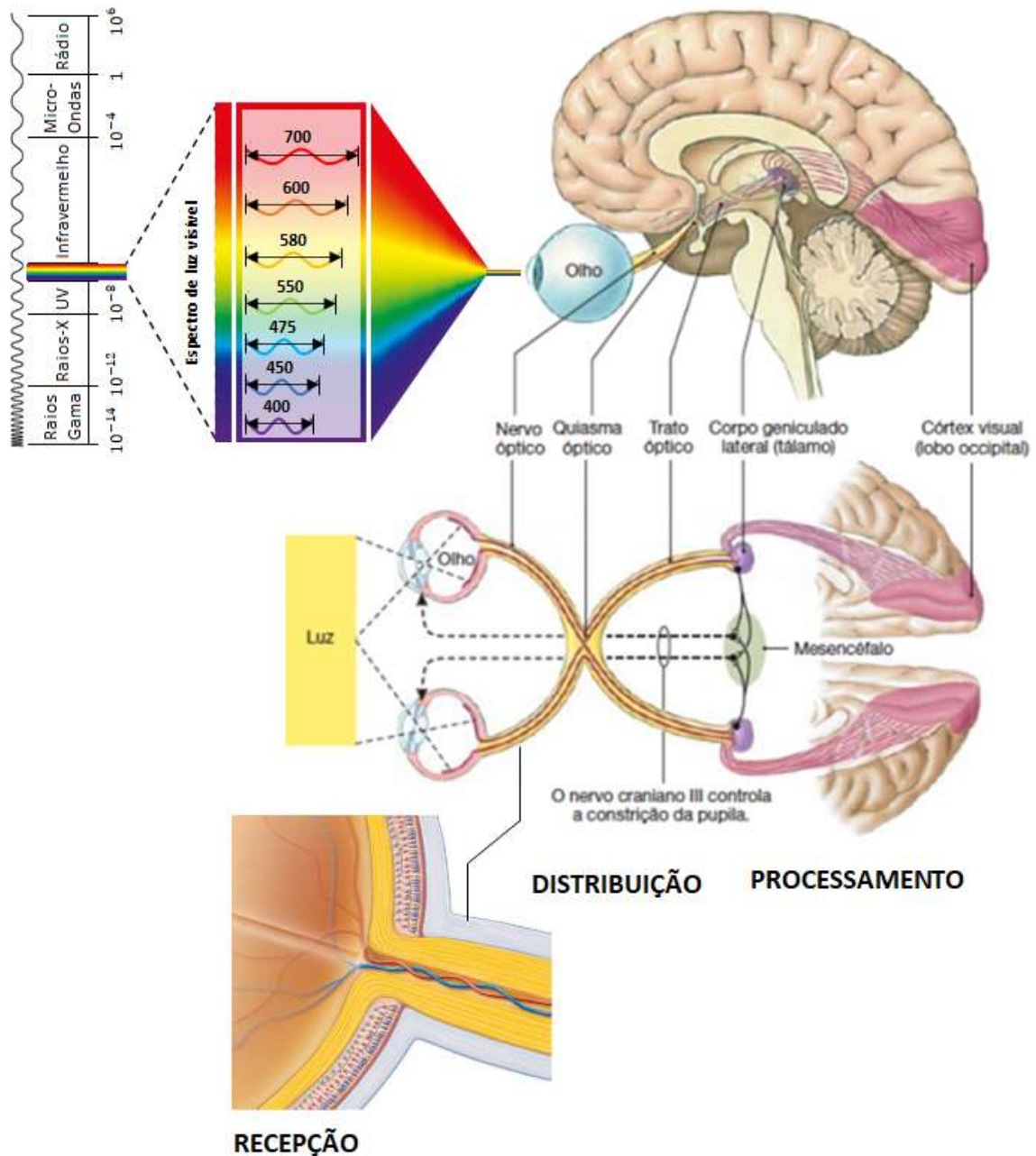
Neste contexto, e considerando que alguns processos cognitivos provocam reações involuntárias nos órgãos inervados pela parte simpática e parassimpática do SNA, tem sido uma prática promissora estudar esses processos cognitivos por meio da análise de alguns órgãos. Mais especificamente, por meio da mensuração do diâmetro pupilar (HESS; POLT, 1960, 1964a; HESS, 1965; KAHNEMAN; BEATTY, 1966; AHERN; BEATTY, 1979). Segundo Beatty e Lucero-Wagoner (2000), a variação do diâmetro pupilar é um indicador sensível de carga de trabalho mental.

2.3 FUNDAMENTOS DA VISÃO

Dentre os cinco sentidos sensoriais, a visão é o de maior complexibilidade, pois envolve aproximadamente 40% do córtex cerebral no processamento de informação visual e cerca de 70% de todos os receptores sensitivos do corpo (presentes nos olhos) para perceber os estímulos luminosos (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ROGERS, 2010).

A visão é um sistema sensorial especializado na percepção de estímulos luminosos, que utiliza um conjunto de células sensíveis a ondas eletromagnéticas do espectro visível para transformar luz em sinais nervosos e uma série de processos cognitivos para interpretar a informação visual. Pode-se ter uma ideia geral deste processo observando o trajeto dos estímulos luminosos através da via neural da visão (Figura 6), que vai desde a etapa de recepção nos olhos, até o processamento da imagem no córtex cerebral. Cada um desses processos será explicado a seguir em 3 seções: recepção, distribuição e processamento.

Figura 6 – Via neural da visão



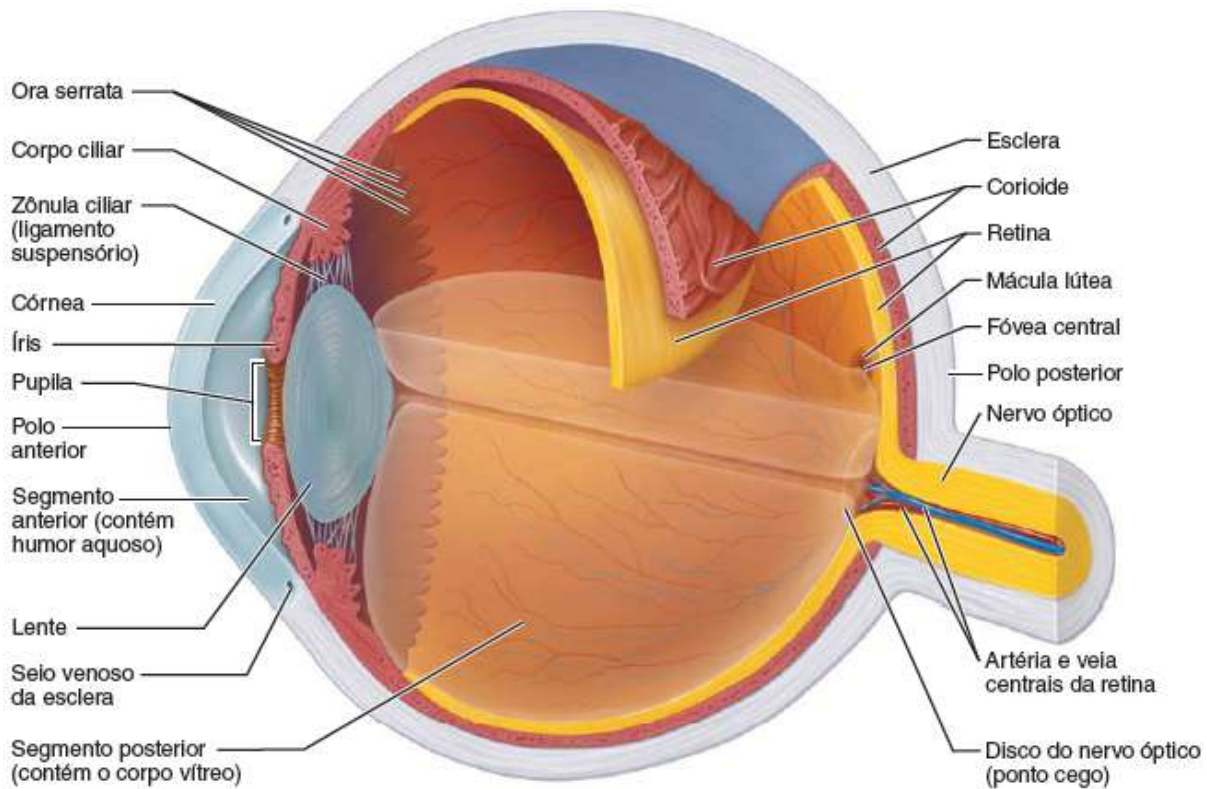
Fonte: Adaptado de Marieb, Wilhelm e Mallat (2014), p. 516

2.3.1 Recepção

O órgão responsável pela recepção dos estímulos luminosos é o olho, uma estrutura esférica com um diâmetro em torno de 24 mm. Apenas um sexto anterior da sua superfície é visível na face do rosto, o restante encontra-se na órbita óssea cuneiforme. Na parte de trás fica o nervo ótico, as artérias, veias e os músculos extrínsecos do olho, responsáveis pelos movimentos

externos de fixação e sacada ocular. Na Figura 7, é apresentada uma ilustração com as principais estruturas do olho.

Figura 7 – Estrutura interna do olho



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

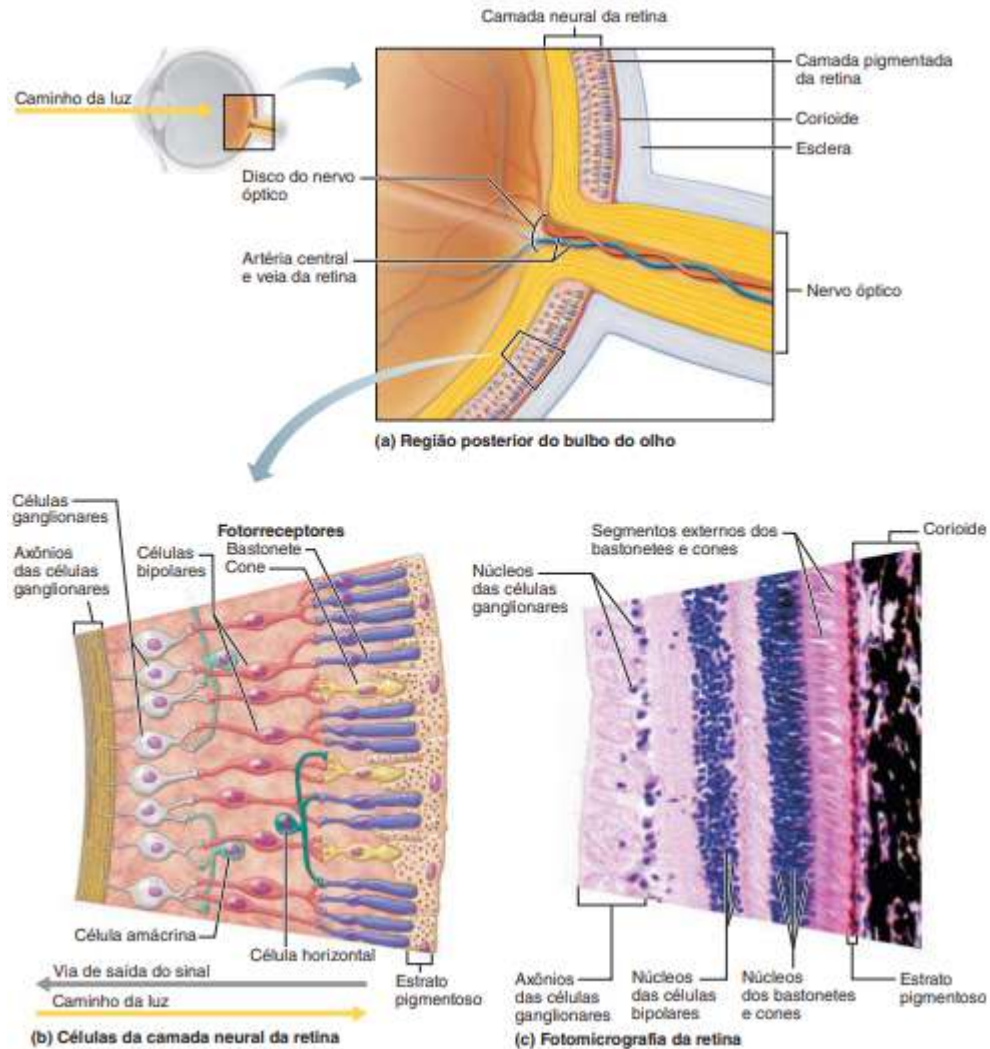
A luz entra no olho pela abertura da pupila, que possui a função de controlar a luminosidade constringindo e dilatando seu diâmetro. Esse processo ocorre por meio dos músculos esfíncter e dilatador da íris. A medida que entra no olho, a luz sofre refração pela córnea e pela lente, sendo focada na retina. A córnea contribui para a maior parte da refração, mas a lente permite a focalização em objetos situados em diferentes distâncias.

A retina possui um conjunto de células sensíveis a luz, interconectadas por meio de sinapses, que possuem função de receber, modular e transmitir o estímulo visual até o nervo ótico. Como pode ser visto na Figura 8, a retina possui dois estratos. O estrato pigmentoso externo (situado contra a corioide), que assim como a corioide, tem a função de absorver a luz e evitar que se disperse dentro do olho. E o estrato nervoso que é composto por três tipos principais de células neurais, as células fotorreceptoras, as células bipolares e as células ganglionares.

As células fotorreceptoras são de dois tipos, cones e bastonetes. Os cones, são células adaptadas a alta luminosidade e especializadas na percepção de cores, são células sensíveis à luz azul, vermelha e verde. Já os bastonetes, embora em maior quantidade, são células que

funcionam em condições de baixa luminosidade e fornecem informação de luminosidade em escalas de cinza.

Figura 8 – Anatomia microscópica da retina



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: (a) Os axônios das células ganglionares formam o nervo óptico, que sai da parte posterior do olho, no disco do nervo óptico. (b) A luz (indicada pela seta amarela) passa pela retina e segue para as células fotorreceptoras (bastonetes e cones). A informação (sinais de saída) flui na direção oposta via células bipolares e ganglionares. (c) Fotomicrografia (140x)

Quando as partículas luminosas atingem o estrato pigmentoso, alguns pigmentos são modificados e inicia-se um efeito em cascata (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014):

- a) primeiramente, as células fotorreceptoras estimuladas sinalizam os neurônios bipolares, com os quais formam sinapses;
- b) depois, as células bipolares ativadas sinalizam as células ganglionares, com os quais formam sinapses;

- c) e, por último, as células ganglionares geram potenciais de impulsos nervosos, que seguem ao longo da superfície interna da retina e convergem posteriormente, formando o nervo ótico, que vai do olho até as áreas de processamento visual.

A retina também contém interneurônios incluindo células amácrinas e células horizontais que processam e modificam a informação visual antes do sinal neural ser distribuído e levado às áreas de processamento visual (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ROGERS, 2010).

O nome dado ao processo de transformação de energia luminosa em sinais elétricos biologicamente reconhecíveis é Fototransdução. Esse processo envia um conjunto de informações de luminância, crominância, frequência espacial e temporal até as áreas de processamento visual no cérebro.

2.3.2 Distribuição

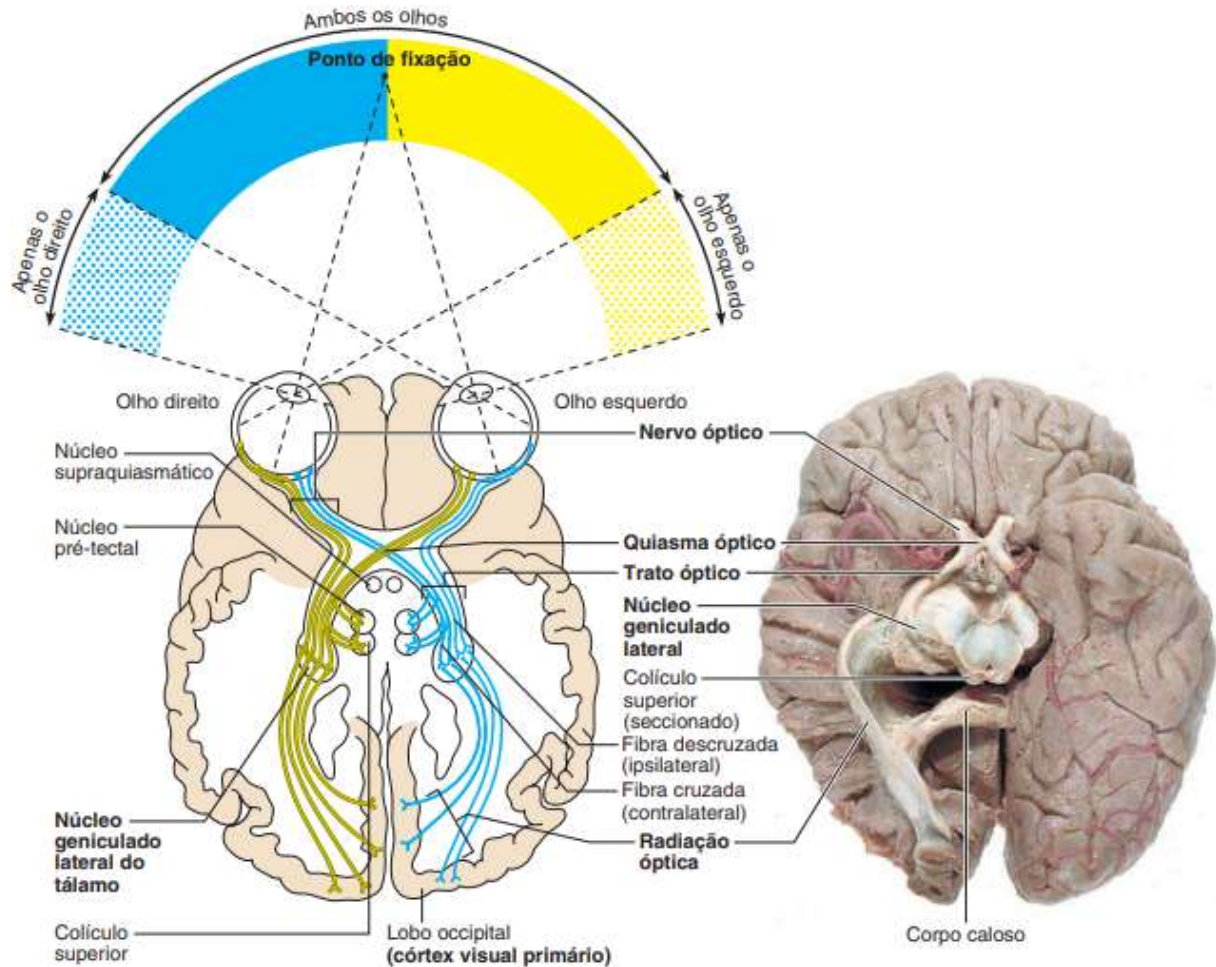
O processo de fototransdução originado no olho inicia um fluxo de informação visual que, por meio da via visual, segue para o cérebro para processamento complexo, levando a maior parte dessa informação ao córtex cerebral. A via visual é uma via aferente (sensorial) que interconecta quatro tipos de neurônios desde a retina até ao córtex, na seguinte ordem (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014):

- a) 1º neurônio - são os fotorreceptores, cones e bastonetes;
- b) 2º neurônio - são os neurônios bipolares, que ligam os bastonetes às células ganglionares;
- c) 3º neurônio - são as células ganglionares, que formam o nervo ótico estendem seus axônios até o corpo geniculado externo;
- d) 4º neurônio – são as células corticais, que saem do corpo geniculado externo, formam a radiação ótica e terminam na área visual.

Os impulsos elétricos gerados pelas células ganglionares são distribuídos via nervo ótico, quiasma ótico e trato ótico para o núcleo geniculado lateral do tálamo e em seguida os neurônios talâmicos projetam-se para o córtex visual primário no lobo occipital, onde ocorre a percepção consciente das imagens visuais. Na Figura 9, é apresentada uma ilustração da via visual.

No quiasma ótico, as vias neurais das metades mediais das retinas se dividem, fornecendo a cada córtex uma parte da informação da metade oposta do campo visual de cada olho. Posteriormente, o córtex visual compara as visualizações dos dois olhos e gera percepção de profundidade.

Figura 9 – Vias visuais para o cérebro e campos visuais, vista inferior



Fonte: Adaptado de Marieb, Wilhelm e Mallat (2014), p. 522

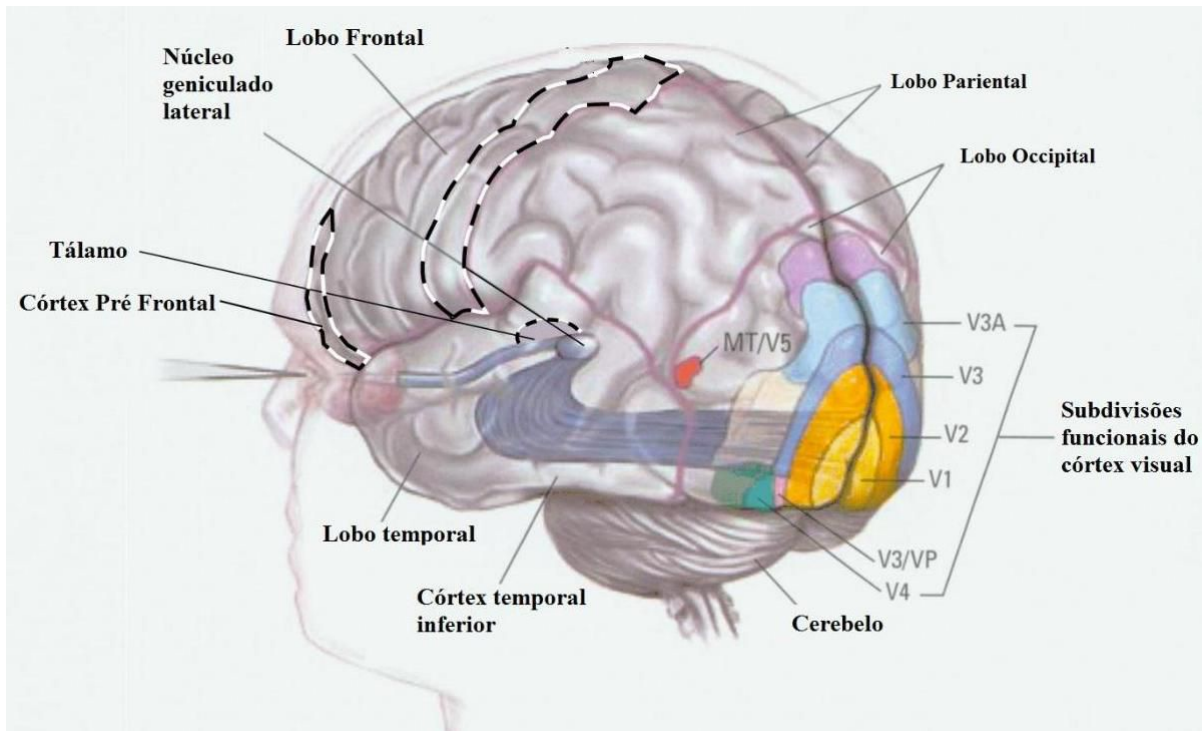
Além de levar informação até as áreas de processamento visual, as vias visuais também se ramificam para outras partes do cérebro. Alguns axônios dos tratos óticos enviam ramificações para o mesencéfalo e para os colículos superiores, onde os núcleos de reflexos controlam os músculos extrínsecos do olho. Outros axônios se ramificam para o núcleo supraquiasmático do hipotálamo, que é o “temporizador” que rege nossos biorrítmos diários e requer estímulos visuais para mantê-lo em sincronia com o ciclo de luz-escuridão (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.3.3 Processamento

Os conceitos sobre a fisiologia do olho e como os sinais provenientes dos estímulos luminosos são transportados até as áreas de processamento visual são bem definidos na literatura, mas como esses milhões de sinais se tornam uma percepção real ainda é uma questão difícil de ser respondida. Uma resposta parcial é considerar que toda imagem pode ser dividida em

componentes, como linhas, cores, texturas, sombras e movimentos. E que esses componentes são processados por áreas do córtex cerebral especializadas em detectar cada um desses componentes (SCHMOLESKY, 2009). Uma ilustração destas áreas pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 – Áreas envolvidas no processamento de informação visual



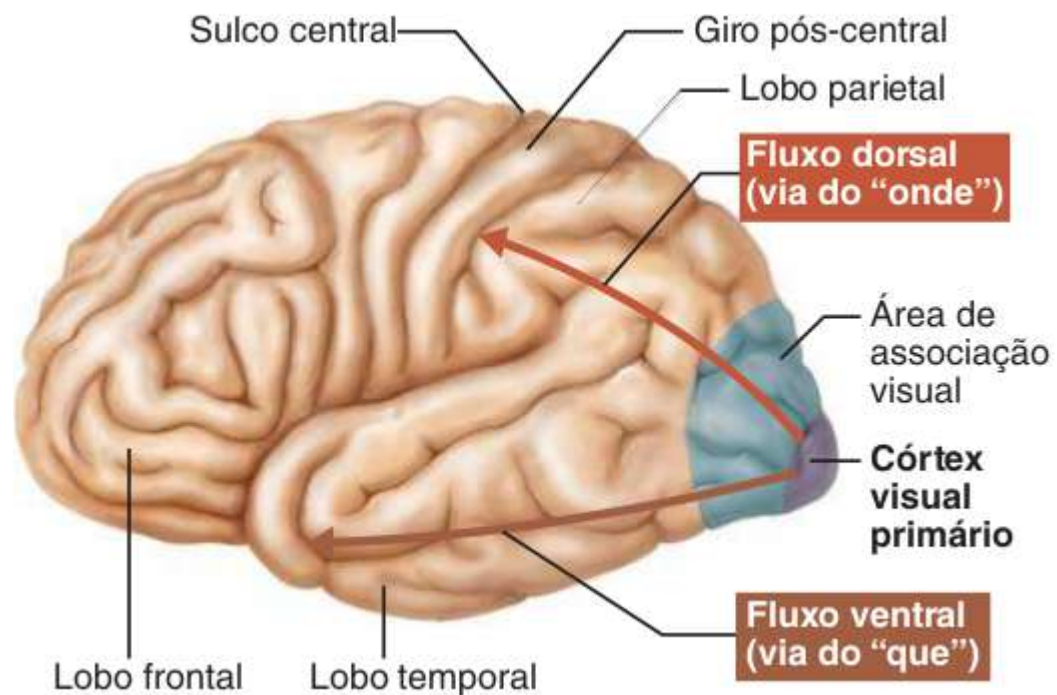
Fonte: Schmolesky (2009)

No córtex visual primário (V1) ocorre o primeiro nível do processamento cortical da informação visual. Esta área recebe as vias parvocelulares e magnocelulares do NGL (Núcleo Geniculado Lateral) e funciona como um segregador de sinais visuais, separando as informações de cor, forma e movimento (PEREIRA; REIS; MAGALHÃES, 2003; GOODALE, 2011). O V1 possui seis camadas distintas, rotuladas de 1 a 6, cada uma compreendendo diferentes tipos de células e funções. A camada 4, que recebe informações do NGL, ainda se divide em 4 camadas, rotuladas de 4A, 4B, 4C α e 4C β . Estas camadas possuem uma relação dinâmica com diferentes áreas de processamento visual, enviando e recebendo múltiplos sinais (HUFF; MAHABADI; TADI, 2019).

As áreas V2, V3, V4 e V5 completam o processo de abstração de características do estímulo visual e integram o processamento visual complexo que se estende do lobo occipital até a área de associação posterior nos lobos temporal e parietal. Essa conexão entre área de associação visual e córtex visual é formada por dois fluxos de informação (Figura 11). O fluxo dorsal estende-se pelo córtex parietal posterior até o giro pré-central e percebe a relação espacial entre

vários objetos. Isso é conhecido como via do “onde”, que identifica a localização dos objetos e fornece parâmetros de orientação espacial, percepção de profundidade, direção e velocidade do movimento. O fluxo ventral estende-se pela parte inferior do lobo temporal e é responsável por reconhecer objetos, cores, palavras durante a leitura e demais objetos visuais. Esse fluxo é conhecido como via do “que”, pois identifica o que as coisas são (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; GOODALE, 2011).

Figura 11 – Vias visuais através das áreas de associação multimodais



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Os cálculos cognitivos que transformam os sinais neurais no fenômeno da visão ainda não são totalmente claros na literatura. Sabe-se que nem toda a informação processada pelo córtex visual é proveniente das vias aferentes do olho (GUERRA; COZENZA, 2011; KANDEL et al., 2014). O fluxo de informação entre as áreas de associação e o córtex visual, por exemplo, é muito maior do que o fluxo de informação entre o córtex visual e o olho, que, por sua vez, ainda é filtrado por funções cognitivas de **atenção** que permitem focar apenas em informações importantes, inibindo o processamento dos sinais dispensáveis (GUERRA; COZENZA, 2011; KANDEL et al., 2014).

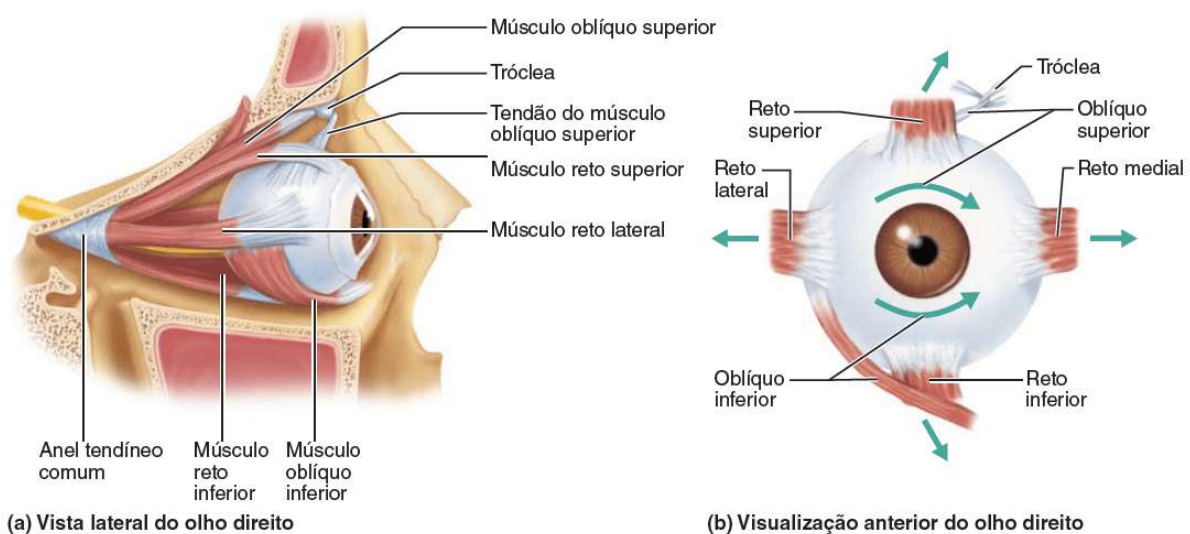
Embora ainda não se tenha uma definição completa sobre como funciona o processamento de informações visuais, a área de pesquisa sobre a visão é um campo crescente, com sucessivos estudos que trazem detalhes adicionais sobre como o cérebro lida com essa tarefa (SCHMOLLESKY, 2009). As pesquisas nessa área comumente apresentam um problema de engenharia

reversa, em que se parte do efeito para a causa, como nos estudos de lesões no cérebro, que revelam a área cerebral que está associada a padrões recorrentes de um determinado distúrbio.

2.3.4 Movimento ocular

Além de ter milhões de células sensitivas, os olhos também possuem um conjunto de músculos que nos permite rotacioná-lo em diversas direções, controlando o foco da visão e a abertura da pupila para regular a quantidade de luz percebida pelas células fotorreceptoras (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). Esses movimentos são divididos em movimentos internos chamados de **Dilatação pupilar** e **Constricção pupilar** e movimentos externos chamados de **Fixação** e **Sacada**. A Fixação é o instante de tempo em que os olhos permanecem fixos em um ponto espacial de visão e a Sacada é o movimento ocular entre a fixação de um ponto a outro, controlados através de seis músculos extrínsecos do bulbo do olho que pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Músculos extrínsecos do olho



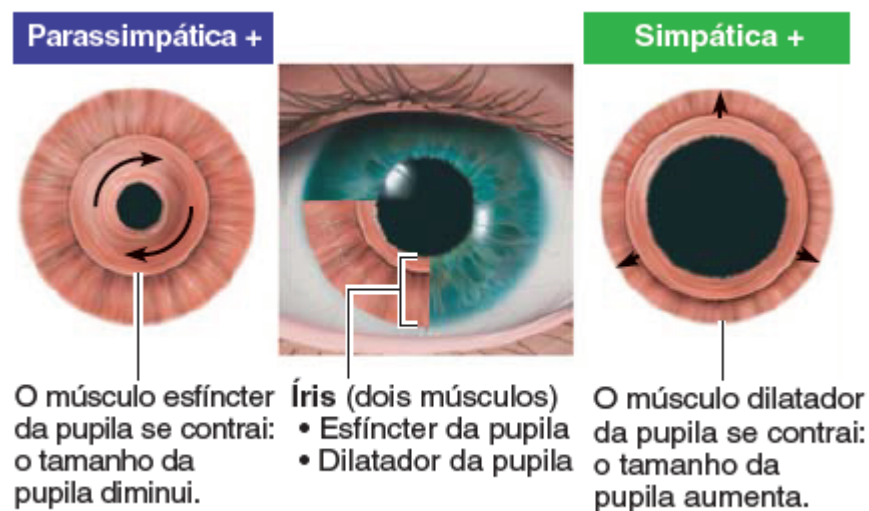
Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: No diagrama (a), é apresentada a anatomia muscular do olho. No diagrama (b), as setas indicam a direção do movimento do bulbo do olho conforme a contração de cada músculo

Conforme ilustrado na Figura 12(b), o músculo reto lateral traciona o olho lateralmente para fora, o músculo reto medial traciona o olho lateralmente para dentro, o músculo reto superior traciona o olho para cima e gira para dentro, o músculo reto inferior traciona o olho para baixo e gira para dentro, o músculo oblíquo inferior eleva e gira o olho lateralmente e o músculo oblíquo superior abaixa e gira o olho lateralmente (DUCHOWSKI, 2017; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ROGERS, 2010).

A dilatação e a constrição da pupila são controladas pelos músculos da íris, que é a parte colorida visível do olho, composta pelo músculo dilatador e pelo músculo esfíncter (ALEXANDRIDIS; TELGER, 1985). A função da íris é regular a quantidade de luz que entra no olho, protegendo as células fotorreceptoras sensíveis ao ofuscamento e adequando o sistema de visão conforme a necessidade do indivíduo, ou seja, em ambientes com excesso de luminosidade como a luz do sol, as pupilas se constriem, diminuindo a quantidade de luz que entra no olho e em ambientes com pouca luminosidade ou em situações de visão de longo alcance a pupila se dilata, permitindo que as células fotorreceptoras percebam mais luz (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ROGERS, 2010). A Figura 13 mostra como os músculos esfíncter e dilatador atuam para regular o tamanho da pupila.

Figura 13 – Constrição e dilatação da pupila



Fonte: Marieb, Wilhelm e Mallat (2014)

Legenda: O sinal (+) significa ativação provocada pelas partes do SNA

Adicionalmente, a pupila pode sofrer constrições e dilatações alheias às suas funções naturais de controle de luminosidade, pois os músculos da íris são inervados pelas fibras parassimpáticas e simpáticas do sistema nervoso, o que permite ações provenientes de outros estímulos e ou inibições da Divisão Autônoma do Sistema Nervoso (SNA) (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ORSI, 2018). Em situações de relaxamento e economia de energia corporal, a parte parassimpática do sistema nervoso é ativada, gerando estímulos nervosos para a pupila constrirem, diminuindo a quantidade de luz que entra no olho e conseqüentemente reduzindo o consumo de energia com processamento visual. Já em situações de esforço físico ou mental a parte simpática é ativada, gerando estímulos nervosos para a pupila dilatar, permitindo que

o indivíduo obtenha uma visão mais clara a cerca de suas atividades (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ORSI, 2018).

Segundo Wyatt (1995), em condições normais de luminosidade, a pupila mede cerca de 3 mm, podendo alterar-se em cerca de 120% de seu estado anterior com alterações na luminosidade do ambiente. No entanto, sem alteração de iluminação, o tamanho da pupila também pode ser alterado através de estímulos cognitivos, chegando a variar de 20% a 50% em algumas tarefas mentais (KAHNEMAN, 2011).

2.3.5 Controle do diâmetro da pupila

O controle do diâmetro da pupila é um processo cognitivo baseado em dois fatores: A) a influência da luminosidade; e B) a influência da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso autônomo (SNA) (ORSI, 2018).

No fator A, quando a ação física da luz sobre o olho atinge níveis superiores ao suportado pelas células fotorreceptoras, é causado uma sensação semelhante a dor, causando reflexos instantâneos de constrição pupilar. Estes reflexos são causados por um conjunto de neurônios sensitivos que monitoram a intensidade da luz sobre o cristalino do olho e, de forma autônoma, controla a luminosidade percebida estimulando os neurônios motores que inervam os músculos esfíncter e dilatador do olho. Este processo acontece fluidamente o tempo todo e não se pode controlá-lo (BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000; ROGERS, 2010; BREMNER, 2012).

No fator B, quando a ação do SNA ativa a parte parassimpática do sistema nervoso, caracterizando um estado de repouso e economia de energia, é percebido estimulação nos neurônios motores que inervam o músculo esfíncter do olho. Essa estimulação para constrição pupilar é coerente com a proposta de economia de energia corporal, pois ao reduzir a quantidade de luz percebida pelos fotorreceptores reduz-se também a energia gasta com o processamento de informação visual. Por outro lado, quando a ação do SNA ativa a parte simpática do sistema nervoso, caracterizando um estado de atenção, é percebido que todos os órgãos controlados pelo SNA se mobilizam para oferecer o máximo de suas capacidades às atividades desenvolvidas pelo indivíduo. Neste caso, é percebido estimulação nos neurônios motores que inervam o músculo dilatador do olho para que a pupila se abra e o indivíduo consiga obter maior informação visual (BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000; ROGERS, 2010; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Os fatores A e B são graduais e somativos, ou seja, suas ações não estimulam a pupila a ficar totalmente aberta ou totalmente fechada, são ações graduais conforme a intensidade de luz e a intensidade do esforço cognitivo refletido pelo SNA. Por exemplo, a medida que a luminosidade de um ambiente gradualmente aumenta, é possível perceber que o diâmetro da pupila gradualmente diminui, mas se ao mesmo tempo o SNA ativar a parte simpática do sistema nervoso, estimulando a pupila a dilatar, a redução do diâmetro pupilar causada pela luminosidade será atenuada (BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000; ROGERS, 2010; ORSI, 2018). Na Tabela 1 é apresentada a relação de estímulos somativos dos fatores A e B, em que o sinal de (+) indica estímulo a dilatação e o sinal de (-) indica estímulo a constrição.

Tabela 1 – Relação de estímulo aos músculos da pupila.

	Ação simpática	Ação parassimpática
Alta luminosidade	- +	- -
Baixa luminosidade	+ +	+ -

Fonte: Autor

Levando em consideração a ação da luz na Tabela 1, ao controlar esta variável para que fique estável, as alterações pupilares se reduzem apenas aos estímulos de reflexo do SNA. Em outras palavras, se não houver alteração de luminosidade no ambiente é possível correlacionar as dilatações e constrições pupilares com as ações simpáticas e parassimpáticas do SNA.

2.3.6 Análise dos movimentos oculares

A forma como os nossos olhos se movem durante a aquisição de informação pode revelar detalhes importantes sobre os processos cognitivos, pois todo estímulo visual adequadamente percebido provoca uma cascata de conexões neurais que pode alterar o estado de atenção do sujeito e, conseqüentemente, gerar uma resposta involuntária por meio dos órgãos inervados pela parte simpática e parassimpática do SNA. Isso é o mesmo que dizer que é possível observar uma reação comportamental sempre que um sujeito é submetido a uma tarefa cognitiva e que, portanto, analisar os movimentos oculares humanos pode ser uma abordagem promissora para estudar operações mentais específicas.

Neste contexto, o uso de engenharia reversa para analisar os dados de rastreamento ocular quando se tem o controle dos estímulos cognitivos pode fornecer informações precisas sobre como os seres humanos processam informações visuais em diferentes situações.

2.4 RASTREAMENTO DOS MOVIMENTOS OCULARES

O rastreamento ocular é feito com equipamentos específicos que medem os movimentos internos, de dilatação e contração das pupilas, e os movimentos externos, de rastreando do foco da visão. Como exemplo destes equipamentos, tem-se o rastreador ocular **Tobii Pro TX300**, que foi utilizado nos experimentos realizados nesta tese.

A maioria desses equipamentos, inclusive o **Tobii Pro TX300**, utiliza técnicas de rastreamento remoto não invasivas combinadas com o método de detecção do centro pupilar através do reflexo da córnea, mais conhecido pela sigla inglesa **PCCR (Pupil Center Corneal Reflection)** (BERGSTROM; SCHALL, 2014; POOLE; BALL, 2006; TOBII, 2016).

2.4.1 Equipamento para rastreamento ocular

O equipamento de rastreamento ocular utilizado neste estudo é o **Tobii Pro TX300**, que é um rastreador ocular de mesa e específico para pesquisas detalhadas do comportamento natural humano. Este equipamento possui uma taxa de aquisição de sinal de 300Hz e não é estacionário. Isso significa que os movimentos oculares, como sacadas e fixações, podem ser estudados sem o uso do apoio de queixo, permitindo o movimento livre da cabeça.

O **Tobii Pro TX300** é composto por um módulo de rastreamento acoplado a um monitor TFT de 23 polegadas com resolução de tela de 1280x1024 pixels, assemelhando-se com o computador comum, como pode ser visto nas Figuras 14 e 15, que respectivamente mostram os detalhes do equipamento e um exemplo de como o indivíduo é posicionado em frente ao rastreador ocular.

Figura 14 – Equipamento de rastreamento ocular - Tobii TX300



Fonte: Tobii (2016)

Legenda: O módulo de rastreamento ocular localiza-se logo a baixo da tela do monitor, com as câmeras de captura de sinal e um conjunto de iluminação infravermelha posicionados sob um visor translúcido

Figura 15 – Exemplo de posicionamento de um indivíduo em frente ao equipamento

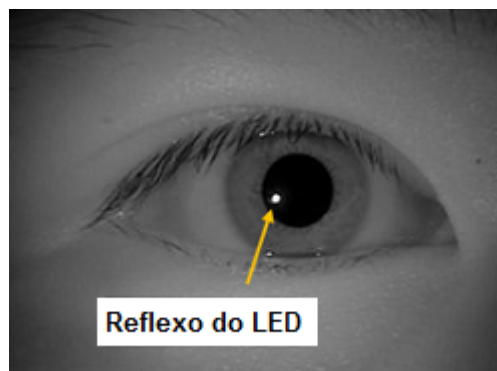


Fonte: Tobii (2016)

2.4.2 Método de rastreamento ocular

O **Tobii Pro TX300**, como já mencionado, utiliza o método **PCCR**, que basicamente utiliza uma fonte de luz infravermelha imperceptível ao olho humano para iluminar os olhos e gerar pontos de reflexo na córnea, que então são detectados por uma câmera sensível a infravermelho (GUESTRIN; EIZENMAN, 2006; BERGSTROM; SCHALL, 2014; POOLE; BALL, 2006; TOBII, 2016). Como ilustrado na Figura 16, o reflexo do LED gera um ponto brilhante na córnea que servirá de marcador para identificação do olho.

Figura 16 – Reflexo do LED infravermelho na córnea

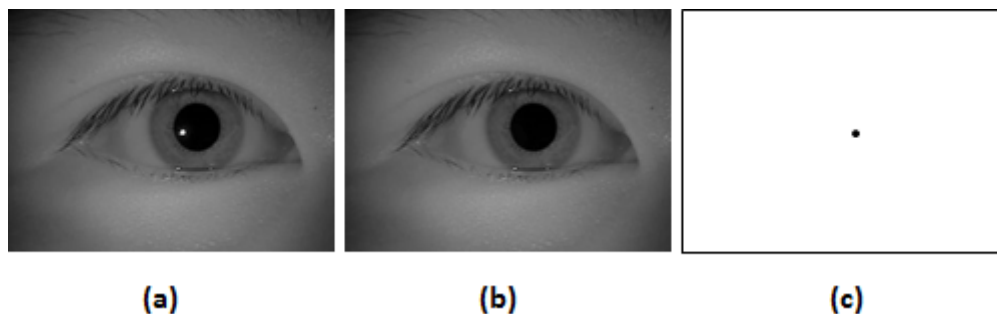


Fonte: Orsi (2018)

Em seguida é realizada a segmentação da imagem para identificar as coordenadas do ponto brilhante. Porém, em meio aos diversos artefatos contidos na imagem do olho, como os cílios, as pálpebras, a íris e a própria pupila, é um tanto difícil encontrar uma técnica de segmentação que encontre um limiar ótimo para identificar apenas o ponto brilhante. Então é aplicado o método que fundamenta a técnica de PCCR, que é o **método de diferença de imagem** (EBISAWA, 1970).

O método de diferença de imagem consiste em limpar o fundo da imagem para identificar o ponto brilhante de reflexo do LED. Para isso, a emissão de luz infravermelha é sincronizada com a taxa de captura da câmera, alternando a emissão de luz a cada quadro, marcando a imagem com brilho nos quadros pares e não marcando nos quadros ímpares. Assim, a cada dois quadros é calculado a diferença de pixels entre cada quadro, subtraindo a imagem par da imagem ímpar para limpar todo o fundo que é comum em ambas as imagens, sobrando apenas o segmento brilhante do reflexo do LED (EBISAWA; SATOH, 1993; EBISAWA, 1970). A Figura 17 mostra um exemplo da aplicação deste método.

Figura 17 – Método de diferença de imagem



Fonte: Orsi (2018)

Legenda: (a) primeiro quadro de captura de sinal (imagem par), com o reflexo do led. (b) segundo quadro de captura do sinal (imagem ímpar), sem o reflexo do led. (c) diferença das duas imagens e respectiva marcação da posição da pupila

A partir dos movimentos oculares em torno do marcador são obtidas as coordenadas das fixações e sacadas e, a partir dessas coordenadas, o *Tobii Studio* (software do equipamento) calcula 155 parâmetros de medidas, divididos em 18 categorias, como tempo de gravação, quantidade de fixações e sacadas, duração de cada fixação, diâmetro pupilar, áreas de interesse, entre outros (TOBII, 2016). Nesta tese, os parâmetros utilizados são: diâmetro das pupilas direita e esquerda; coordenadas horizontais e verticais da fixação do olhar na tela do equipamento; índice e tempo de cada fixação ocular; e direções e amplitude de cada sacada.

2.5 PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA AQUISIÇÃO DO SINAL VISUAL

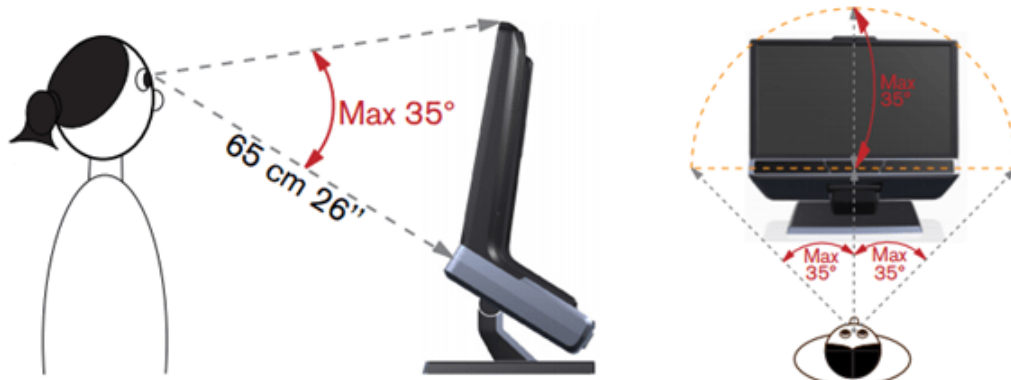
O protocolo experimental para a aquisição do sinal visual pode variar dependendo do objetivo do estudo, mas especificamente neste trabalho foi adotada a mesma abordagem em todos os experimentos, conforme descrição a seguir:

- a) Abordagem do voluntário;
- b) Explicação sobre o experimento;
- c) Preenchimento do termo de consentimento livre e esclarecido;
- d) Orientação do voluntário sobre a realização do experimento;
- e) Posicionamento do voluntário no equipamento de rastreamento ocular;
- f) Calibração do equipamento para o voluntário;
- g) Início da aquisição do sinal e apresentação do estímulo visual.

Para a aquisição do sinal foi utilizado o rastreador ocular descrito na subseção 2.4.1, posicionado em uma sala fechada, com iluminação artificialmente controlada dentro das especificações ideais (entre 300 e 1000lux) e posicionada fora do campo de visão do participante (TOBII, 2013). Na mesma sala também foi instalado um teclado comum (padrão ABNT) para o voluntário controlar a apresentação dos estímulos e um notebook com processador core i7 e 16 Gb de RAM, com sistema operacional Windows 7, para conduzir a atividade experimental por meio do software Tobii Studio.

A primeira etapa deste protocolo consiste na abordagem do voluntário, explicação sobre o estudo e preenchimento do termo de consentimento livre e esclarecido. Em seguida, é feita preparação para coleta de dados que inicia com orientação do voluntário sobre como se posicionar em frente ao rastreador ocular, conforme exemplo demonstrado na Figura 18 (TOBII, 2016).

Figura 18 – Parâmetros para aquisição do sinal



Fonte: Tobii (2016)

Nesta etapa é solicitado ao voluntário que permaneça em uma posição confortável, mantendo uma das mãos sobre qualquer tecla do teclado, quando aplicável, para que possa controlar o início do experimento e que seja mantida a sua atenção visual na tela do equipamento. Então é iniciada a calibração do rastreamento ocular. Durante a calibração o voluntário deve fixar seus olhos em um marcador em formato de círculo que se move na tela do equipamento. Esses movimentos se repetem algumas vezes para que seja estabelecida uma correspondência do olhar do voluntário com os pontos fiduciais de calibração. A qualidade da calibração pode ser verificada ao final desta etapa e se necessário o processo pode ser reiniciado.

As etapas de estimulação visual são específicas e, portanto, serão apresentadas adiante nos capítulos correspondentes.

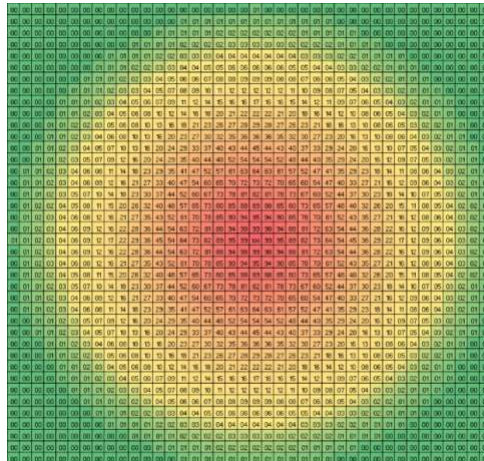
2.6 PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL

A partir dos dados de rastreamento ocular são gerados os mapas de atenção visual, que são obtidos a partir da consolidação das fixações oculares em uma formatação gráfica do tipo mapa de calor, o qual leva em consideração dois parâmetros: 1) o limiar de espaço que indica área máxima em pixels para computar uma fixação e; 2) o limiar de tempo que indica o tempo mínimo para contabilizar cada fixação (DUCHOWSKI, 2017). Estes parâmetros podem ser configurados no *Tobii Studio*, mas o padrão é uma área de dispersão de **40 pixels** e um tempo de inércia de movimento ocular de **60ms**, o que significa que para ser contabilizada uma fixação é necessário que o indivíduo foque a atenção visual em uma área de até 40 pixels por pelo menos 60ms.

Os mapas de atenção visual são gerados com técnicas de mapa de calor, em que é criado uma matriz de pontos que cobre toda a área da imagem exposta. Por exemplo, uma imagem de 1920x1080 pixels, ajustada em áreas de 5 pixels, resulta em uma matriz de 384x216 pontos, onde cada ponto representa uma área de 5 pixels da imagem total. Cada um desses pontos recebe a soma de fixações do indivíduo, que podem ser ponderadas pelo número de repetição, não diferenciando uma fixação de 2000ms de uma fixação de 100ms, ou ponderada pelo tempo, em que uma fixação de 2000ms será 20 vezes maior que uma fixação de 100ms. Na Figura 19, pode ser visto um exemplo desta matriz de pontos.

Comumente, utiliza-se mapas de calor ponderados pelo número de fixações, ou seja, quanto maior for o tempo de uma fixação, maior será o tamanho do círculo que representa a região da fixação. A mesma proporção vale para as cores, que vão de verde a vermelho, sendo o

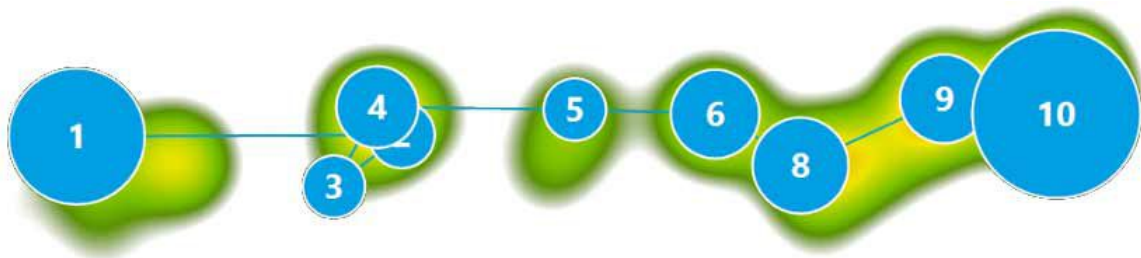
Figura 19 – Exemplo de matriz de pontos de um mapa de calor



Fonte: Silva (2017)

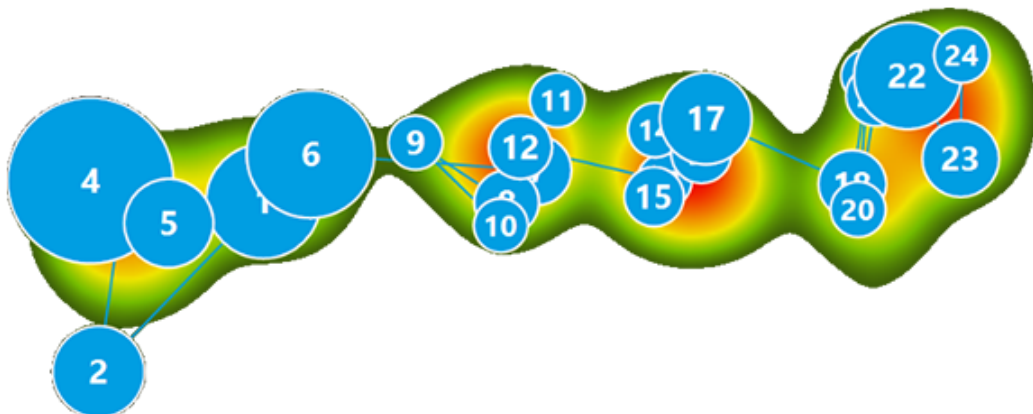
verde a região com menor pontuação e vermelho a região com maior pontuação. Um exemplo da formação do mapa de calor pode ser visto nas Figuras 20 e 21

Figura 20 – Exemplo de mapa de calor com 10 fixações



Fonte: Tobii Dynavox (2020)

Figura 21 – Exemplo de mapa de calor com 24 fixações



Fonte: Tobii Dynavox (2020)

A etapa de pré-processamento é finalizada com conversão da imagem em vetor. Nesta etapa os valores de cada pixel são enfileirados e uma única linha representando o sinal de entrada de um rastreamento ocular. Em seguida todos os vetores são empilhados formando uma matriz $N \times n$, em que N é a quantidade de amostras (sinais oculares de um indivíduo) e n é a quantidade de variáveis da imagem (número de pixels).

2.7 RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DE PADRÕES

Existem várias abordagens comumente utilizadas para reconhecimento automatizado de padrões, dentre essas as mais comuns são: a *abordagem estatística*, que é baseada em modelos probabilísticos para classificar as amostras de uma classe; a *abordagem sintática*, que procura descrever a estrutura dos padrões usando inter-relações de características primitivas; a *abordagem neural*, que é inspirada no funcionamento do sistema nervoso biológico e que procura determinar um mapeamento ótimo entre os neurônios de entrada e saída (classificação); e a *abordagem difusa*, que é baseada em modelos de incerteza para uma classificação não-determinística (SHARMA; KAUR, 2013). Dentre essas abordagens, a estatística é a de maior interesse nesse estudo, pois é uma abordagem que já vem sendo utilizada em pesquisas dessa natureza com relevância, principalmente em experimentos como os investigados aqui em que o número de amostras é menor ou igual ao número de variáveis ($N \leq n$) (ROMERA et al., 2019; ORSI, Rafael N; THOMAZ, Carlos E, 2018; THOMAZ, Carlos E et al., 2007; TENORIO; THOMAZ, 2011).

Para implementar um modelo estatístico de reconhecimento de padrões é necessário que se tenha conhecimento sobre a quantidade de grupos distintos e sobre as características dos elementos de cada grupo, ou seja, trata-se de um método supervisionado que necessita de informações sobre as variáveis que serão comparadas para que seja feita a classificação de novos elementos. Com isso, antes de iniciar a etapa de separação das amostras, é importante que seja feito a separação dos grupos de análise e, em casos com muitas variáveis como neste estudo, a seleção das características mais expressivas de cada amostra (YAN; DAI, 2011). Desta forma, definimos como padrão um modelo de aprendizagem estatística baseado em técnicas não supervisionada e supervisionada de extração de características e classificação de padrões visuais. Neste modelo são utilizados dois métodos de extração de características: a Análise de Componentes Principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade dos dados e extrair as características mais relevantes (FUKUNAGA, 2013; ABDI; WILLIAMS, 2010); e a Análise de Discriminantes Lineares de Máxima Incerteza (MLDA) para extrair as características mais

discriminantes e estimar hiperplanos de separação entre as classes (THOMAZ, Carlos E et al., 2007; TENORIO; THOMAZ, 2011).

2.7.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

A PCA é um método de extração de características comumente utilizado para reduzir a dimensionalidade dos dados e explicar a estrutura de covariância de um conjunto de variáveis por meio de combinações lineares. Este método utiliza uma transformação ortogonal para sumarizar um conjunto de n variáveis originais possivelmente correlacionadas em um número m de combinações lineares não correlacionadas chamadas de componentes principais. Para $m \leq n$, descreve-se a seleção das características que mais variam, ordenando de tal modo que a primeira componente principal represente as variáveis mais expressivas e a última componente principal com autovalor não-nulo represente a menos expressiva (ABDI; WILLIAMS, 2010; FUKUNAGA, 2013; TENORIO; THOMAZ, 2011).

Em uma matriz de dados contendo N observações (sinais de entrada) representadas por vetores n -dimensionais, pode-se obter a matriz de covariância através da Equação (1),

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{N-1} (X - \bar{X})(X - \bar{X})^T \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})(x_j - \bar{x})^T, \end{aligned} \quad (1)$$

em que x_j é a forma n -dimensional j da amostra de treinamento, N o número total de amostras e \bar{x} é o vetor médio dado pela Equação (2):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j. \quad (2)$$

Conforme descrito por Fukunaga (2013), o conjunto de m autovetores de S , correspondentes aos autovalores não nulos, minimiza o erro quadrático médio de reconstrução dos dados para todas as possíveis escolhas de bases m vetoriais ortonormais. Então, este conjunto de autovetores que define um novo sistema de coordenadas, descritas como m componentes principais, podem substituir as n variáveis originais em uma matriz de dados com dimensionalidade reduzida (FUKUNAGA, 2013).

2.7.2 Análise de Discriminantes Lineares (LDA)

A LDA é um método de extração de características originalmente proposto por Fisher (1936), que separa os dados originais em duas ou mais classes de interesse. Esta separação de

classes é realizada por meio de uma transformação linear que maximiza a separabilidade entre classes e minimiza a variabilidade dentro da classe (DEVIJVER; KITTLER, 1982).

Uma matriz de dispersão entre classes S_b pode ser definida como

$$S_b = \sum_{i=1}^g N_i (\bar{x}_i - \bar{x})(\bar{x}_i - \bar{x})^T, \quad (3)$$

e a matriz de dispersão dentro da classe S_w definida como

$$S_w = \sum_{i=1}^g (N_i - 1) S_i = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{N_i} N_i (x_{i,j} - \bar{x}_i)(x_{i,j} - \bar{x}_i)^T, \quad (4)$$

em que $x_{i,j}$ é a forma n -dimensional da amostra j da classe π_i , N_i é o número de exemplos de treinamento da classe π_i , g representa o número total de classes e \bar{x} é o vetor médio definido na Equação (2). O vetor \bar{x}_i é a média amostral da classe π_i (FUKUNAGA, 2013) e o vetor da média global \bar{x} pode ser reescrito pela equação

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g N_i \bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{N_i} x_{i,j}, \quad (5)$$

em que N é o número total de amostras de treinamento, descrito como $N = N_1 + N_2 + \dots + N_g$ (TENORIO; THOMAZ, 2011).

O objetivo principal da LDA é encontrar um hiperplano de separação que maximize a razão entre o determinante da matriz de dispersão entre classes S_b e o determinante da matriz de dispersão dentro da classe S_w (FISHER, 1936; THOMAZ, Carlos E et al., 2007). Esta razão denominada de Critério de Fisher, pode ser descrita pela equação:

$$P_{lda} = \underset{p}{arg \max} \frac{|P^T S_b P|}{|P^T S_w P|}. \quad (6)$$

O critério de Fisher é atendido quando a matriz de projeção P_{lda} é composta pelos $(g - 1)$ autovetores de $S_w^{-1} S_b$, em que os autovalores correspondentes são não-nulos (DEVIJVER; KITTLER, 1982; FUKUNAGA, 2013; THOMAZ, Carlos E et al., 2007). E, admitindo que S_w seja não-singular, será obtido um autovetor P_{lda} para cada $N_{classes} - 1$, ou seja, em problemas envolvendo apenas duas classes será obtido um único autovetor P_{lda} (TENORIO; THOMAZ, 2011).

No entanto, o método LDA apresenta uma limitação quando utilizado em bases de dados com muitas variáveis em relação a quantidade de amostras, como é especificamente o caso deste estudo, em que o número de características de uma imagem é proporcionalmente muito maior

do que o número de indivíduos estudados. Em outras palavras, a LDA é sensível a problemas com número pequeno de amostras e, mesmo sendo feita a redução da dimensionalidade com a PCA, pode apresentar instabilidade e baixa capacidade de generalização, aumentando os erros de classificação. Desta forma, para contornar os problemas de instabilidade do procedimento padrão da LDA e calcular o autovetor P_{lda} , foi adotado uma solução proposta por Carlos E Thomaz et al. (2007), denominada MLDA (*Maximum uncertainty LDA*).

2.7.3 Análise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA)

O método de MLDA utiliza covariância de dados baseado em LDA, substituindo a matriz de dispersão S_w na Equação (6), por uma matriz de dispersão modificada S_w^* (TENORIO; THOMAZ, 2011). Esta nova matriz S_w^* pode ser obtida através das seguintes etapas:

- a) Calculam-se os autovetores Φ e os autovalores λ de S_p , onde $S_p = \frac{S_w}{N-g}$;
- b) Calcula-se a média $\bar{\lambda}$ dos autovalores de S_p , dada por

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{Trace(S_p)}{n}; \quad (7)$$

- c) Constrói-se uma nova matriz de autovalores baseada na dispersão dos maiores valores entre cada autovalor λ_n e a média $\bar{\lambda}$, dada por

$$\Lambda^* = diag[max(\lambda_1, \bar{\lambda}), max(\lambda_2, \bar{\lambda}), \dots, max(\lambda_m, \bar{\lambda})]; \quad (8)$$

- d) Calcula-se a matriz de dispersão intraclasses modificada

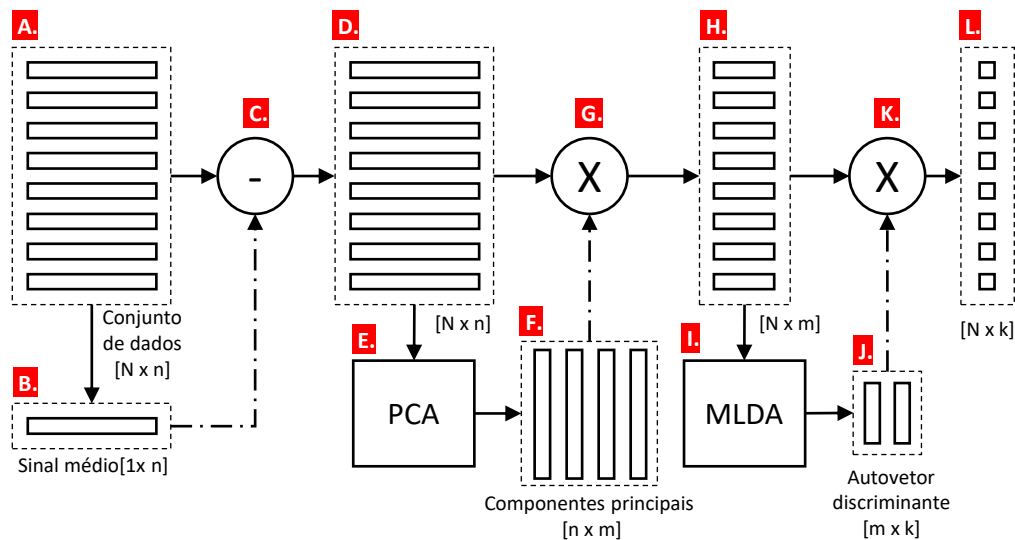
$$S_w^* = S_p^*(N - g) = (\Phi \Lambda^* \Phi^T)(N - g). \quad (9)$$

Após calculadas estas etapas, o método de MLDA é construído substituindo a matriz de dispersão S_w na Equação (6), pela matriz de dispersão modificada S_w^* , ajustando o critério de Fisher para aplicar a LDA quando o número de observações é limitado em comparação a dimensionalidade dos dados (TENORIO; THOMAZ, 2011).

A aplicação dos conceitos supracitados pode ser observada em um diagrama didático que é apresentado na Figura 22. Na primeira etapa de processamento deste modelo estatístico (*item A*) é selecionado o conjunto de treinamento de dimensão $[N \times n]$, que neste estudo será a matriz da saída da etapa de pré-processamento, com o sinal de rastreamento ocular de alguns indivíduos. Em seguida é calculado o vetor de sinal médio de todas as observações (*item B*) e subtraído de cada vetor do sinal pré-processado (*item C*), formando um conjunto de dados com média igual a

zero (*item D*). Na segunda etapa (*item E*) é calculada a matriz de transformação linear para obter a matriz de componentes principais $[n \times m]$ (*item F*), tal que $m = N - 1$. Deste modo usa-se todos os autovetores não-nulos obtidos da transformação linear. Na terceira etapa (*item G*) é feita uma multiplicação de matrizes $[N \times n] \times [n \times m]$ (dados com média zero \times autovetores não-nulos) e é obtida uma matriz com dimensionalidade reduzida $[N \times m]$ (*item H*). Na quarta etapa (*item I*) essa matriz reduzida é utilizada como entrada para calcular o autovetor discriminante do MLDA $[m \times 1]$ (*item J*). E, na quinta etapa (*item K*), é feita uma multiplicação de matrizes $[N \times m] \times [m \times 1]$ (matriz com as características mais expressivas \times autovetor discriminante) e é obtido o vetor com as características mais discriminantes ($[N \times 1]$) de cada um dos N vetores de entrada (*item L*).

Figura 22 – Diagrama da aplicação experimental do método PCA + MLDA

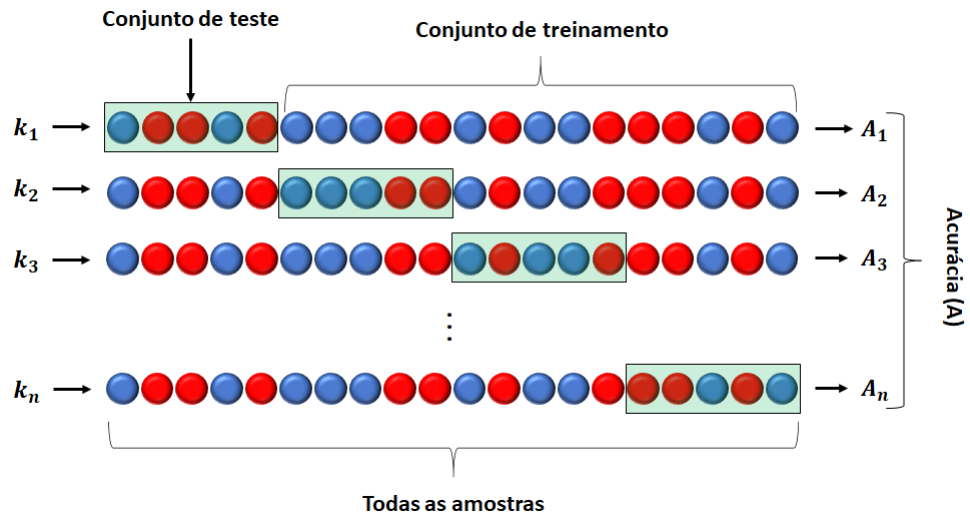


Fonte: Adaptado de Carlos E Thomaz et al. (2007)

2.7.4 Teste de desempenho

Para avaliar a capacidade de generalização e aferir a acurácia do modelo estatístico será utilizado o método k -fold de validação cruzada (BENGIO; GRANDVALET, 2004). Este método consiste em dividir o conjunto total de amostras em k subconjuntos exclusivos e de mesmo tamanho. A partir desta divisão é inicializado um teste de validação cruzada, em que um subconjunto é separado para o teste de validação e os demais subconjuntos são utilizados para o treinamento do classificador. Este processo é repetido k vezes, alterando o subconjunto de validação relacionado ao índice de k a cada iteração, como exemplificado na Figura 23.

Figura 23 – Exemplo de teste de validação cruzada com método k -fold



Fonte: Autor

Ao final das k iterações é calculada a acurácia do modelo apurando os erros encontrados em cada teste. E a acurácia final do classificador é dada por

$$A = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k A_k. \quad (10)$$

3 ANÁLISE DE PADRÕES VISUAIS EM TAREFAS DE LEITURA

Neste capítulo, são apresentados: um breve histórico das condições de estresse visual relacionadas a leitura de textos, um levantamento dos trabalhos relacionados, a proposta experimental implementada, o conjunto de materiais e métodos, resultados alcançados, discussão e as conclusões parciais relacionadas a este experimento.

3.1 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 1980, uma professora neozelandesa, chamada Olive Meares, pediu aos pesquisadores que considerassem o alto contraste de brilho nos textos impressos em preto branco, pois havia evidenciado que tal contraste poderia ser o principal fator que implicava nas dificuldades de leitura de algumas crianças atendidas em uma clínica de leitura. Segundo Olive Meares, as respostas das crianças sobre a percepção de uma página impressa indicavam a necessidade de pesquisas sobre o papel de fundo da impressão e sobre o contraste de brilho, que poderiam causar vários níveis de desconforto visual e até impedir o progresso na aprendizagem. Olive Meares ainda chamou a atenção para o fato de existirem poucos estudos que levassem em consideração a impressão do texto e sua possível interferência na leitura (MEARES, 1980).

Pouco tempo depois, ainda na década de 1980, Helen Irlen relatou a ocorrência de um distúrbio de processamento perceptivo decorrente da sensibilidade a certos comprimentos de onda da luz, que afetam adversamente a leitura e o desempenho de aprendizado relacionado. Segundo Helen Irlen (2005), essa baixa adaptabilidade à luz gera uma condição de Estresse Visual que resulta em uma série de distorções visuais durante tarefas de leitura, e que tais condições poderiam ser reduzidas por meio de sobreposições coloridas (*Overlays*) que filtram comprimentos de onda da luz visível.

As descobertas de Meares e Irlen deram origem a pesquisas relacionadas a condição de estresse visual que afeta, especificamente, a leitura e que inspiraram a realizar, nesta tese, o estudo experimental sobre padrões visuais de leitura utilizando um rastreador ocular.

3.1.1 ESTRESSE VISUAL

O estresse visual associado a dificuldade de leitura é abordado na literatura como uma síndrome, chamada Síndrome de Mears-Irlen, que é a união dos nomes das pesquisadoras que deram início aos estudos sobre esse assunto na década de 1980.

A Síndrome de Mears-Irlen, popularmente conhecida apenas como Síndrome de Irlen (SI), é definida como um transtorno de processamento perceptivo que afeta a capacidade de processar informações visuais (IRLEN, H., 2005), associada a uma condição de estresse visual que afeta várias habilidades humanas dependentes da visão, tais como ler, escrever, dirigir veículos e praticar esportes (SOARES; GONTIJO, 2016). Dentre essas habilidades, a leitura é a mais afetada, pois se torna lenta e descontínua, causando dificuldade de compreensão do texto, fadiga e cansaço visual (IRLEN, H., 2005).

Os efeitos da SI no processo de leitura podem estar relacionados a sensibilidade à luz, provocando distorções visuais devido ao alto contraste das letras pretas no fundo branco, seja em material impresso ou no computador (IRLEN, H., 2005; FARIA, 2011; GUIMARAES; GUIMARAES, 2013). Os sintomas podem ocorrer tanto em adultos como em crianças e são mais evidentes nos períodos de maior demanda de atenção visual, como nas atividades acadêmicas e profissionais que envolvem leitura por tempo prolongado (IRLEN, H., 2012; WHITING; ROBINSON, 2002).

Neste contexto, o estresse visual é caracterizado pela percepção de distorções visuais que normalmente nem o próprio indivíduo sabe descrever, pois a percepção visual é singular e, por consequência, não existem parâmetros de referência para comparação, o que faz com que as pessoas pensem que é algo normal e que todos enxergam da mesma forma. Por conta disso, muitos sintomas são detectados por ações comportamentais consequentes da condição de estresse visual, como, por exemplo, preferir ambientes com pouca luz, ter dificuldade de aprendizado incompatível com outras crianças e ter dificuldade em se manter atento e concentrado em algumas atividades (IRLEN, H., 2005, 2012).

Muitos indivíduos, mesmo sob efeito de estresse visual, podem ser bons leitores. Por exemplo, um indivíduo adulto, que tenha tido dificuldades na leitura desde a infância, precisou aprender como lidar com essa situação, possivelmente adotando estratégias que facilitassem a fluidez da leitura, como, por exemplo, diminuindo o contraste do material impresso usando livros e cadernos com páginas amarelas em vez de branca, lendo poucas páginas por vez ou fazendo intervalos durante a leitura (IRLEN, H., 2012).

Para os indivíduos que possuem dificuldade na leitura, produzir um texto é analogamente difícil, pois trata-se de uma tarefa que requer a revisão das palavras escritas constantemente (WILKINS; NEARY, 1991). Segundo Wilkins e Neary (1991), o padrão listrado formado pelas linhas do caderno pode produzir um efeito de estresse visual específico e adicional a tarefa de escrever, causando também a dificuldade de percepção da orientação da linha.

Em geral, existe uma variedade de sinais que indicam uma possível condição de estresse visual, como sensibilidade à luz, dificuldades para ler, dificuldades para escrever, desconforto visual, problemas de atenção e concentração, problemas com a percepção de profundidade e, principalmente, a percepção de distorções visuais (IRLEN, H., 2005, 2012).

3.1.1.1 Distorções visuais

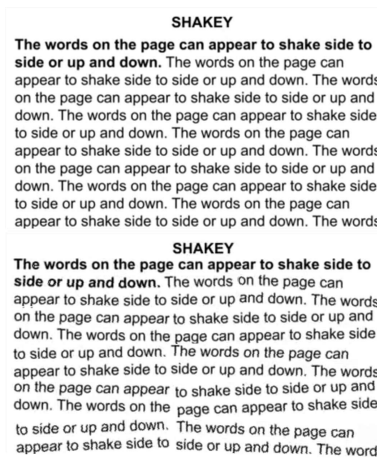
Muitas pessoas que sofrem com estresse visual em tarefas de leitura de textos fazem relatos semelhantes acerca das distorções visuais que enxergam, como ver o texto embaçado, desfocado, sem clareza e até se movendo. Baseado nesses relatos, foram desenvolvidas distorções sintéticas que ilustram as distorções visuais percebidas por quem possui SI (IRLENINSTITUTE, 2020). Estas distorções estão listadas abaixo e apresentados nas Figuras de 24 a 34 com a respectiva descrição na legenda.

- a) Blurry (traduzido para português: *borrado*);
- b) Floating (traduzido para português: *flutuando*);
- c) Halo (traduzido para português: *círculo ao redor*);
- d) Ripple (traduzido para português: *ondulação*);
- e) Rivers (traduzido para português: *rios*);
- f) SeeSaws (traduzido para português: *gangorra*);
- g) Shaky ou Shakey (traduzido para português: *trêmulo*);
- h) Star Wars (alusão ao efeito da legenda do filme Star Wars);
- i) Swirl (traduzido para português: *redemoinho*);
- j) Washout (traduzido para português: *embaçado/lavado*);
- k) Wave ou Wavy (traduzido para português: *onda*).

3.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Segundo Helen Irlen (2005), a condição de estresse visual associada a leitura é provocada por estímulos luminosos com determinados comprimentos de onda que afetam a capacidade do cérebro de processar a informação visual adequadamente e que os sintomas decorrentes podem ser tratados anulando os efeitos desses estímulos luminosos com o auxílio de sobreposições coloridas. Baseado nisso, a proposta do método de Irlen é utilizar sobreposições e lentes coloridas para filtrar alguns comprimentos de onda do espectro de luz visível e, conseqüentemente, melhorar a capacidade do cérebro de processar informações visuais (IRLEN, H., 2005).

Figura 30 – Distorção visual com efeito Shaky ou Shakey



Fonte: Adaptado do Instituto Irlen (2023)

Legenda: As letras e palavras ficam trêmulas e instáveis, como se a página estivesse vibrando

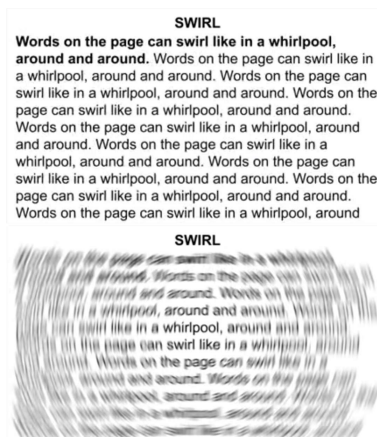
Figura 31 – Distorção visual com efeito Stars War



Fonte: Adaptado do Instituto Irlen (2023)

Legenda: Algumas linhas do texto parecem mais distantes que outras, como se a página estivesse em perspectiva

Figura 32 – Distorção visual com efeito Swirl



Fonte: Adaptado do Instituto Irlen (2023)

Legenda: As letras e palavras ao redor do foco parece que se movem como um redemoinho

fundo branco as vezes se estendem a outros ambientes, como a lousa de uma sala de aula, um cartaz, uma faixa exposta em uma rua, o letreiro de um ônibus e diversos outros estímulos visuais.

As cores das lentes coloridas ou filtros espectrais normalmente não são as mesmas do overlay pois envolvem a adaptação à luminosidade de variadas fontes em vez de um único fundo branco da página de um texto. Ao utilizar uma lente colorida o indivíduo inicia um processo de adaptação de percepção, ajustando-se às novas condições de cor que são expandidas para todo ambiente (IRLENINSTITUTE, 2020).

Segundo Helen Irlen (2012), a causa da síndrome de Irlen é uma dificuldade do cérebro em processar informação visual. No entanto, não há evidências na literatura que comprovem essa afirmação, inclusive ainda pouco se sabe sobre os processos cognitivos responsáveis pela visão.

Alguns trabalhos baseados em análise de imagem cerebral por meio de magnetoencefalografia (MEG) (LEWINE et al., 1997) e ressonância magnética funcional (fMRI) (CHOUINARD et al., 2012; KIM et al., 2015) mostram evidências de que há uma ativação cerebral em áreas distintas do cérebro quando o indivíduo usa ou não um filtro colorido. No entanto, essas ativações são discutidas e relacionadas ao efeito dos estímulos, que é alterado com o uso das lentes, mas não são relacionadas à causa da SI.

Alguns estudos que investigaram, especificamente, a origem da SI, mostram algumas evidências por meio de análises de percepção da luz e análises bioquímicas. Em um estudo sobre a adaptação ao escuro, Carroll, Mullaney e Eustace (1994) encontraram evidências de que um grupo de leitores disléxicos ou com SI apresentaram limiares de adaptação ao escuro menores que um grupo de controle, com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$), indicando que há um déficit na via visual que pode começar no nível da haste da retina, que envolve a via magnocelular e se estende ao córtex visual.

Em uma análise bioquímica, Robinson et al. (2001) encontraram evidências de variações significativas nos lipídios e aminoácidos urinários e ácidos orgânicos entre indivíduos diagnosticados com SI, sugerindo que algumas anomalias no fluxo sanguíneo possam ser provenientes de mau funcionamento neural.

Em outro estudo descrito, Sparkes et al. (2003) mostraram que o colesterol plasmático total diminuiu significativamente ($p < 0,05$) em crianças com SI comparadas ao grupo controle, com 85% dos indivíduos com SI com níveis de colesterol abaixo da média do grupo de controle. A análise do baixo nível de colesterol pode indicar um problema nas células magnocelulares, pois são células altamente mielinizadas e, no cérebro humano, o colesterol é um componente significativo, com a maior parte desse colesterol sendo encontrada na mielina. Segundo Loe

e Watson (2012), esses níveis reduzidos de colesterol podem levar a respostas fotorreceptoras iniciadas com rodopsina à luz e assim serem um fator nos sintomas de foto-hipersensibilidade relatado na SI.

Em todos esses estudos descritos que envolvem a etiologia da Síndrome de Irlen, os autores reconhecem que os resultados são inconclusivos e que faltam evidências mais robustas para indicar a origem da SI. Todos concordam que são necessários mais estudos sobre esse problema, pois pode haver uma variedade de sintomas, e mesmo quando os sintomas são semelhantes, pode haver uma doença coexistente e pode haver uma grande diferença nas causas.

Na literatura acadêmica, há um consenso de que existe uma condição de estresse visual que afeta diretamente as tarefas de leitura. No entanto, não é possível detectar o estresse visual por meio de exames oftalmológicos de rotina ou por exames optométricos, quantitativos e mensurais (MONGER; WILKINS; ALLEN, 2015). Os métodos comumente utilizados são baseados na análise de uma série de sintomas, como desconforto visual, sensibilidade ao contraste, sensibilidade a padrões listrados e percepção de distorção visual, todos não diretamente mensuráveis. E baseados na melhoria do desempenho de leitura após a utilização de uma sobreposição colorida. Esses métodos são baseados na escala perceptual de leitura de Irlen (IRPS) e no teste de taxa de leitura de Wilkins (RRT) (IRLEN, H., 2005; WILKINS et al., 1996).

No entanto, as questões da triagem de Irlen são consideradas subjetivas, como questões sobre ter problemas de atenção, concentração ou dificuldade de leitura, que podem ser também os sintomas de outras doenças coexistentes. Além disso, o re-teste com sobreposições coloridas vai de encontro com o tratamento, ou seja, torna o processo de diagnóstico dependente do processo de tratamento. Por exemplo, segundo Hollis e Allen (2006), avaliar o padrão de brilho e de distorção perceptiva imediatamente antes da medir a preferência de cores e a velocidade de leitura é um método mais significativo de determinar se o uso de uma sobreposição colorida seria benéfico para quem sente desconforto ao ler.

Atualmente, há um consenso de que é necessário o desenvolvimento de um método de diagnóstico mais preciso. Inclusive Nichols et al. (2009), ainda em 2009, sugeriram a criação de um teste "padrão ouro" para detectar a Síndrome de Irlen como a primeira parte de um processo de triagem de dificuldade de leitura, que poderia segregar melhor as pessoas com outras deficiências como dislexia, dispraxia e transtorno do déficit de atenção e hiperatividade (TDAH). Por exemplo, o tratamento com sobreposições coloridas é amplamente discutido na literatura, mas os resultados apresentados mais recentemente são, em muitos casos, controversos. Embora tenham sido apresentadas algumas evidências iniciais de desempenho de leitura (O'CONNOR

et al., 1990; EVANS; JOSEPH, 2002; NOBLE et al., 2004), tais evidências parecem não suportar a eficácia dos filtros espectrais quando avaliadas a longo prazo, mostrando pouca ou nenhuma diferença de desempenho entre indivíduos que usam ou não as sobreposições coloridas (RITCHIE; DELLA SALA; MCINTOSH, 2011, 2012; HENDERSON; TSOGKA; SNOWLING, 2013).

Algumas evidências mostram que os benefícios das sobreposições coloridas são imediatos, mas atingem um efeito platô após alguns meses (ROBINSON; CONWAY, 2000; NOBLE et al., 2004). Além disso, foi observado que muitas pessoas deixam de usar as sobreposições coloridas a longo prazo (WALDIE; WILKINS, 2004). Por outro lado, não se pode afirmar que o uso de lentes coloridas é inútil a todos os pacientes as quais foram prescritas. O abandono do tratamento sugere que o diagnóstico foi mal realizado ou que a dificuldade de leitura experimentada pelo indivíduo não é tão acentuada (EVANS; ALLEN; WILKINS, 2017). Segundo Garcia, Santos e Vilhena (2017), crianças com desconforto visual grave durante a leitura parecem se beneficiar mais do uso dos filtros espectrais do que as crianças com desconforto visual leve.

3.2.1 Considerações gerais

Ao longo de mais de 40 anos de pesquisa sobre a Síndrome de Irlen, marcado desde o primeiro registro em 1980, foram feitos avanços científicos, mas ainda não há um consenso sobre a etiologia, nem sobre o diagnóstico e nem sobre o tratamento da Síndrome de Irlen.

Dentre os trabalhos relacionados, foi possível perceber que a maioria (70%) abordava os efeitos do tratamento com sobreposições coloridas, todos com protocolos experimentais muito semelhantes, com teste de leitura sem sobreposição seguido de um teste de leitura com sobreposição. Os estudos sobre a etiologia e o diagnóstico ocorreram em menor quantidade (18% e 12%, respectivamente) e, igualmente, não produziram evidências suficientes para indicar a origem da SI ou um método preciso de diagnóstico.

Embora nos últimos anos tenha sido crescente o número de pesquisas sobre a Síndrome de Irlen, foi observado que houve uma diminuição de estudos experimentais ao longo do tempo, apenas 18% deles ocorreram nos últimos 10 anos. Em contrapartida, foram feitos muitos trabalhos de revisão da literatura e de estudos de caso.

Em linhas gerais, a origem do estresse visual que afeta a habilidade de leitura é uma questão em aberto e ainda não resolvida pelo arcabouço de conhecimentos científicos já estruturados. Neste cenário, algumas lacunas de pesquisa são evidentes: 1) as condições de estresse visual

relatadas durante tarefas de leitura não são detectadas em exames oftalmológicos (MONGER; WILKINS; ALLEN, 2015); 2) existem poucos trabalhos na literatura que exploram métodos de diagnóstico de estresse visual, sendo o método de Irlen (IRLEN, H. L., 1990) e o colorímetro intuitivo de Wilkins (WILKINS, Arnold J, 1995) praticamente os únicos; 3) não há um consenso sobre a eficácia dos métodos diagnósticos comumente usados (NICHOLS et al., 2009); e 4) existem poucos estudos sobre estresse visual que utilizam o rastreamento do olhar humano como método de análise em tarefas de leitura.

3.3 EXPERIMENTO

Considerando a delimitação do tema apresentada nas seções anteriores, foi realizado um experimento perceptivo envolvendo a captura de sinais de movimento ocular a partir de simulações de distorções visuais comumente relacionadas à SI, como embaçamento das letras e sensação de texto borrado e desfocado. O objetivo principal deste experimento é entender melhor como é o padrão visual de leitura de indivíduos que possuem os sintomas de estresse visual, bem como analisar se existe diferença entre cada tipo de padrão visual gerado. Mais especificamente, neste experimento:

- a) foi desenvolvido um algoritmo para gerar estímulos artificiais que simulam computacionalmente distorções visuais percebidas por pessoas diagnosticadas com SI;
- b) foi realizado um experimento com rastreamento ocular utilizando essas distorções visuais simuladas com o propósito de coletar sinal visual correspondente;
- c) foi criada uma base de dados composta de imagens de padrões visuais de leitura extraídos do rastreador ocular em textos com tais distorções;
- d) foi implementado um arcabouço computacional para reconhecer os padrões visuais de leitura automaticamente.

3.3.1 Projeto experimental

Uma visão completa da concepção do projeto e aplicação do protocolo experimental pode ser vista no vídeo disponibilizado no link a seguir: <https://x.gd/pv0MC>

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será apresentado o conjunto de materiais e métodos utilizados na realização do experimento em quatro subseções: estímulo visual; participantes; aquisição do sinal; e processamento do sinal.

3.4.1 Estímulo visual

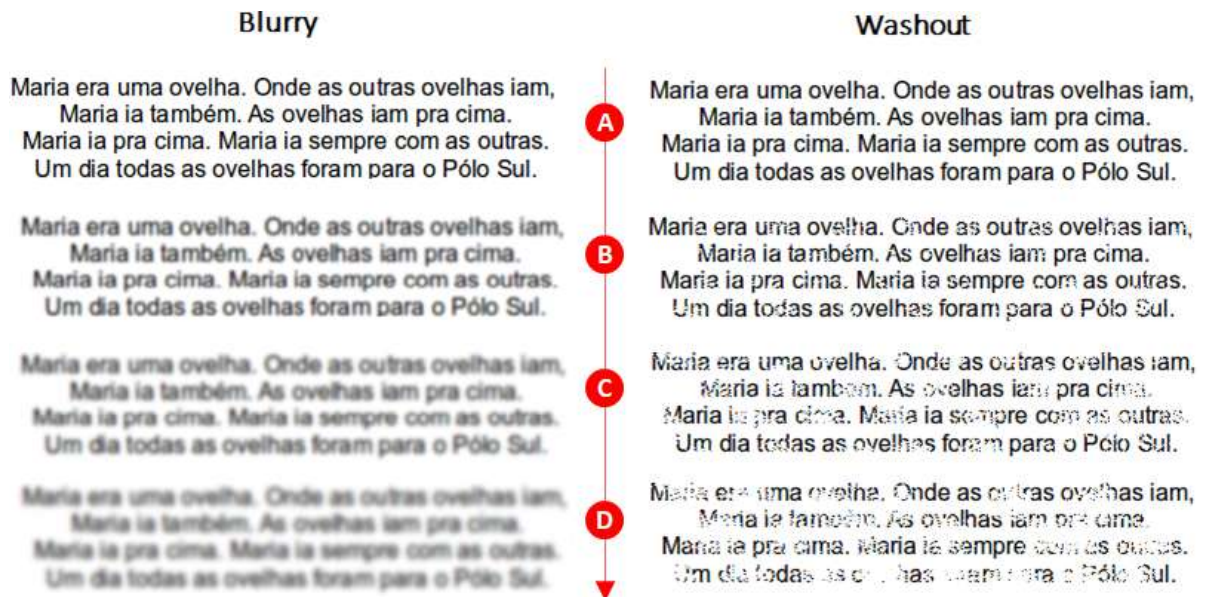
Na primeira etapa deste estudo foi desenvolvido um algoritmo para gerar estímulos artificiais que simulam as distorções visuais que uma pessoa diagnosticada com a SI supostamente visualiza ao ler um texto estático (IRLEN, H. L., 1990; IRLINSTITUTE, 2020). A proposta deste algoritmo é transformar a visualização de um texto estático em distorções dinâmicas analogamente à sensação relatada pelas pessoas que percebem distorções visuais, como a sensação de ver o texto se movendo.

Para desenvolver as distorções visuais foi utilizado uma plataforma de processamento de dados (*RStudio*) que permite elaborar gráficos dinâmicos. O algoritmo desenvolvido possui basicamente 4 etapas: na primeira etapa é feito o processamento dos parâmetros de entrada, com a inserção do texto a ser exibido, o tipo da fonte, a cor, o tamanho e a transformação do texto em imagem; na segunda etapa é utilizada a biblioteca *magick* para criar distorções estáticas, transformando a imagem do texto em um dos efeitos da SI; na terceira etapa é utilizado a biblioteca *ggplot2* para unir as distorções em diferentes graus em uma animação dinâmica; e na quarta etapa é exportado o efeito dinâmico no formato **gif** ou **avi**. A seguir é apresentado um pseudocódigo (Algoritmo 1) que descreve o procedimento utilizado para gerar os efeitos mostrados na Figura 35.

Algoritmo 1 – Pseudocódigo para geração dos efeitos

- 1 **Entradas:** Texto, Tamanho da fonte, Tipo da fonte, Cor da fonte, Tipo de efeito, Intensidade do efeito (σ) e Tempo de duração (τ)
- 2 **Leia:** Parâmetros de entrada
- 3 **Início**
- 4 Organiza variáveis de configuração
- 5 Imprime imagem raiz
- 6 Aplica efeito de animação com "ImageMagick"
- 7 Agrupa imagens com efeito de animação
- 8 Renderiza vídeo da animação
- 9 **Fim**
- 10 **Saída:** Texto com efeito dinâmico no formato .avi

Figura 35 – Efeitos codificados



Fonte: Autor

Legenda: a) Imagem original (sigma = 0); B) Texto levemente distorcido (sigma = 1); c) Texto moderadamente distorcido (sigma = 1.5); d) Texto severamente distorcido (sigma = 2) (ROMERA et al., 2019)

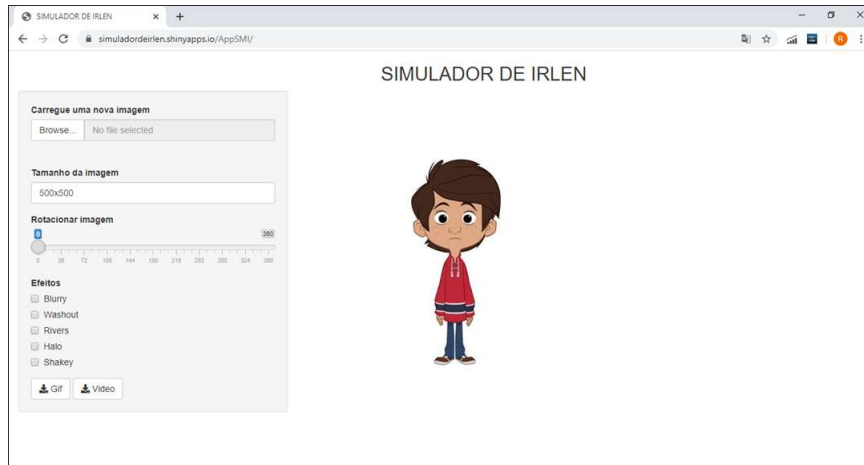
Para cada efeito codificado é utilizado um parâmetro (sigma) que indica a intensidade do efeito aplicado (quanto maior o valor de sigma, maior é a intensidade do efeito) e um parâmetro (tau) que indica o tempo de ciclo do efeito. A partir destes parâmetros a distorção visual é alterada dinamicamente, se intensificando e retornando ao texto original gradativamente, como os exemplos apresentados na Figura 35 que possuem valores de sigma variando entre zero (texto neutro) e dois (texto com maior distorção).

3.4.2 Simulador de distorções visuais

Com o objetivo de facilitar a criação de novos estímulos visuais e permitir que outras pessoas possam gerar efeitos que simulem uma condição de estresse visual a partir de seus próprios textos, foi desenvolvido e disponibilizado publicamente um simulador de distorções visuais.

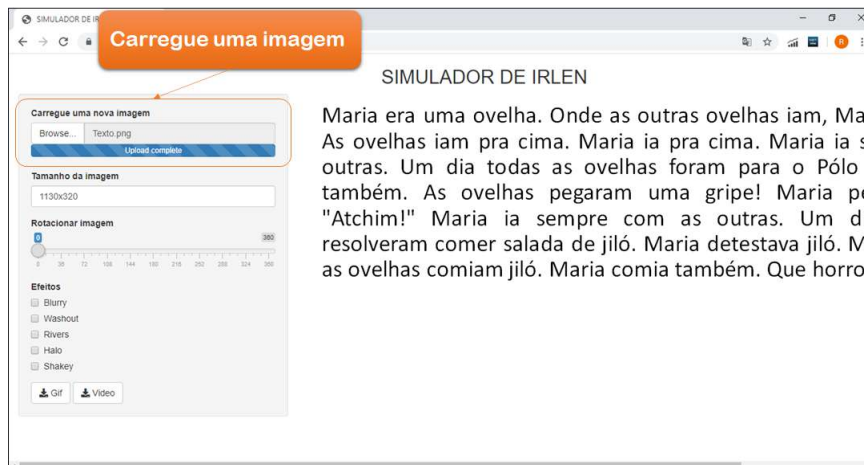
O simulador foi desenvolvido sobre a mesma plataforma (*RStudio*), mas foi desenhado para uma aplicação *web* com o processamento na nuvem. Para isso foi utilizado a biblioteca *Shiny* que permite a criação de aplicações interativas com processamento direto no servidor (*shiny.rstudio.com*). Uma sequência de ilustrações sobre o funcionamento deste simulador é apresentada nas Figuras 36 a 41.

Figura 36 – Simulador: tela inicial



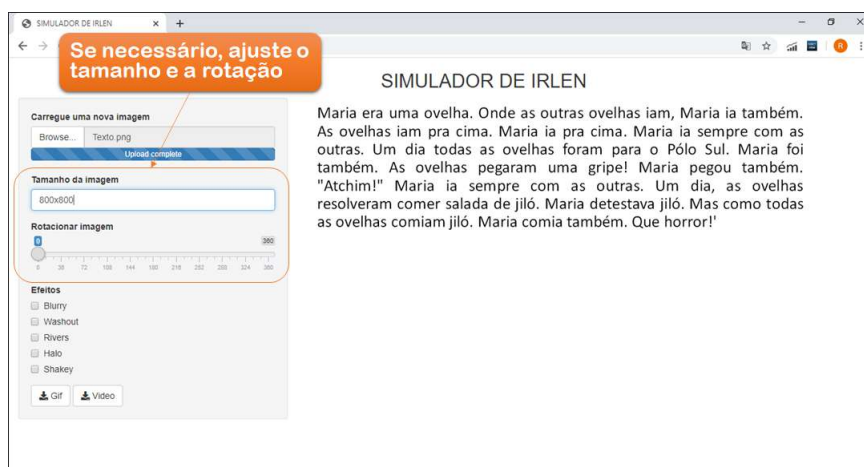
Fonte: Autor

Figura 37 – Simulador: carregando uma imagem



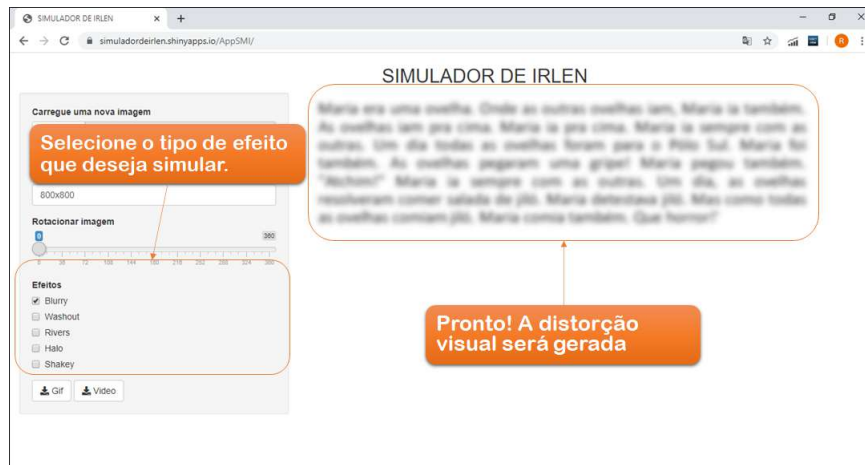
Fonte: Autor

Figura 38 – Simulador: ajuste do tamanho e da rotação



Fonte: Autor

Figura 39 – Simulador: seleção das distorções visuais



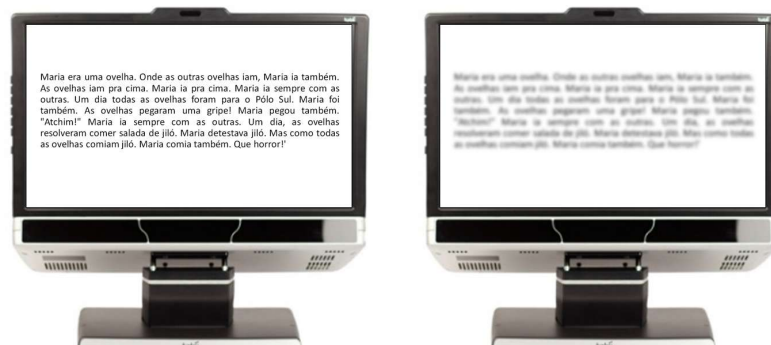
Fonte: Autor

Figura 40 – Simulador: armazenamento do efeito gerado



Fonte: Autor

Figura 41 – Distorção visual simulada na tela do equipamento de rastreamento ocular



Fonte: Autor

Legenda: À esquerda é apresentado o início do efeito com o texto sem distorção e à direita é apresentado o texto com a distorção selecionada. Esses efeitos se alternam dinamicamente durante a apresentação na tela do equipamento

A versão de teste deste simulador¹ está disponível em : <https://x.gd/GwsRL>

¹A versão do simulador disponível para processamento na nuvem é somente para teste e contempla apenas a codificação do efeito Blurry.

3.4.3 Participantes

Um total de 70 pessoas participaram deste estudo de forma voluntária, sendo 30 homens e 40 mulheres, com idades entre 8 e 52 anos. Todos os indivíduos tinham visão normal ou corrigida para normal. O consentimento informado por escrito foi obtido de todos os sujeitos.

3.4.4 Protocolo experimental

As distorções visuais simuladas foram utilizadas em um experimento de leitura para registrar os movimentos oculares de indivíduos voluntários que supostamente não possuem a SI, compondo uma amostra de dados quantificados de regressões, fixações, fluência na leitura e outras variáveis que juntas permitem a concepção de um padrão visual sintético para cada efeito da SI.

O experimento foi realizado com 3 estímulos visuais, sendo um estímulo **Neutro** (sem distorção) e dois estímulos com distorções visuais, **Blurry** e **Washout**. Um exemplo destas distorções podem ser visualizadas nas Figuras anteriores, 24 e 33, respectivamente.

Os estímulos visuais foram desenvolvidos a partir de histórias da literatura infantil com perguntas literais e inferenciais, que foram apresentadas na tela do equipamento de rastreamento ocular durante as sessões de leitura.

3.4.5 Aquisição do sinal

A preparação inicial para realizar a aquisição do sinal ocorreu conforme protocolo experimental descrito na seção 2.5. Em seguida o experimento foi iniciado com as instruções sendo exibidas na tela do equipamento e após compreender as instruções o próprio participante dá início a exibição dos estímulos pressionando qualquer tecla do teclado disposto a sua frente. Foram apresentados três textos distintos na tela do equipamento de rastreamento de olhar: o primeiro sem efeito (Neutro), o segundo com o efeito borrado (Blurry) e o terceiro com o efeito embaçado (Washout). Ao final da apresentação de cada texto é exibida uma pergunta na tela e o voluntário deveria respondê-la em voz alta para que fossem anotados os acertos e erros em cada texto. O objetivo destas perguntas era apenas para saber se o voluntário estava concentrado na tarefa de leitura. Os textos possuíam tempo limite de exposição (30 segundos), ao passo que as perguntas não possuíam tempo limite. Após a exibição de todos os textos e perguntas,

o experimento é encerrado com uma tela de agradecimentos e é apresentado ao voluntário o resultado do seu rastreamento ocular.

3.4.5.1 *Reprodutibilidade experimental*

A reprodução experimental e coleta de sinal de novos voluntários usando o Tobii Studio podem ser feitas a partir do projeto que está disponível no link a seguir: <https://x.gd/6pNhh>

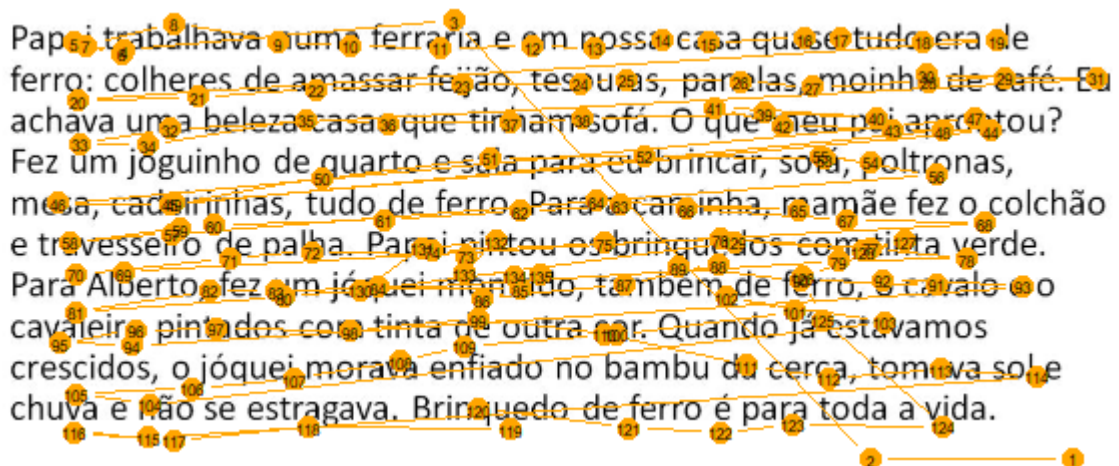
3.4.6 **Análise de dados**

Ao final da etapa de aquisição do sinal, os dados foram organizados e pré-processados para formatar um conjunto de dados apropriados. Nesta etapa são analisadas as perdas de sinal e realizadas as respectivas reconstruções dos intervalos de perda, sempre que necessário (ORSI; FABBRO; THOMAZ, 2019).

O rastreador ocular, Tobii TX300, exporta 86 tipos de variáveis (TOBII, 2016), das quais utilizamos 11, que são as seguintes: RecordingName, MediaName, FixationIndex, SaccadicAmplitude, AbsoluteSaccadicDirection, FixationPointX, FixationPointY, PupilLeft, PupilRight, GazeEventDuration e LocalTimeStamp.

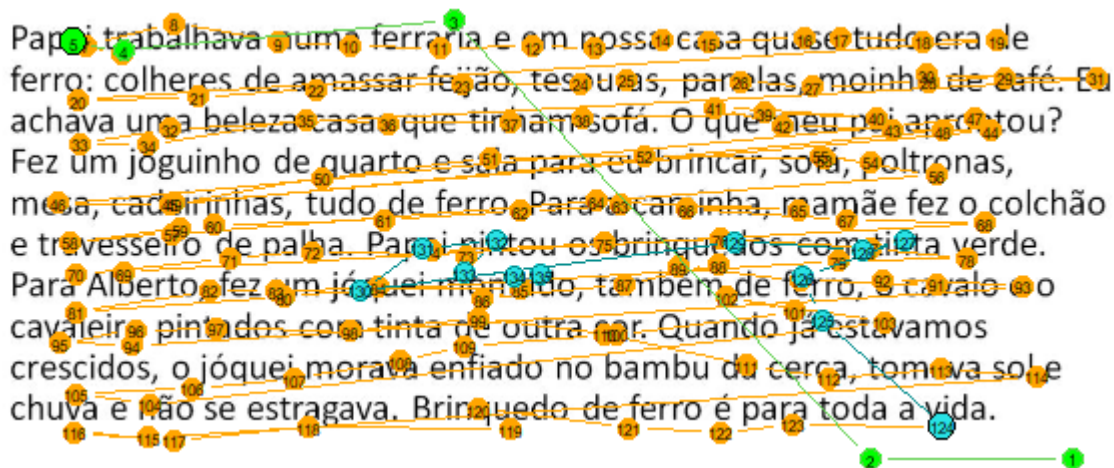
A partir dessas variáveis, calculamos 16 parâmetros de leitura e obtivemos 1 mapa de atenção visual, que leva em consideração as coordenadas dos movimentos oculares durante a leitura, conhecidas como fixações e sacadas. Na Figura 42, ilustramos um exemplo de tais fixações e sacadas coletadas de um dos sujeitos durante sua primeira atividade de leitura (sem efeito simulado).

Figura 42 – Sinal completo, com todas as fixações e sacadas



Inicialmente foi necessário desenvolver um filtro para retirar algumas fixações indesejadas, pois no início da tarefa de leitura, quando o sujeito recebe o texto, ocorrem alguns movimentos oculares iniciais que tiram o foco do olhar, que pode estar em qualquer lugar da tela, até a primeira palavra do texto. Da mesma forma, ao terminar de ler a última palavra do texto, ocorre uma dispersão dos movimentos oculares, conforme ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Fixações iniciais e finais



Fonte: Autor

Como pode ser visto na Figura 43, as 4 primeiras fixações, destacadas na cor verde, são movimentos oculares de localização espacial em que o sujeito procura o início do texto. Neste exemplo, podemos considerar que os movimentos oculares de leitura ocorreram efetivamente entre a 5ª e a 124ª fixação. Após a 124ª fixação, é possível observar a dispersão do olhar até o final do período de atividade, com as fixações destacadas na cor azul. Isso mostra que ao longo da aquisição do sinal há movimentos oculares prévios e posteriores a tarefa de leitura que devem ser removidos.

Com o software Tobii Studio é possível identificar e remover essas fixações manualmente, criando recortes no mapa de atenção visual entre a fixação na primeira e na última palavra do texto. Porém, devido ao grande volume de dados não era viável fazê-lo manualmente, tanto pelo custo da operação quanto pela possibilidade de erro humano. Dessa forma, foi desenvolvido um filtro, denominado filtro de leitura, que detecta a primeira fixação na primeira palavra e a última fixação na última palavra do texto, extraíndo apenas o sinal ocular entre esse intervalo. O resultado deste filtro pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 – Sinal filtrado, sem fixações iniciais e finais

Papai trabalhava numa ferraria e em nossa casa quase tudo era de ferro: colheres de amassar feijão, tesouras, panelas, moinhas de café. Eu achava uma beleza casa que tinham sofá. O que meu pai aprontou? Fez um joguinho de quarto e sala para eu brincar, sofá, poltronas, mesa, cadeirinhas, tudo de ferro. Para a carinha, mamãe fez o colchão e travesseiro de palha. Papai pintou os brinquedos com tinta verde. Para Alberto, fez um jóquei mentido, também de ferro, e cavalo o cavaleiro pintados com tinta de outra cor. Quando já estávamos crescidos, o jóquei morava enfiado no bambu da cerca, tomava sol e chuva e não se estragava. Brinquedo de ferro é para toda a vida.

Fonte: Autor

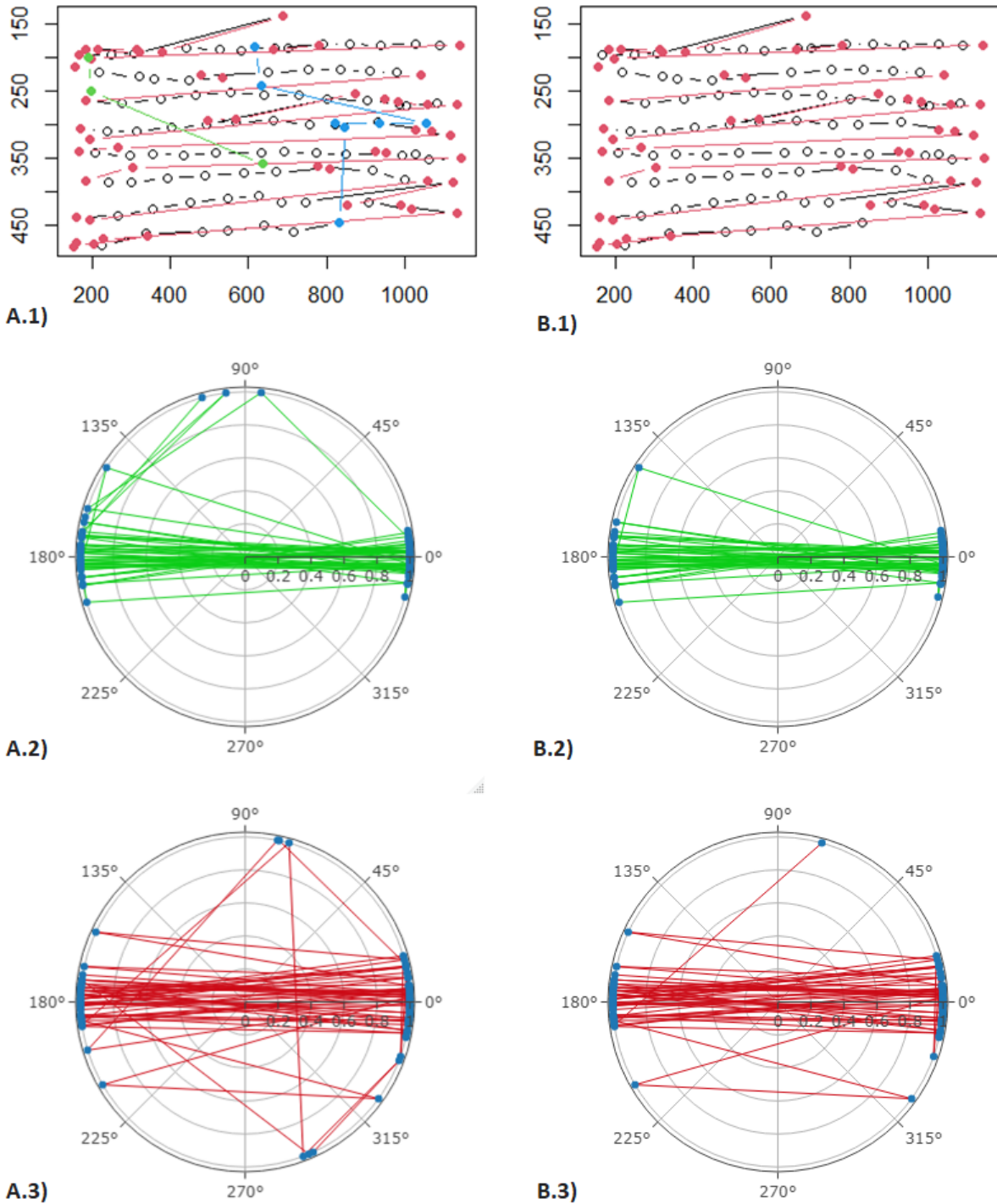
A partir dos dados filtrados de leitura, foram calculados os seguintes parâmetros de leitura:

- a) **Número de progressões:** Este parâmetro foi obtido a partir de um contador de progressões que verifica e conta cada fixação ocorrida no sentido da leitura, da esquerda para a direita (alfabeto latino). Esse parâmetro pode explicar a fluidez da leitura, sendo mais fluidas as leituras com poucas progressões e menos fluidas as leituras com excesso de progressões.
- b) **Número de regressões:** Este parâmetro foi obtido a partir de um contador de regressão que verifica e conta cada fixação ocorrida no sentido contrário da leitura, da direita para a esquerda. Em uma leitura fluida, as regressões normalmente ocorrem apenas no final de cada linha, em que o leitor precisa fazer um movimento de olhos para localizar a próxima palavra no início da próxima linha, ou seja, em um texto com 10 linhas, devem ocorrer apenas 9 regressões. Além disso, podem ocorrer regressões entre as palavras indicando que o leitor teve que repetir a leitura para compreender o que foi escrito. Neste caso quanto maior o número de regressões menos fluída é a leitura.
- c) **Amplitude média das progressões:** A partir da identificação de cada progressão, foi calculado o deslocamento do olhar entre cada fixação. Chamada de sacadas, esses movimentos mostram a fluidez da leitura que pode ser desde sacadas entre cada palavra até várias sacadas curtas nas mesmas palavras, como se o indivíduo estivesse lendo letra por letra. Esse parâmetro pode explicar como o leitor reconhece as palavras e avança durante a tarefa de leitura.

- d) **Média angular das progressões:** Durante a leitura foi possível perceber que alguns sujeitos fixam o olhar no topo de cada palavra, outros fixam na base de cada palavra e outros variam entre o topo e a base de cada palavra, então foi feito um mapeamento angular dos movimentos de leitura para observar esse comportamento. Conforme pode ser observado nos diagramas A.2 e B.2 da Figura 45, o ângulo das progressões ocorre em torno de 0° com faixa de variação de cerca de 15° . Neste caso, espera-se que a média angular fique próxima de 0° e que movimentos inusitados na leitura, como desvios ou características específicas da leitura, possam ser detectados por influenciar a direção angular média. Este parâmetro pode explicar se os movimentos de progressão são coerentes com os movimentos de leitura.
- e) **Média angular das regressões:** De forma análoga ao mapeamento de progressão, este parâmetro calcula a média angular das regressões. Como pode ser observado nos diagramas A.3 e B.3 da Figura 45, o ângulo das regressões ocorre em torno de 180° com faixa de variação de cerca de 20° . Observa-se que a variância angular das regressões é naturalmente maior que a das progressões, pois ao terminar a leitura de cada linha há um movimento dos olhos até a primeira palavra da linha subsequente. Este movimento é caracterizado por um aumento na amplitude e no ângulo relativo da regressão. Este parâmetro pode explicar se os movimentos de regressão são coerentes com os movimentos de leitura.
- f) **Varição angular das progressões:** Adicional ao parâmetro da média angular, a medição da variância pode indicar desvios ou características específicas de leitura mesmo que a média angular esteja próxima de 0° .
- g) **Varição angular das regressões:** Geralmente a variância angular das regressões é maior que a variância das progressões, pois há movimento dos olhos entre as linhas. Entretanto, a medição da variância pode indicar desvios ou características específicas da leitura mesmo que a média angular esteja próxima de 180° .
- h) **Número de desvios:** Desvios são movimentos oculares considerados irregulares, ou seja, movimentos oculares com direção angular fora do eixo vertical com margem de 15° nas progressões e margem de 20° nas regressões. Desta forma, todos os movimentos oculares com direção angular entre 15° e 160° ou entre 200° e 345° são contabilizados como desvios. Esse parâmetro pode explicar se o leitor perde o foco na leitura em torno de cada palavra ou se perde a localização espacial das palavras durante a leitura.

- i) **Amplitude média dos desvios:** A partir da identificação de cada desvio, foi calculado o deslocamento do olhar entre cada fixação. Esse parâmetro pode explicar se os movimentos irregulares giram em torno das palavras, quando a amplitude média é relativamente pequena, ou se há dispersão do olhar entre as linhas, quando a amplitude média é relativamente grande.
- j) **Conclusão da leitura:** Este parâmetro indica se o leitor fez movimentos oculares que percorrem todo o texto, da primeira à última palavra. Por se tratar de um experimento automatizado, este parâmetro foi desenvolvido para detectar se algum leitor não conseguiu concluir a leitura no tempo estipulado.
- k) **Tempo de leitura:** Este parâmetro foi obtido calculando o tempo que o leitor levou para percorrer todas as palavras entre a primeira e a última palavra do texto. Considerando que o leitor obteve a pergunta inferencial logo após a leitura do texto, esse parâmetro pode explicar a fluidez da leitura.
- l) **Duração média de cada fixação:** Este parâmetro foi obtido contando o tempo de todas as fixações dividido pelo número de fixações durante a leitura. Esse parâmetro pode explicar a capacidade do leitor de reconhecer palavras.
- m) **Variação do tempo de cada fixação:** A partir da medição do tempo de cada fixação, é possível observar se existem diferenças para reconhecer determinadas palavras. Entretanto, em textos com vocabulário comum e de fácil leitura, como os utilizados neste experimento, espera-se perceber baixa variação no tempo de cada fixação. Esse parâmetro pode explicar a dificuldade de reconhecer determinadas palavras, seja pela característica da palavra, seja pela sua posição no texto.
- n) **Número de fixações por palavra:** Este parâmetro foi obtido a partir do número total de fixações durante a leitura dividido pelo número de palavras contidas no texto. Este parâmetro pode explicar a fluidez da leitura, sendo a leitura com menos fixações mais fluida e a leitura com muitas fixações menos fluida.
- o) **Variância pupilar:** Este parâmetro foi obtido medindo o diâmetro pupilar durante a tarefa de leitura. Levando em consideração que a luminosidade do ambiente onde o experimento foi realizado permaneceu constante, a percepção de mudanças no diâmetro pupilar pode indicar mudanças no estado de atenção do indivíduo. Esse parâmetro pode explicar se o leitor teve dificuldade para ler o texto e o nível de esforço mental que a tarefa exigiu dele (ORSI, 2018).

Figura 45 – Comparação dos parâmetros de leitura sem filtro e filtrados



Fonte: Autor

Legenda: A.1) Movimentos oculares com todas as fixações (sem filtro). A.2) Mapeamento angular de todas as progressões. A.3) Mapeamento angular de todas as regressões. B.1) Movimentos oculares sem fixações pré e pós-leitura (filtradas). B.2) Mapeamento angular de progressões de leitura. B.3) Mapeamento angular das regressões de leitura.

Figura 46 – Progressões do olhar

Papai trabalhava numa ferraria e em nossa casa quase tudo era de ferro: colheres de amassar feijão, tesouras, panelas, moinho de café. Eu achava uma beleza casas que tinham sofá. O que meu pai prontou? Fez um joguinho de quarto e sala para eu brincar, sofá, poltronas, mesa, cadeirinhas, tudo de ferro. Para a caminha, mamãe fez o colchão e travesseiro de palha. Papai pintou os brinquedos com tinta verde. Para Alberto, fez um jóquei montado, também de ferro, o cavalo e o cavaleiro pintados com tinta de outra cor. Quando já estávamos crescidos, o jóquei morava enfiado no bambu da cerca, tomava sol e chuva e não se estragava. Brinquedo de ferro é para toda a vida.

Fonte: Autor

Legenda: Movimentos oculares da esquerda para a direita

Figura 47 – Regressões do olhar

Papai trabalhava numa ferraria e em nossa casa quase tudo era de ferro: colheres de amassar feijão, tesouras, panelas, moinho de café. Eu achava uma beleza casas que tinham sofá. O que meu pai prontou? Fez um joguinho de quarto e sala para eu brincar, sofá, poltronas, mesa, cadeirinhas, tudo de ferro. Para a caminha, mamãe fez o colchão e travesseiro de palha. Papai pintou os brinquedos com tinta verde. Para Alberto, fez um jóquei montado, também de ferro, o cavalo e o cavaleiro pintados com tinta de outra cor. Quando já estávamos crescidos, o jóquei morava enfiado no bambu da cerca, tomava sol e chuva e não se estragava. Brinquedo de ferro é para toda a vida.

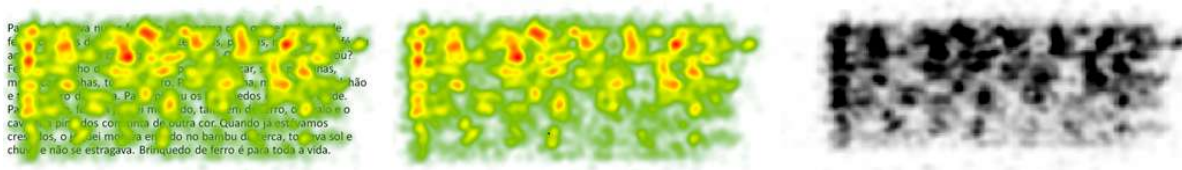
Fonte: Autor

Legenda: Movimentos oculares da direita para a esquerda

A partir das coordenadas do tempo de cada fixação, também foi obtido um mapa de atenção visual, que contabiliza a quantidade de fixação por área de interesse no estímulo exibido na tela do equipamento (DUCHOWSKI, 2017). Neste experimento os parâmetros para o cálculo das fixações foram configurados com área de 40 pixels e tempo de 60ms e os mapas de calor foram convertidos para mapas de opacidade, contendo apenas tons de cinza, conforme sequência apresentada na Figura 48.

Todas as imagens geradas com o experimento possuem a mesma resolução (1280x720), orientação e intensidade de brilho, resultando em um banco de dados normalizado com 210 imagens de padrões de leitura visual, sendo 70 imagens de cada padrão estudado (Neutral, Blurry e Washout). Além disso, essas imagens também foram convertidas em vetores, o que resultou

Figura 48 – Pré-processamento do sinal de entrada.



Fonte: Autor

Legenda: No primeiro quadro é apresentado o mapa de atenção visual sobre o estímulo, em seguida o estímulo é removido e no terceiro quadro é convertido para mapa de opacidade

em um conjunto de dados com 210 entradas e 921600 tons de cinza. Os parâmetros de leitura também foram organizados em um conjunto de dados com 210 entradas e 16 variáveis que representam cada um dos parâmetros de leitura descritos. Adicionalmente, foi selecionado um subconjunto desse conjunto de dados com parâmetros de leitura comumente usados na literatura (GUIMARAES; GUIMARAES, 2013; BICALHO et al., 2015), que compreende o número de progressões, o número de regressões, o tempo de leitura e o número de fixações por palavra. No final deste processo, obtivemos 3 conjuntos de dados:

- a) Conjunto de dados 1 [210x4]: Parâmetros da literatura para a síndrome de Irlen;
- b) Conjunto de dados 2 [210x16]: Parâmetros da literatura com a adição dos novos parâmetros de medição implementados neste experimento;
- c) Conjunto de dados 3 [210x921600]: Mapa de atenção visual com padrões de leitura.

3.4.7 Reconhecimento de padrão

O reconhecimento dos padrões de leitura foi realizado por meio de métodos estatísticos multivariados e a extração de características realizada de acordo com o tamanho de cada conjunto de dados. Para classificar os padrões dos conjuntos de dados 1 e 2, usamos o método padrão de análise discriminante linear (LDA) (FUKUNAGA, 2013; FISHER, 1936), porque nesses casos o número de amostras foi suficientemente grande em relação ao número de recursos. Para classificar os padrões do conjunto de dados 3, em que o número de amostras era muito pequeno em relação ao número de características, utilizamos o modelo computacional baseado em análise de componentes principais (PCA) e análise discriminante linear de incerteza máxima (MLDA) (THOMAZ, Carlos E et al., 2007; THOMAZ, Carlos Eduardo et al., 2009; THOMAZ, C. et al., 2013; GREGORI; SANCHES; THOMAZ, 2016), conforme diagrama apresentado na Figura 22 da seção 2.7.

3.5 RESULTADOS

Os conjuntos de dados foram divididos em $k = 10$ subconjuntos com 21 indivíduos cada, selecionados aleatoriamente. Esta divisão foi mantida nos 3 conjuntos de dados e os resultados obtidos podem ser comparados na Tabela 2.

Tabela 2 – Desempenho do classificador

K-fold	A	B	C
K1	61,90%	85,71%	100,00%
K2	80,95%	85,71%	100,00%
K3	85,71%	95,24%	100,00%
K4	100,00%	95,24%	100,00%
K5	85,71%	90,48%	100,00%
K6	95,24%	95,24%	100,00%
K7	85,71%	80,95%	100,00%
K8	100,00%	100,00%	100,00%
K9	95,24%	90,48%	95,24%
K10	76,19%	90,48%	100,00%
Precisão global	86,67%	90,95%	99,52%
Desvio padrão	11,84%	5,70%	1,51%
Margem de erro (95%)	7,60%	3,66%	0,97%

Fonte: Autor

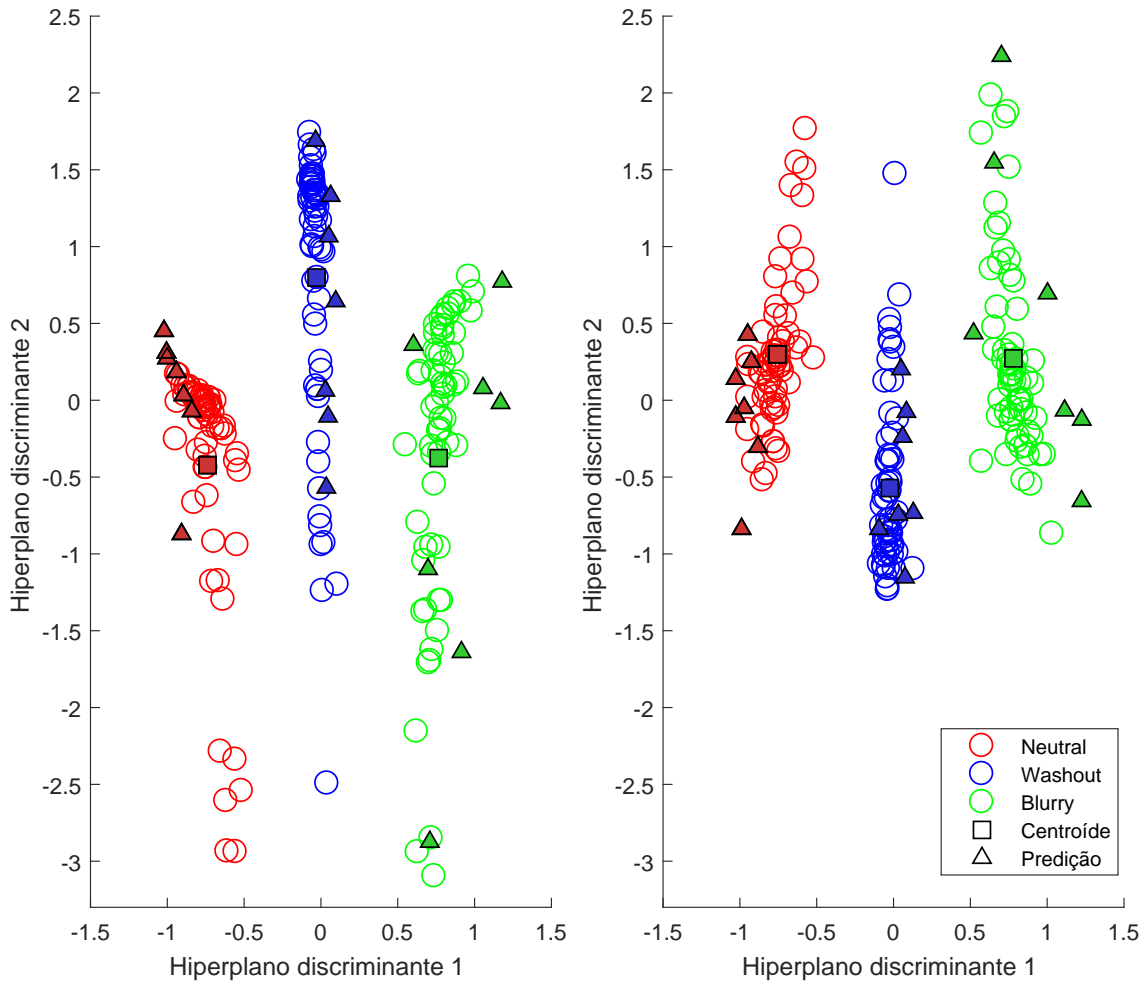
Legenda: A: Conjunto de dados 1, B: Conjunto de dados 2 e C: Conjunto de dados 3

Nas Figuras 49 e 50 é possível observar o resultado de uma projeção dos dados de treinamento e teste no hiperplano discriminante para os mesmos subconjuntos de treinamento e teste.

Os resultados mostram que é possível classificar parâmetros e padrões de leitura visual linearmente e que quanto maior a quantidade de detalhes na amostra, melhor é o desempenho do classificador. Ao comparar os conjuntos de dados com os parâmetros de leitura, observa-se que o desempenho do classificador foi melhor com o conjunto de dados 2 do que com o conjunto de dados 1, mas ao calcular a margem de erro com intervalo de confiança de 95%, observa-se que há um empate técnico entre os conjuntos de dados. Por outro lado, ao comparar com o conjunto de dados 3, que contém os padrões de leitura visual como um todo, observa-se que o desempenho do classificador foi substancialmente superior e com margem de erro inferior a 1%.

Além disso, foi possível notar que há uma diferença estatisticamente significativa ao comparar o desempenho do classificador com o conjunto de dados 3 em relação aos conjuntos de dados 1 e 2, com *p-value* menor que 1%. Entretanto, entre os conjuntos de dados 1 e 2, não é possível rejeitar a hipótese nula H_0 , que assume que o desempenho do classificador com esses dados é igual. Ao avaliar a diferença entre cada padrão visual no conjunto de dados 3, também

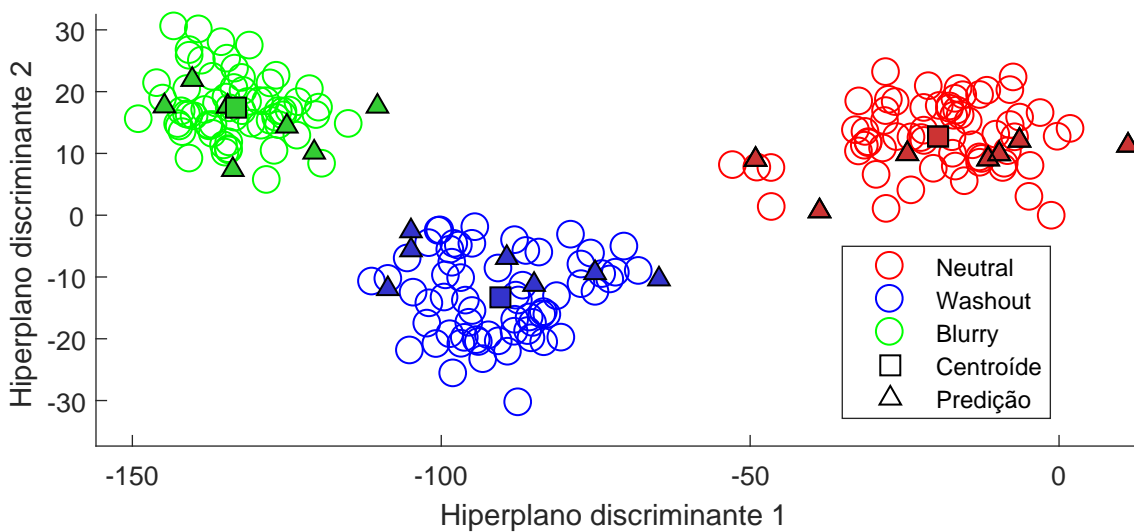
Figura 49 – Projeção dos conjuntos de dados 1 e 2 nos hiperplanos discriminantes



Fonte: Autor

Legenda: À esquerda é apresentada a classificação com 4 parâmetros de leitura (conjunto de dados 1) e à direita é apresentada a classificação com 16 parâmetros de leitura (conjunto de dados 2)

Figura 50 – Projeção do conjunto de dados 3 nos hiperplanos discriminantes



Fonte: Autor

foi possível observar que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os estímulos neutro, embaçado e washout, com *p-value* menor que 0,00001% em todas as comparações.

3.5.1 Reprodutibilidade dos resultados

Os resultados apresentados neste experimento podem ser reproduzidos a partir do conjunto de dados, das áreas de atenção visual e dos algoritmos que estão disponíveis nos links a seguir:

Conjunto de dados brutos: <https://x.gd/eY2mz>

Áreas de atenção visual: <https://x.gd/wMWMo>

Algoritmos: <https://x.gd/vRisi>

3.6 DISCUSSÃO

Na literatura relacionada, a taxa de leitura é comumente utilizada como parâmetro para avaliar se um sujeito tem dificuldades de leitura e, conseqüentemente, avaliar o desempenho do leitor após algum tipo de tratamento (WILKINS et al., 1996; EVANS; JOSEPH, 2002; BOULDOUKIAN; WILKINS; EVANS, 2002; NORTHWAY, 2003). Neste trabalho, apresentamos 16 parâmetros que podem ser usados para generalizar problemas de leitura, como quantidade de fixações que podem indicar dificuldade no reconhecimento de palavras, quantidade de regressões que podem indicar se o leitor repetiu a leitura da mesma palavra mais de uma vez, desvios que são os movimentos oculares considerados irregulares, com direção angular fora do eixo vertical, que podem explicar se o leitor perde o foco na leitura em torno de cada palavra ou a localização espacial das palavras durante a leitura, e outros, conforme descrito na subseção 3.4.6.

Os resultados indicam que é possível classificar automaticamente os padrões visuais simulados com 99,52% de precisão, dada a riqueza de detalhes que os movimentos oculares permitem capturar. Acreditamos que esses resultados possam contribuir para um melhor entendimento sobre a etiologia dos sintomas e diagnóstico do estresse visual (MIYASAKA et al., 2019), mostrando aqui uma forma alternativa de estudar esse fenômeno (ORSI, Rafael Nobre; THOMAZ, Carlos Eduardo, 2022).

Em outras palavras, foi proposto e implementado aqui, um arcabouço de engenharia reversa para detectar padrões de leitura visual e levantar a hipótese de compará-los com outros padrões gerados artificialmente, como os padrões blurry e washout, ou mesmo identificar outros padrões semelhantes entre si, mas diferentes do padrão comum ou neutro. Nesse cenário estaríamos diante de um padrão natural de leitura, coletado em situações reais, que poderia ajudar

a diagnosticar esse problema de leitura com evidências robustas para sustentar a necessidade de um tratamento e, conseqüentemente, avaliar a eficácia de possíveis tratamentos.

3.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nossos resultados experimentais indicam que a extração e classificação linear de padrões de leitura visual por meio de rastreamento ocular e técnicas estatísticas multivariadas são métodos promissores para avaliar objetivamente como uma pessoa lê um texto. O arcabouço de engenharia reversa proposto e implementado neste trabalho possibilitou a mensuração de mapas de atenção visual com diferenças estatisticamente significativas entre cada tipo de estímulo, além de permitir a aquisição de um banco de dados filtrado, coeso e confiável, contendo apenas os dados do movimento ocular do exato momento em que o texto foi lido pelos sujeitos.

Embora a acurácia de classificação dos padrões de leitura visual tenha sido maior a partir do conjunto de dados do mapa de atenção visual (conjunto de dados 3), é justo dizer que uma análise dos parâmetros de leitura (conjunto de dados 1 e 2) pode ajudar a explicar semanticamente como um pessoa aborda visualmente um texto e quais são os principais movimentos oculares irregulares que fazem com que essa pessoa tenha dificuldade em lê-lo. Ou seja, ao classificar os movimentos oculares como um padrão de estresse visual, é possível, por meio de parâmetros de leitura, investigar o comportamento visual que mais contribui para essa classificação, como, por exemplo, se há alto índice de regressões ou muitas fixações por palavra. No entanto, nossos resultados experimentais sugerem que pode haver algumas características de comportamento de leitura inerentes a essa análise visual, mas ainda não totalmente parametrizadas. Ou seja, nesse processo de classificação automatizada, analisar o padrão visual de forma holística parece ser mais vantajoso do que tentar traduzir todas as informações do movimento ocular disponíveis em parâmetros numéricos a priori.

Estudos futuros podem contemplar experimentos de leitura, sem efeitos simulados, mas com pessoas que relatam perceber algum tipo de distorção visual para, a partir do arcabouço proposto nesta tese, identificar padrões visuais de leitura semelhantes. Adicionalmente, a realização de experimentos por pessoas que não percebem esses tipos de distorções pode aumentar a empatia sobre a importância e relevância de estudos que abordam estresse visual.

4 ANÁLISE DA ATENÇÃO VISUAL DURANTE A AVALIAÇÃO DE EXPRESSÕES FACIAIS DE DOR EM NEONATOS

Neste capítulo, são apresentados: uma breve contextualização sobre avaliação de dor em neonatos, um levantamento dos trabalhos relacionados, a proposta experimental implementada, o conjunto de materiais e métodos, resultados alcançados, discussão e as conclusões parciais relacionadas a este experimento.

4.1 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO

Recém-nascidos estão expostos a experiências dolorosas, rotineiramente praticadas clinicamente, que podem aumentar a morbidade e mortalidade a curto e longo prazo (GUINSBURG, 1999; ANAND; SCALZO, 2000) e, neste cenário, saber identificar rapidamente a presença ou ausência de dor é uma habilidade fundamental para prevenir as consequências causadas pela falta de tratamento da dor ou pelo uso desnecessário de medicamentos opioides, quando não há mais dor (GRUNAU; HOLSTI; PETERS, 2006; GRUNAU et al., 2009; DE GRAAF et al., 2011; SELVANATHAN et al., 2023).

Embora os recém-nascidos não sejam capazes de fornecer um autorrelato de dor, é possível estabelecer uma comunicação eficaz por meio de sinais corporais e expressões faciais para avaliar a dor de forma não invasiva (GRUNAU; CRAIG, 1987). Estudos mostram que algumas expressões faciais ocorrem de forma espontânea, logo nos primeiros minutos de vida, e que é um comportamento automático e inato (SCHIAVENATO et al., 2008; HENTSCHEL et al., 2007).

As expressões faciais de dor podem ser, especificamente, reconhecidas por humanos com habilidade não apenas natural, mas também hereditária (WILMER et al., 2010; MCKONE; PALERMO, 2010). No entanto, a atenção visual necessária para avaliar adequadamente a dor em recém-nascidos através de suas expressões faciais é menos estabelecida. Em outras palavras, a avaliação da presença ou ausência de dor em recém-nascidos por meio de expressões faciais é pouco compreendida e não se sabe se tal inferência ocorre mais rapidamente ou sem esforço mental quando comparamos profissionais de saúde com outros adultos com e sem experiência neste procedimento.

Para investigar essas questões, realizamos um experimento de atenção visual controlado para registrar e monitorar as dilatações e contrações pupilares involuntárias de especialistas, pais

e sujeitos não especialistas, enquanto analisavam imagens faciais frontais de recém-nascidos distintos antes e depois de um procedimento doloroso.

4.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Em um estudo realizado por Grunau e Craig (1987) observou-se que 99% dos recém-nascidos submetidos à punção do calcanhar apresentaram um conjunto consistente de 4 expressões faciais: testa proeminente, olhos apertados, sulco nasolabial aprofundado e boca aberta. Essas alterações na expressão facial de neonatos em resposta à dor também foram observadas em outros estudos desta natureza (GRUNAU; JOHNSTON; CRAIG, 1990; GUINSBURG et al., 1997; PEREIRA et al., 1999).

Segundo Balda et al. (2000), a análise da expressão facial de recém-nascidos pode ser codificada, quantificada e utilizada como indicadora do comportamento diante da dor. Além de promover uma comunicação eficaz entre o recém-nascido e o cuidador.

Neste cenário, a proposta de avaliar a natureza da dor em neonatos deu origem a muitos estudos sobre expressões faciais e à criação de escalas de expressões de dor para comunicação não verbal. Ao longo de mais de três décadas, foram realizados muitos estudos sobre avaliação de expressões de dor em neonatos, inclusive a literatura acerca deste assunto já contempla algumas revisões sistematizadas (MELO et al., 2014; OLSSON et al., 2021; GKIKAS; TSIKNAKIS, 2023).

Atualmente, sabe-se que há pelo menos 29 escalas de avaliação de dor em recém-nascidos (MELO et al., 2014), mas não é possível eleger a mais adequada ou definir um padrão ouro, pois a eficiência do método pode variar de acordo com a idade gestacional, com o tipo de estímulo doloroso e com o contexto em que o recém-nascido se encontra (MELO et al., 2014; OLSSON et al., 2021).

Em geral, nas escalas de avaliação de dor, as características faciais mais relevantes estão localizadas na região dos olhos, testa e boca (HUDSON-BARR et al., 2002; MELO et al., 2014). No entanto, estudos recentes que utilizaram rastreamento ocular mostram que a percepção visual de expressões de dor pode ser mais específica (TAMANAKA et al., 2022). Segundo Barros et al. (2021), a partir de um experimento de rastreamento ocular foi possível perceber que a fixação do olhar na região do sulco nasolabial ajudou os profissionais de saúde a identificar a presença ou a ausência de dor em neonatos. Mais especificamente, cada olhar adicional no sulco nasolabial

foi associado a um aumento de 2,15 vezes na chance de identificar corretamente a presença e a ausência de dor nas fotos do recém-nascido (BARROS et al., 2021).

Um estudo que comparou o desempenho de profissionais de saúde e não profissionais de saúde durante uma avaliação de expressões faciais de dor em neonatos mostrou que, embora a experiência no assunto prevaleça, ambos os grupos apresentaram um padrão visual semelhante em diferentes áreas de interesse (SOARES et al., 2022). Segundo Soares et al. (2022), a habilidade humana em reconhecer dor pode ter sido um dos fatores que contribuiu para que houvesse pouca diferença no padrão visual entre as classes comparadas. No entanto, foi possível notar que os profissionais de saúde apresentaram maior número de fixações do olhar na boca e no sulco nasolabial e menos fixações visuais nos olhos em relação aos não profissionais de saúde (SOARES et al., 2022).

Na prática clínica, ainda há alguns desafios a serem superados. Segundo Melo et al. (2014), a avaliação da dor em neonatos depende do viés do observador e requer profissionais treinados para garantir a utilização adequada das escalas de dor. Neste contexto, alguns estudos que exploram o reconhecimento automatizado da dor por meio de algoritmos computacionais têm apresentado bom desempenho em relação à inferência humana (ZAMZMI et al., 2019a; EGEDE et al., 2019; ZAMZMI et al., 2019b). Os avanços nesta área mostram que em um futuro não muito distante será possível inserir um sinal de dor nos leitos de hospital como um sinal vital, além dos sinais tradicionalmente mensurados, como frequência cardíaca e respiratória, pressão arterial e temperatura. No entanto, ainda não se tem por completo um arcabouço de conhecimentos científicos já estruturados sobre a comunicação não verbal que é estabelecida entre um neonatal e o observador humano, sobre como reconhecemos a dor e sobre o impacto emocional inerente a esta tarefa.

4.3 EXPERIMENTO

Neste estudo foi realizado um experimento de atenção visual envolvendo a captura de movimentos oculares durante uma tarefa de avaliação de dor em recém-nascidos. O objetivo principal era analisar a atenção visual humana durante o reconhecimento da dor e se tal inferência ocorre de forma mais rápida ou sem esforço mental ao comparar profissionais de saúde com outros adultos. Mais especificamente, neste experimento:

- a) foi realizado um experimento de rastreamento ocular utilizando como estímulo algumas expressões faciais com e sem dor para coletar sinal visual correspondente;

- b) foi feito o pré-processamento do sinal visual;
- c) e foi feita a análise das características do sinal pupilar.

4.3.1 Projeto experimental

Uma visão completa da concepção do projeto e aplicação do protocolo experimental pode ser vista no vídeo disponibilizado no link a seguir: <https://youtu.be/L79h-pjcfN8>

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado o conjunto de materiais e métodos utilizados na realização do experimento e está dividida em quatro subseções: estímulo visual; participantes; aquisição do sinal; e processamento do sinal.

4.4.1 Estímulo visual

Os estímulos consistiram em 20 imagens faciais de 10 diferentes recém-nascidos a termo, obtidas do banco de dados de faces neonatos da UNIFESP (HEIDERICH; LESLIE; GUINSBURG, 2015). A Figura 51 ilustra todos os estímulos utilizados.

Figura 51 – Estímulos visuais



Fonte: Heiderich, Leslie e Guinsburg (2015)

Legenda: De cima para baixo, a primeira e a terceira linha de imagens correspondem a estímulos negativos (recém-nascidos em repouso, sem dor), e a segunda e quarta linha correspondem a estímulos positivos (recém-nascidos após procedimento doloroso)

Todas as imagens faciais são coloridas e tiradas contra um fundo não homogêneo em posição frontal ereta, sem artefatos que possam sobrepor partes da face do recém-nascido e com total concordância interobservador ($kappa = 1$) na identificação da dor (HEIDERICH; BARROS; GUINSBURG, 2020). Cada par de imagens faciais é composto por uma foto do recém-nascido em repouso sem dor (estímulo negativo) e outra foto do mesmo recém-nascido após um procedimento doloroso (estímulo positivo) realizado rotineiramente na prática clínica, como coleta de sangue e vacina contra Hepatite B. Todos os procedimentos realizados nos neonatos deste banco de dados foram realizados a pedido médico, com consentimento informado dos pais para participação no estudo original e permissão do uso dessas imagens.

4.4.2 Participantes

Um total de 102 adultos participaram deste estudo de forma voluntária. Foram divididos em três grupos: 44 especialistas (4 pediatras e 40 neonatologistas, $33,48 \pm 7,01$ anos), 29 pais de recém-nascidos internados na Unidade de Terapia Intensiva Neonatal do HSP ($30,48 \pm 6,95$ anos), e 29 não especialistas (e não pais) ($39,82 \pm 10,39$ anos). Todos os indivíduos tinham visão normal ou corrigida para normal. O consentimento informado por escrito foi obtido de todos os sujeitos.

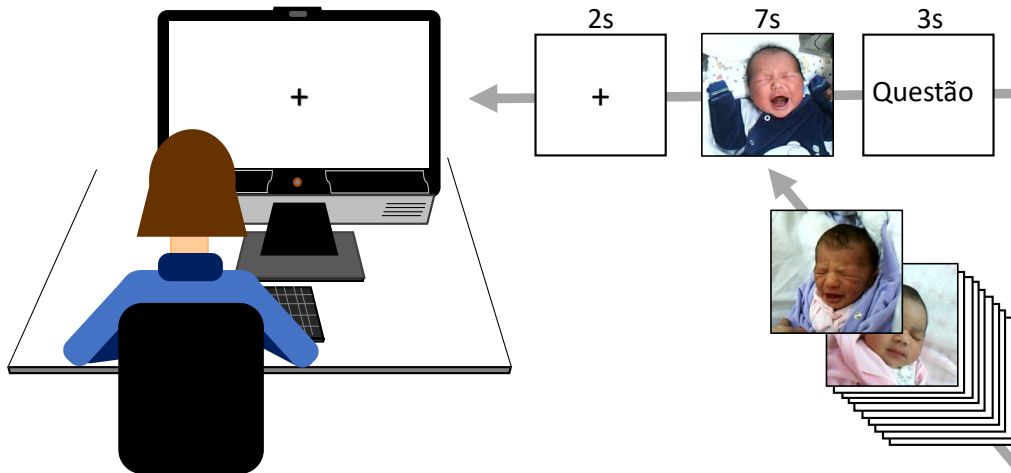
Este trabalho foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), sob os números 1299/09 e 3.116.146. Todos os dados foram coletados no Hospital São Paulo (HSP), hospital universitário vinculado à UNIFESP.

4.4.3 Aquisição do sinal

A preparação inicial para realizar a aquisição do sinal ocorreu conforme protocolo experimental descrito na seção 2.5. Em seguida o experimento foi iniciado com a apresentação de uma tela introdutória com instruções ao voluntário seguida de uma etapa de teste de compreensão com duas tentativas prévias (CARLINI et al., 2020; TAMANAKA et al., 2022). Conforme é apresentado na Figura 52, em cada tentativa, uma cruz de fixação central foi apresentada por 2 segundos, seguida por uma imagem facial neonatal selecionada aleatoriamente e mostrada não centralizada em uma nova tela. A imagem da face era exibida por 7 segundos e seguida de uma questão em uma nova tela que exigia uma resposta em relação à sua avaliação de dor correspondente. O sujeito tinha 3 segundos para responder verbalmente qual era o escore de dor da imagem facial exibida, usando uma escala de classificação numérica de 0 (sem dor) a 10 (dor

intensa). Após cada resposta, o processo se repetia iniciando pela apresentação de uma cruz no centro da tela até que todas as 20 imagens faciais fossem apresentadas e avaliadas.

Figura 52 – Design experimental e simulação da configuração implementada



Fonte: Autor

O tempo total para realizar o procedimento de atenção visual foi de 5 minutos para cada sujeito.

4.4.3.1 *Reprodutibilidade experimental*

A reprodução experimental e coleta de sinal de novos voluntários usando o Tobii Studio podem ser feitas a partir do banco de imagens e do projeto que estão disponíveis nos links a seguir:

Banco de imagens de recém-nascidos: <https://x.gd/13E3u>

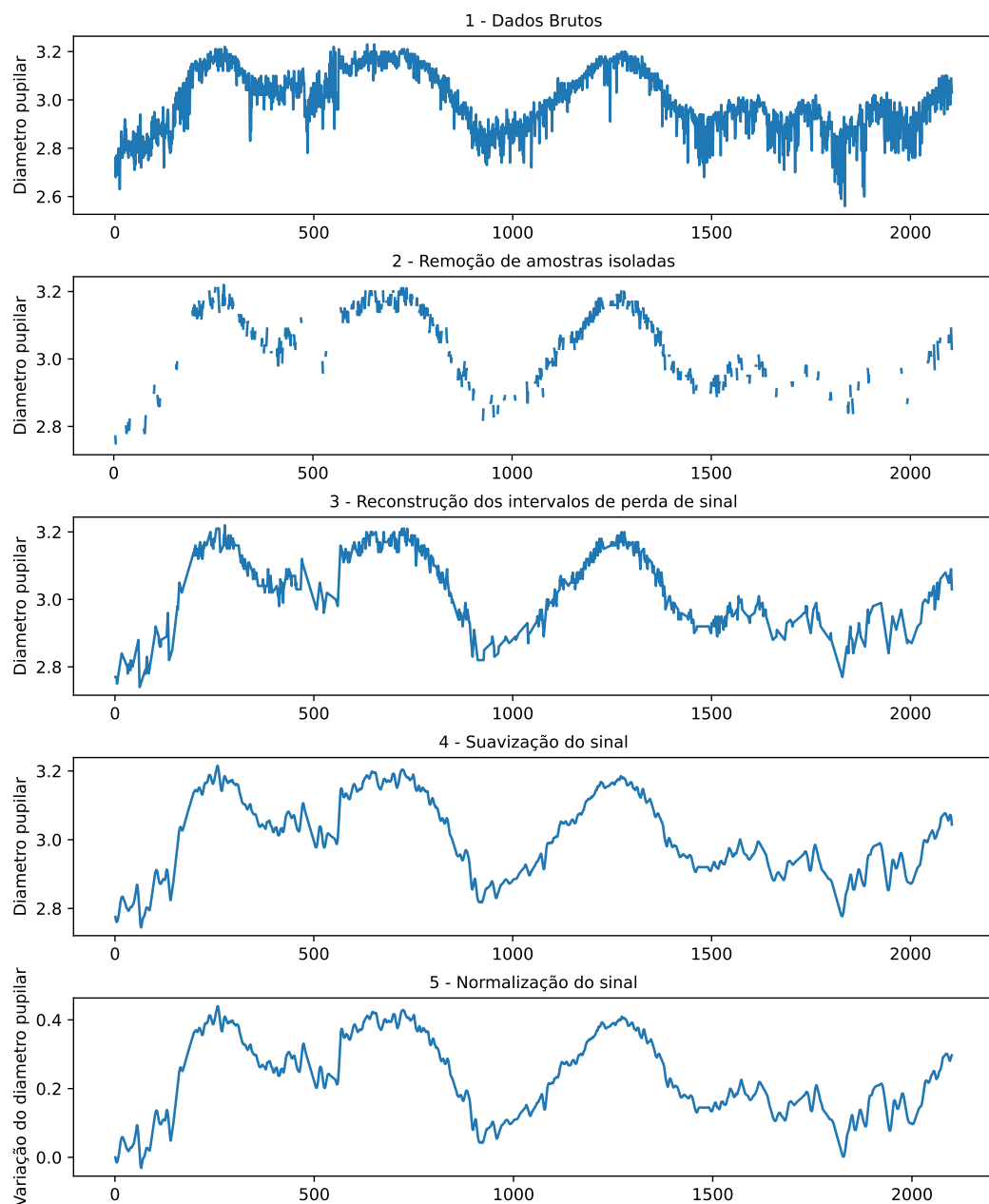
Desenho do projeto no Tobii Studio: <https://x.gd/cGUGD>

4.4.4 **Processamento do sinal pupilar**

Os diâmetros das pupilas dos olhos esquerdos dos sujeitos foram adquiridos em milímetros diretamente do rastreador ocular usando o software Tobii Studio. Consideramos apenas os dados da pupila de indivíduos para os quais, em média, 70% ou mais de suas amostras de olhar foram coletadas pelo rastreador ocular. A perda de dados da pupila devido ao piscar dos olhos ou outras pequenas oclusões temporárias foi corrigido com base na aplicação do filtro de fixação Tobii I-VT (OLSEN, 2012), seguindo suas funções de preenchimento de lacuna e média móvel (com parâmetro de tamanho de janela igual a 5 amostras) para interpolação linear e redução de ruído, respectivamente. Este processamento de sinal foi realizado para todos os tamanhos de pupila de

todos os estímulos faciais e todos os indivíduos. Além disso, a primeira medida do tamanho da pupila de cada gravação foi usada como medida de referência, e essa medida foi subtraída das medidas subsequentes para normalizar o sinal, ajustando o tamanho bruto de todos os sinais adquiridos originalmente para suas variações correspondentes em um único plano cartesiano. Na Figura 53, é possível ver um exemplo das etapas do pré-processamento do sinal e na Figura 54, é possível visualizar as características do sinal pupilar de todos os participantes para um tipo de estímulo específico.

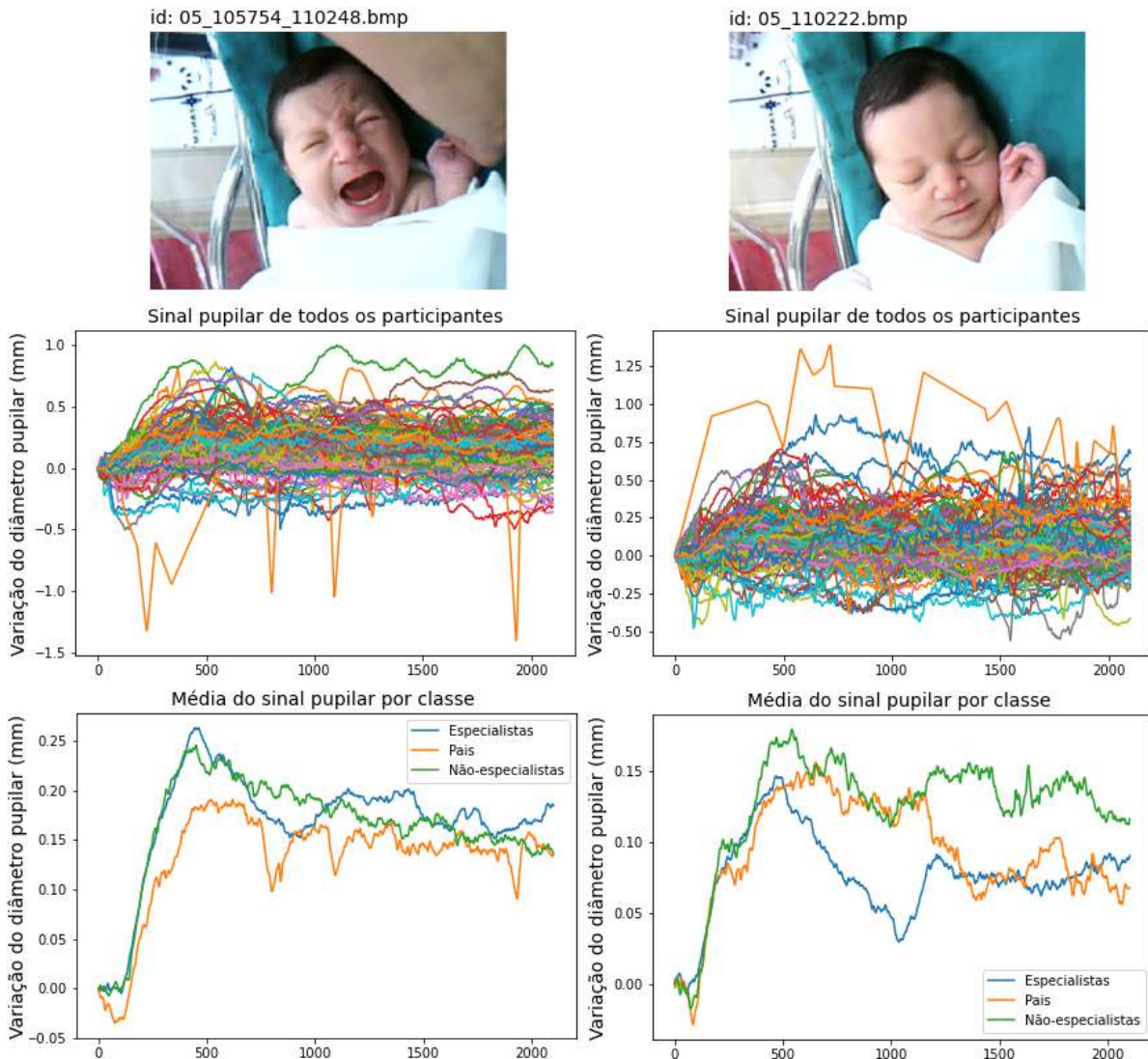
Figura 53 – Etapas do pré-processamento do sinal pupilar



Fonte: Autor

Legenda: O eixo das abscissas representa a amostragem do sinal considerando o registro de 300 amostras por segundo durante 7 segundos

Figura 54 – Agrupamento do sinal pupilar por estímulo



Fonte: Autor

Legenda: De cima para baixo é ilustrado o estímulo, o sinal pupilar correspondente de todos os voluntários e o sinal médio da classe ao longo de 7 segundos. À esquerda é apresentado um estímulo positivo e à direita um estímulo negativo, ambos do mesmo recém-nascido

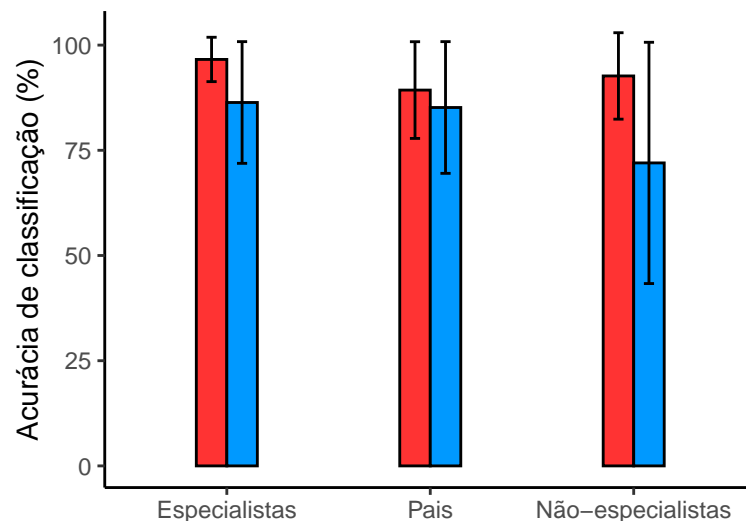
4.4.5 Classificação do desempenho na avaliação da dor

Não há pontos de corte estabelecidos amplamente aceitos e baseados em evidências na escala verbal analógica que diferencie a presença da ausência de dor (DIJK et al., 2002). Todas as classificações numéricas respondidas verbalmente pelos sujeitos em estímulos faciais positivos ou negativos foram classificadas considerando os seguintes intervalos de pontuação (BARROS et al., 2021): 0-2 (negativo, ausência de dor), 3-5 (positivo, presença baixa/leve de dor) e 6-10 (positiva, presença moderada/forte de dor).

4.5 RESULTADOS

Os resultados da classificação dos grupos de amostra de especialistas, pais e não especialistas são mostrados na Figura 55. Os especialistas classificaram corretamente os estímulos faciais positivos e negativos com precisões médias de 96,59%(±5,27%) e 86,36%(±14,46%), respectivamente. Pais com 89,31%(±11,94%) e 85,17%(±15,65%), e não especialistas com 92,67%(±10,27%) e 72,00%(±28,67%). Usando a análise de variância (JOHNSON; WICHERN, 1998), os resultados da classificação geral (estímulos faciais positivos mais negativos) entre especialistas e não especialistas foram estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) e houve diferenças estatisticamente significativas entre estímulos positivos e negativos dentro dos grupos amostrais especialistas ($p < 0,05$) e não especialistas ($p < 0,05$).

Figura 55 – Desempenho dos voluntários na tarefas de avaliação da dor



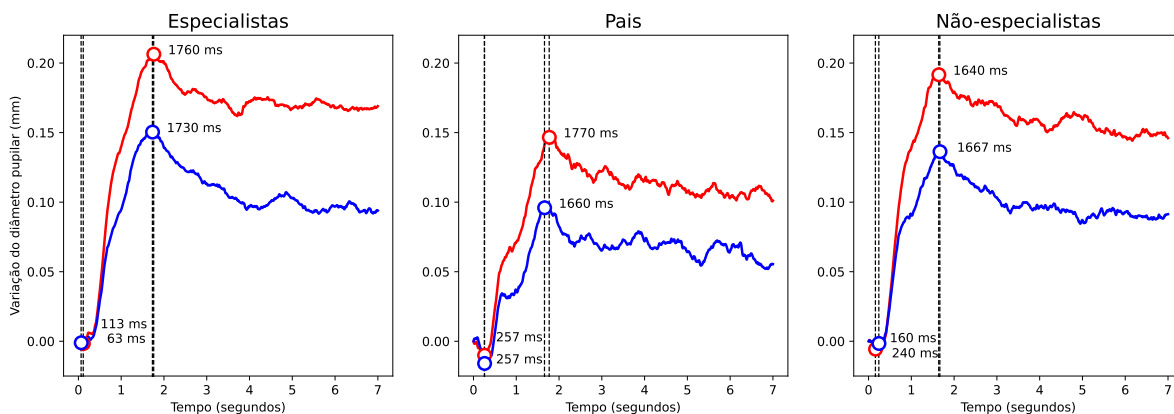
Fonte: Autor

Legenda: Nesta figura é apresentada a precisão da classificação dos especialistas, pais e não especialistas, nos estímulos positivos (em vermelho) e negativos (em azul)

Na Figura 56, é apresentada a média das mudanças no diâmetro da pupila durante a linha do tempo de 7 segundos de todos os estímulos positivos e negativos apresentados aos grupos de amostra de especialistas, pais e não especialistas, respectivamente. Uma inspeção visual comparativa dessas curvas indica que as respostas das pupilas para avaliações positivas e negativas de todos os grupos de amostra apresentam um padrão temporal comum com os seguintes transientes principais ou pontos de inflexão: um transiente inicial de diminuição do tamanho da pupila imediatamente após o início da apresentação do estímulo, para cerca de 0,063s (valor mínimo, de especialistas para estímulos negativos) e 0,257s (valor máximo, de pais para

estímulos positivos e negativos); um transiente intermediário de aumento acentuado no tamanho da pupila com pico alcançado em cerca de 1,640s (valor mínimo, de não especialistas para estímulos positivos) e 1,770s (valor máximo, dos pais para estímulos positivos); e um transiente de término de diminuição suave no tamanho da pupila.

Figura 56 – Variação do diâmetro pupilar



Fonte: Autor





























Legenda: Média das alterações do diâmetro da pupila (em milímetros) durante a linha do tempo de 7 segundos de estímulos faciais positivos (em vermelho) e negativos (em azul). Da esquerda para a direita, é apresentada a variação pupilar da classe de especialistas, pais e não especialistas, respectivamente

Na Figura 56, também é possível observar que há maior dilatação pupilar nos sujeitos ao avaliar imagens faciais de recém-nascidos após um procedimento doloroso (estímulos positivos, em vermelho) do que em repouso (estímulos negativos, em azul) para todos os grupos de amostras de sujeitos. Usando análise multivariada de variância (JOHNSON; WICHERN, 1998) (com os primeiros componentes principais que retêm pelo menos 95% da variância total correspondente), essas diferenças foram, no entanto, estatisticamente significativas ($p < 0,05$) apenas para especialistas. De fato, as análises de correlação das alterações do diâmetro da pupila na linha do tempo indicam uma forte similaridade estatística entre todas essas curvas e grupos de amostras. Quantitativamente, para estímulos positivos, $r = 0,975$ entre especialistas e pais, $r = 0,989$ entre especialistas e não especialistas e $r = 0,968$ entre pais e não especialistas. Analogamente, para estímulos negativos, $r = 0,921$ entre especialistas e pais, $r = 0,980$ entre especialistas e não especialistas e $r = 0,920$ entre pais e não especialistas.

Adicionalmente, em uma análise da área de atenção visual, é possível verificar que há uma mudança de comportamento nos movimentos oculares após dois segundos de avaliação. Nos primeiros dois segundos, as fixações são mais rápidas e em maior quantidade, o que indica que o observador está procurando informações para fazer a sua avaliação. Após dois segundos, as fixações são mais lentas e duradouras, as vezes até estáticas em um único ponto, o que indica

que o observador parou de procurar informações e está, possivelmente, concentrado em outras operações mentais. Em alguns casos, nós observamos que há um aumento na quantidade de fixações após quatro segundos, o que possivelmente é justificado por uma revisão do observador antes de finalizar a sua avaliação. Nas Figura 57 e 58, é apresentada uma amostra da análise e a quantificação da área de atenção visual.
















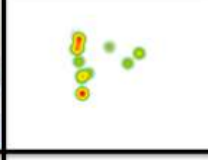







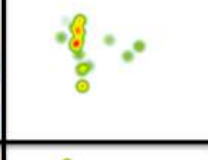




Figura 57 – Análise e quantificação da área de atenção visual de um especialista que respondeu adequadamente todas as avaliações

TEMPO	FIXAÇÕES		RASTREAMENTO DO OLHAR		ÁREA DE INTERESSE	PADRÃO VISUAL
	ABS.	AC.	POR SEGUNDO	ACUMULADO		
1	2	2				
2	5	7				
3	2	9				
4	2	11				
5	3	14				
6	3	17				
7	4	21				

Fonte: Autor

Legenda: Na primeira coluna é apresentada a escala de tempo (em segundos) das medições, na segunda coluna são apresentadas as fixações por segundo e fixações acumuladas, na terceira coluna são apresentados os rastreamentos do olhar por segundo e acumulado, e na quarta coluna são apresentados a área de atenção visual e o respectivo padrão visual correspondente

Figura 58 – Análise e quantificação da área de atenção visual de um pai de recém-nascido que respondeu adequadamente todas as avaliações

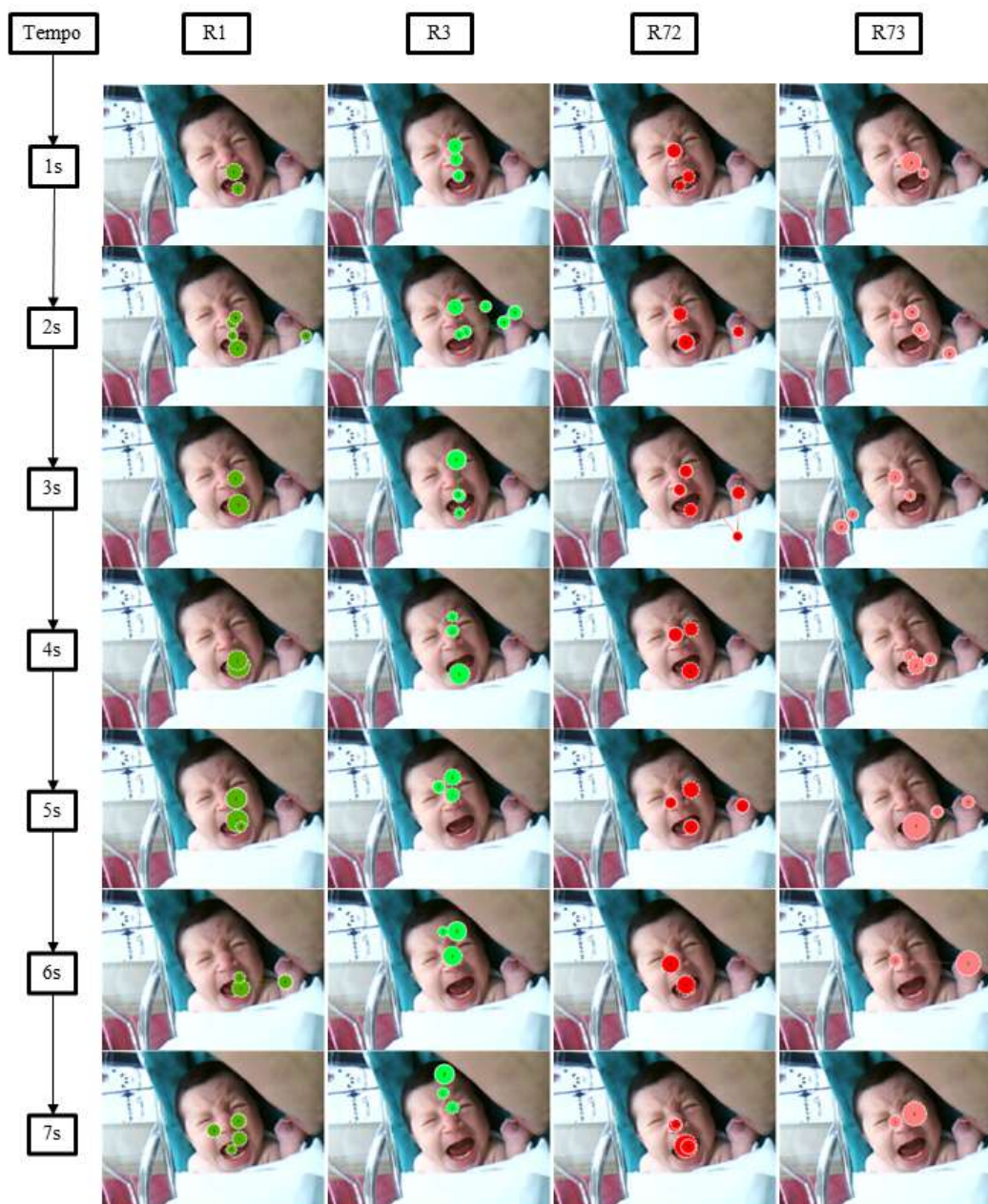
TEMPO	FIXAÇÕES		RASTREAMENTO DO OLHAR		ÁREA DE INTERESSE	PADRÃO VISUAL
	ABS.	AC.	POR SEGUNDO	ACUMULADO		
1	3	3				
2	6	9				
3	4	13				
4	3	16				
5	3	19				
6	3	22				
7	3	25				

Fonte: Autor

Legenda: Na primeira coluna é apresentada a escala de tempo (em segundos) das medições, na segunda coluna são apresentadas as fixações por segundo e fixações acumuladas, na terceira coluna são apresentados os rastreamentos do olhar por segundo e acumulado, e na quarta coluna são apresentados a área de atenção visual e o respectivo padrão visual correspondente

Em uma inspeção visual também é possível observar que há algumas diferenças no rastreamento do olhar entre pessoas que avaliaram corretamente ou não a escala de dor. Na Figura 59, é apresentada uma comparação do rastreamento ocular por segundo entre dois observadores que avaliaram adequadamente a escala de dor, destacados na cor verde, e dois observadores que avaliaram inadequadamente, destacados na cor vermelha.

Figura 59 – Comparação do rastreamento ocular por segundo



Fonte: Autor

Legenda: R1 e R3 avaliaram o estímulo adequadamente e R72 e R73 avaliaram inadequadamente. R1 e R72 são especialistas e R3 e R73 são pais de recém-nascidos

4.5.1 Reprodutibilidade dos resultados

Os resultados apresentados neste experimento podem ser reproduzidos a partir do conjunto de dados e do algoritmo que estão disponíveis nos links a seguir:

Conjunto de dados: <https://x.gd/FPQfz>

Algoritmo: <https://x.gd/oBIic>

4.6 DISCUSSÃO

Os resultados de classificação (Figura 55) mostraram que os especialistas tiveram um desempenho tão bom quanto os pais e melhor do que os não especialistas ao pontuar a presença ou ausência de dor em imagens faciais frontais de recém-nascidos. Nem o primeiro nem o último são resultados surpreendentes. Balda et. al (BALDA et al., 2000) já relataram originalmente que não houve diferença na acurácia do reconhecimento da expressão facial de dor em recém-nascidos entre profissionais de saúde e pais (com recém-nascidos internados, não internados ou sem recém-nascidos) ao analisar a face do rosto completo de bebês nascidos a termo em um experimento análogo usando fotografias impressas. Recentemente, os pesquisadores também descobriram que essa precisão de classificação não é apenas semelhante, mas também baseada holisticamente nas mesmas partes faciais (CARLINI et al., 2020; BARROS et al., 2021; SOARES et al., 2021; TAMANAKA et al., 2022). No entanto, como o grupo amostral de não especialistas é composto por sujeitos não pais e, como esperado, sem experiência profissional ou pessoal na tentativa de pontuar a dor em recém-nascidos, os não especialistas geralmente superestimam a presença de dor no teste experimental realizado, apresentando os piores resultados de classificação nas situações de repouso (estímulos negativos).

Além disso, os resultados de atenção visual (Figura 56) com base na gravação, monitoramento e processamento de sinal das alterações do diâmetro da pupila de todos os indivíduos identificaram que uma curta exposição a uma expressão facial é suficiente para avaliar a presença ou ausência de dor em recém-nascidos. A diminuição inicial no diâmetro da pupila em todas as curvas imediatamente após o início da avaliação está relacionada a um fenômeno bem conhecido chamado reflexo de luz (HESS; PETROVICH, 1987; BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000; PARTALA; SURAKKA, 2003; BRADLEY et al., 2008). O padrão mais impressionante dessas alterações no tamanho da pupila, no entanto, é o aumento acentuado comum da linha de base, seguido por uma diminuição mais lenta para estímulos positivos e negativos em todos os grupos de amostra de indivíduos. Uma vez que a dilatação da pupila está positivamente associada ao aumento da carga cognitiva (KAHNEMAN; BEATTY, 1966; HYÖNÄ; TOMMOLA; ALAJA, 1995; PARTALA; SURAKKA, 2003) e que tal carga de processamento de informações aconteceu essencialmente nos 2 primeiros segundos de exposição a estímulos faciais, sem diferenças estatísticas entre os grupos de amostras de sujeitos, esses achados sugerem que o reconhecimento da expressão facial de dor em recém-nascidos pode ser caracterizado como uma tarefa rápida de

atenção visual específica que não é guiada inteiramente pela experiência e não pode ser realizada sem esforço mental (ORSI et al., 2023)

4.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados mostram que um tempo de exposição mínimo de 2 segundos é suficiente para fazermos uma inferência visual de dor a partir de imagens faciais de recém-nascidos. A experiência sobre esse procedimento, seja profissional ou pessoal, aumenta a precisão dessa inferência, mas exige os mesmos 2 primeiros segundos de exposição aos estímulos faciais.

Adicionalmente, ao analisar a área de interesse visual, é importante considerar que as mudanças no comportamento dos movimentos oculares após 2 segundos podem ser um fator de confusão, pois algumas fixações duradouras estabelecidas na mesma região da face podem ser apenas um ponto de parada para descanso dos olhos enquanto o sujeito está pensando e, portanto, a consolidação das fixações acumuladas pode não ser correspondente à aquisição de informação visual. Neste contexto, vale destacar a importância de avaliar o sinal no momento adequado para que seja criada uma abordagem mais distinta e seletiva para análise de expressão facial de recém-nascidos, a fim de melhorar o treinamento da dor neonatal na prática clínica.

5 ANÁLISE DA DILATAÇÃO PUPILAR DURANTE A PERCEPÇÃO DE ESTÍMULOS EMOCIONAIS CATEGORIZADOS

Neste capítulo, são apresentados: uma breve contextualização sobre a percepção de estímulos emocionais, um levantamento dos trabalhos relacionados, a proposta experimental implementada, o conjunto de materiais e métodos, resultados alcançados, discussão e as conclusões parciais relacionadas a este experimento.

5.1 BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO

A emoção é um processo cognitivo complexo que envolve a percepção, a interpretação e a resposta a estímulos internos e externos. Também exerce um papel importante na comunicação e tem uma base inata, o que significa que certas emoções são expressas de forma semelhante em todas as culturas e são consideradas universais. Essas reações inatas são observadas desde o nascimento e ocorrem sem a necessidade de aprendizagem prévia (SALZWEDEL et al., 2018; MCTEAGUE et al., 2009; GILMORE; KNICKMEYER; GAO, 2018).

Neste contexto, alguns comportamentos e expressões faciais podem ser interpretados como indicadores do estado emocional de um sujeito e podem ajudar na comunicação de sentimentos e intenções. Por exemplo, uma pessoa que está feliz pode sorrir e mostrar sinais de relaxamento, enquanto uma pessoa que está com medo pode parecer tensa, com a respiração acelerada e com olhar de cautela ao seu redor. Esses sinais podem ser imediatamente reconhecidos e interpretados como indicadores do estado emocional (EGGER; LEY; HANKE, 2019).

Adicionalmente, esses sinais também podem ser simulados conscientemente, ou seja, as pessoas podem escolher qual expressão facial exibir, mesmo que não estejam realmente sentindo a emoção correspondente. Por exemplo, uma pessoa pode sorrir para transmitir uma imagem positiva, mesmo que não esteja realmente feliz naquele momento. Da mesma forma, uma pessoa pode franzir a testa para mostrar desaprovação, mesmo que não esteja realmente com raiva. No entanto, as emoções genuínas também podem ser expressas involuntariamente mesmo que o sujeito tente esconder. Quando um estímulo emocional é percebido pode ocorrer alterações fisiológicas sutis e visivelmente imperceptíveis como, por exemplo, o aumento da frequência cardíaca, da frequência pulmonar e do diâmetro pupilar (BITSIOS; SZABADI; BRADSHAW, 1996; BRADLEY et al., 2008; LANG; MCTEAGUE; BRADLEY, 2016), que, especificamente, relacionam-se com o escopo desta tese.

Neste contexto e considerando que os movimentos oculares são comumente usados para indicar as reações da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso autônomo (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000), foi desenvolvido um arcabouço experimental para observar o impacto provocado por estímulos visuais emocionalmente categorizados em uma mesma faixa de valência.

Para realizar este estudo, foi utilizada a base de dados do Sistema Internacional de Imagens Afetivas (International Affective Picture System - IAPS), que consiste em um dos maiores e mais utilizados conjuntos de estímulos emocionais para investigações experimentais de atenção e emoção em humanos (MIKELS et al., 2005; ZAMANI, 2017; MOLINA et al., 2018; LANG; BRADLEY; CUTHBERT et al., 2005). A base de dados do IAPS possui um conjunto de mais de 1000 imagens que são normatizadas para valência positiva, negativa ou neutra, que representam em níveis de excitação, a intensidade da resposta emocional para estímulos visuais (LANG; BRADLEY; CUTHBERT, 1988).

5.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Estímulos emocionais, processamento sensorial e respostas motoras fazem parte de um escopo de pesquisa relativamente abrangente que busca relacionar as emoções humanas às reações corporais e comportamentais. E, neste contexto, muitos estudos guiados pela análise dos sinais pupilares descrevem os efeitos de estímulos emocionais sobre o comportamento humano (BINDA; PEREVERZEVA; MURRAY, 2014; BITSIOS; SZABADI; BRADSHAW, 1996; BEATTY; KAHNEMAN, 1966).

Segundo Guerra e Cozenza (2011), a emoção é um indicador interno de que algo importante ou significativo para o indivíduo está acontecendo, como uma ameaça ou uma oportunidade, e isso pode desencadear reações fisiológicas impulsionadas por processos mentais que mobilizam outros recursos cognitivos, como a percepção e a atenção (GUERRA; COZENZA, 2011).

Segundo Ochsner e Gross (2005) e Gazzaniga, Ivry e Mangun (2014), a emoção se relaciona com outros processos cognitivos e possui relativa influência na tomada de decisão, influenciando as ações comportamentais para garantir a sobrevivência e a reprodução da espécie humana (OCHSNER; GROSS, 2005; GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). Além disso, as reações emocionais constituem pistas para um processo de comunicação não verbal (GUERRA; COZENZA, 2011; BATTY; TAYLOR, 2003). Como ilustrado na Figura 60, algumas emoções

básicas descritas por Batty e Taylor (2003), como tristeza, nojo, surpresa, medo, raiva e felicidade, provocam reações comportamentais estereotipadas que são facilmente reconhecidas entre os seres humanos.

Figura 60 – Expressões faciais das emoções básicas.



Fonte: Orsi (2018)

Em geral, as abordagens sobre esse assunto exploram as reações comportamentais moduladas pela emoção por meio de diversos tipos de biosinais, como, por exemplo, por medições de potencial elétrico com eletroencefalografia (EEG) e magnetoencefalografia (MEG), por análise de oxigenação no fluxo sanguíneo cerebral com ressonância magnética funcional (fMRI) e com a análise da variação pupilar com rastreadores oculares.

Em um estudo realizado por Schupp et al. (2003), foram tomadas medidas dos potenciais elétricos cerebrais relacionados a eventos enquanto os participantes observavam imagens agradáveis, neutras e desagradáveis e observou-se uma codificação seletiva precoce das imagens agradáveis e desagradáveis, associada a uma negatividade posterior, que indica fontes primárias

de ativação no córtex visual. Esse estudo relaciona-se com descobertas anteriores, que mostram diferenças no fluxo sanguíneo cerebral, provocadas por emoções agradáveis, desagradáveis e neutras em medições de tomografia por emissão de pósitrons (PET) (LANE et al., 1997). Esses resultados sugerem que a codificação sensorial de estímulos afetivos é facilitada implicitamente pela atenção seletiva natural. Isso mostra que o sistema afetivo não apenas modula a produção motora, favorecendo disposições de aproximação ou evitação, mas também opera em um nível inicial de codificação sensorial (SCHUPP et al., 2003).

Em um estudo realizado por Soleymani, Pantic e Pun (2011), os autores usaram sinais de EEG, resposta pupilar e distância do olhar a partir de vídeos com conteúdo emocional. Os vídeos foram reproduzidos aleatoriamente enquanto os dados de EEG e rastreamento ocular eram registrados. As classes de excitação foram calmas, medianamente excitadas e ativadas e as classes de valência foram desagradáveis, neutras e agradáveis. Segundo Soleymani, Pantic e Pun (2011) os sinais de EEG e reflexo pupilar são correspondentes com pistas afetivas e que é possível projetar um sistema preciso e independente do autorrelato do usuário para reconhecer emoções baseando-se nesses sinais (SOLEYMANI; PANTIC; PUN, 2011).

Em um estudo correlato, realizado por Zheng, Dong e Lu (2014), os autores apresentaram um método de reconhecimento de emoções que combina sinais de EEG e respostas pupilares a partir de 15 clipes de filmes emocionais em 3 categorias (positivo, neutro e negativo). Os sinais de EEG e os dados de rastreamento ocular dos participantes foram registrados, simultaneamente, enquanto assistiam a esses vídeos e a precisão do modelo para reconhecimento de emoções foi de 71,77% para os sinais de EEG e 58,90% para os sinais pupilares (ZHENG; DONG; LU, 2014).

As aplicações para esse tipo de estudo são diversas. Por exemplo, em um experimento realizado por Ho e Lu (2014), foi utilizado o tamanho das pupilas para analisar as respostas emocionais durante a avaliação da estética de alguns produtos. Neste experimento, foram utilizados quarenta e oito estímulos emocionalmente positivos, negativos e neutros, compostos por imagens do IAPS, e quarenta e oito imagens de produtos. O tamanho das pupilas era registrado enquanto os participantes visualizavam os estímulos e atribuíam uma nota emocional a estética dos produtos apresentados na tela. Os resultados indicaram que as duas classes de estímulos, IAPS e imagens de produtos, causaram variações diferentes nos tamanhos das pupilas e que as respostas emocionais negativas aos produtos refletiram pupilas menores do que as respostas positivas e neutras. Segundo Ho e Lu (2014), o tamanho da pupila é uma medida relevante para avaliar produtos e pode ser usado para generalizar a preferência de um cliente em um processo de compra.

Mais recentemente, Pires, Orsi e Thomaz (2019) realizaram um experimento relacionado a mensuração do diâmetro pupilar para avaliar o impacto emocional na tomada de decisão. Neste estudo, foram utilizados estímulos emocionalmente positivos e negativos do banco de imagens do IAPS. Ao todo foram utilizadas 9 imagens positivas e 9 imagens negativas. Cada um desses estímulos foi apresentado em ordem aleatória durante 6 segundos enquanto o tamanho das pupilas era registrado por um equipamento de rastreamento ocular. A tarefa dos participantes voluntários consistia apenas em contemplar as imagens e os resultados mostraram que houve uma diferença estatisticamente significativa na dilatação da pupila entre imagens emocionalmente positivas e negativas. Os estímulos com valência negativa desencadearam dilatações pupilares maiores do que os estímulos com valência positiva, embora ambos os estímulos tenham provocado aumento no tamanho das pupilas. Segundo Pires, Orsi e Thomaz (2019), esses resultados permitem avaliar objetivamente se uma pessoa foi impactada por um estímulo visual externo antes de tomar uma decisão e que tal experimento também torna possível quantificar emoções sentidas pelos seres humanos.

Complementarmente, Pires (2021) acrescentou uma categoria de controle nesta abordagem experimental, com a inserção de estímulos neutros, formatando o conjunto com estímulos com 9 imagens positivas, 9 imagens neutras e 9 imagens negativas. Neste novo experimento, os estímulos foram agrupados por categoria e após contemplar as imagens os voluntários eram expostos a decisões econômicas intertemporais. Os voluntários eram sorteados para cada tipo de estímulo e ao final do estudo foi comparado o impacto emocional dos estímulos na tomada de decisões econômicas. Os resultados corroboraram com os relatos anteriores, mostrando que os estímulos negativos provocam comportamentos diferentes no diâmetro pupilar comparativamente aos estímulos positivos e neutros. No entanto, as variações do diâmetro pupilar para os estímulos positivos e neutros não apresentaram diferenças significativas. Segundo Pires (2021), os resultados também mostraram que as decisões econômicas também foram impactadas e que os estímulos emocionais, além de interferirem no diâmetro pupilar, também são capazes de alterar a percepção do dinheiro entre o presente e futuro, principalmente, quando os estímulos são negativos.

A literatura sobre esse assunto contempla muitos estudos experimentais que, em geral, relacionam a variação do tamanho das pupilas com as ativações da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso autônomo (HESS; POLT, 1960, 1964b; HESS, 1965; HESS; PETROVICH, 1987; KAHNEMAN; BEATTY, 1966; KAHNEMAN et al., 1969; KAHNEMAN; WRIGHT, 1971; ORSI, 2018) que, por sua vez, possa ser reflexo do processamento emocional cognitivo

(BINDA; PEREVERZEVA; MURRAY, 2014; BITSIOS; SZABADI; BRADSHAW, 1996; BEATTY; KAHNEMAN, 1966; PARTALA; SURAKKA, 2003; PIRES; ORSI; THOMAZ, 2019; LIM; MOUNTSTEPHENS; TEO, 2020; WILKINSON; LIGHT, 2011; SKARAMAGKAS et al., 2021). Em resumo, pode-se dizer que o sinal pupilar é sensível a processos cognitivos e que, por ser uma medida não invasiva da atividade cerebral, tem sido amplamente utilizada em abordagens experimentais como as propostas nesta tese.

5.3 EXPERIMENTO

Neste estudo foi realizado um experimento de atenção visual envolvendo a captura de movimentos oculares durante a exibição de estímulos emocionais. O objetivo principal era analisar as reações do sistema nervoso autônomo a estímulos emocionais por meio da mensuração do diâmetro pupilar. Mais especificamente, neste experimento:

- a) foi realizado um experimento de rastreamento ocular utilizando estímulo emocionalmente categorizados para coletar sinal visual correspondente;
- b) foi feito o pré-processamento do sinal visual;
- c) e foi feita a análise das características do sinal pupilar.

5.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado o conjunto de materiais e métodos utilizados na realização do experimento e está dividido em quatro subseções: Estímulos visuais; participantes; aquisição de sinal e pré-processamento do sinal.

5.4.1 Estímulos visuais

Os estímulos visuais usados neste experimento foi baseado em alguns dos primeiros trabalhos sobre rastreamento ocular em que imagens emocionalmente positivas e negativas foram apresentadas a voluntários (HESS; POLT, 1960, 1964b).

As imagens utilizadas são fotografias coloridas padronizadas, emocionalmente evocativas e internacionalmente acessíveis, que contemplam uma ampla gama de categorias semânticas. As imagens selecionadas não possuem diferenças significativas de luminosidade (PIRES; ORSI; THOMAZ, 2019) e foram organizadas em um conjunto de 21 estímulos, sendo 7 positivas, 7 negativas e 7 neutras, todas retiradas da base de imagens do IAPS. Cada imagem foi apresentada

por 6 segundos em sequências aleatórias previamente definidas, conforme descrito nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Descrição das imagens positivas usadas como estímulo

Ordem	Código IAPS	Descrição resumida da imagem
1	8501	Dólares espalhados pelo chão
2	2080	Um bebê negro e um bebê branco, sentados um ao lado do outro
3	2040	Um bebê sorrindo sobre um tapete
4	8502	Uma pilha de notas de dinheiro
5	2058	Um bebê segurando o dedo de um homem
6	1710	Três filhotes de cachorro lado a lado
7	8503	Uma mão segurando dinheiro em leque

Fonte: IAPS

Tabela 4 – Descrição das imagens neutras usadas como estímulo

Ordem	Código IAPS	Descrição resumida da imagem
1	7150	Um guarda-chuva azul aberto no chão
2	7175	Um abajur dourado e vermelho sobre a mesa
3	7190	Um despertador dourado sobre uma mesa
4	7224	Arquivos de aço com as gavetas fechadas
5	7233	Um prato de porcelana estampado sobre uma mesa
6	7490	Uma janela de uma casa antiga
7	7705	Um gaveteiro com duas gavetas fechadas

Fonte: IAPS

Tabela 5 – Descrição das imagens negativas usadas como estímulo

Ordem	Código IAPS	Descrição resumida da imagem
1	2722	Um homem branco atrás das grades de uma cela
2	9220	Um homem e uma mulher ao lado de uma lápide em um cemitério
3	7521	Um leito de hospital vazio
4	9001	Um cemitério no inverno
5	2205	Um idoso segurando a mão de uma idosa num leito de hospital
6	6010	Um homem negro atrás das grades de uma cela
7	3220	Um homem com expressão de dor em um leito de hospital

Fonte: IAPS

Todas as imagens são de médio impacto emocional e foram criteriosamente selecionadas para não expor o voluntário a uma situação desagradável. Entretanto, ainda são capazes de provocar alterações significativas no diâmetro pupilar de acordo com a emoção causada por cada imagem apresentada (MATHÔT, 2018; BINDA; PEREVERZEVA; MURRAY, 2014).

5.4.2 Participantes

Um total de 36 pessoas participaram deste estudo de forma voluntária, com proporção semelhante entre homens e mulheres, mas 7 participantes foram descartados devido à baixa aquisição do sinal (menor que 70%), resultando em uma amostra com 14 homens e 15 mulheres. Todos os indivíduos tinham visão normal ou corrigida para normal. O consentimento informado por escrito foi obtido de todos os sujeitos.

5.4.3 Aquisição de sinal

A preparação inicial para realizar a aquisição do sinal ocorreu conforme protocolo experimental descrito na seção 2.5. Em seguida o experimento foi iniciado com as instruções sendo exibidas na tela do equipamento e após compreender as instruções o próprio participante, ao pressionar qualquer tecla do teclado, dava início a exibição de uma sequência de 21 imagens, cada uma delas expostas por 6 segundos e intervaladas pela exposição de uma tela preta por 4 segundos. Após a exibição das imagens o experimento é encerrado com uma tela de agradecimentos e é apresentado ao voluntário o resultado do seu rastreamento ocular.

5.4.3.1 *Reprodutibilidade experimental*

A reprodução experimental e coleta de sinal de novos voluntários usando o Tobii Studio podem ser feitas a partir do projeto que está disponível no link a seguir: <https://x.gd/J5FHW>

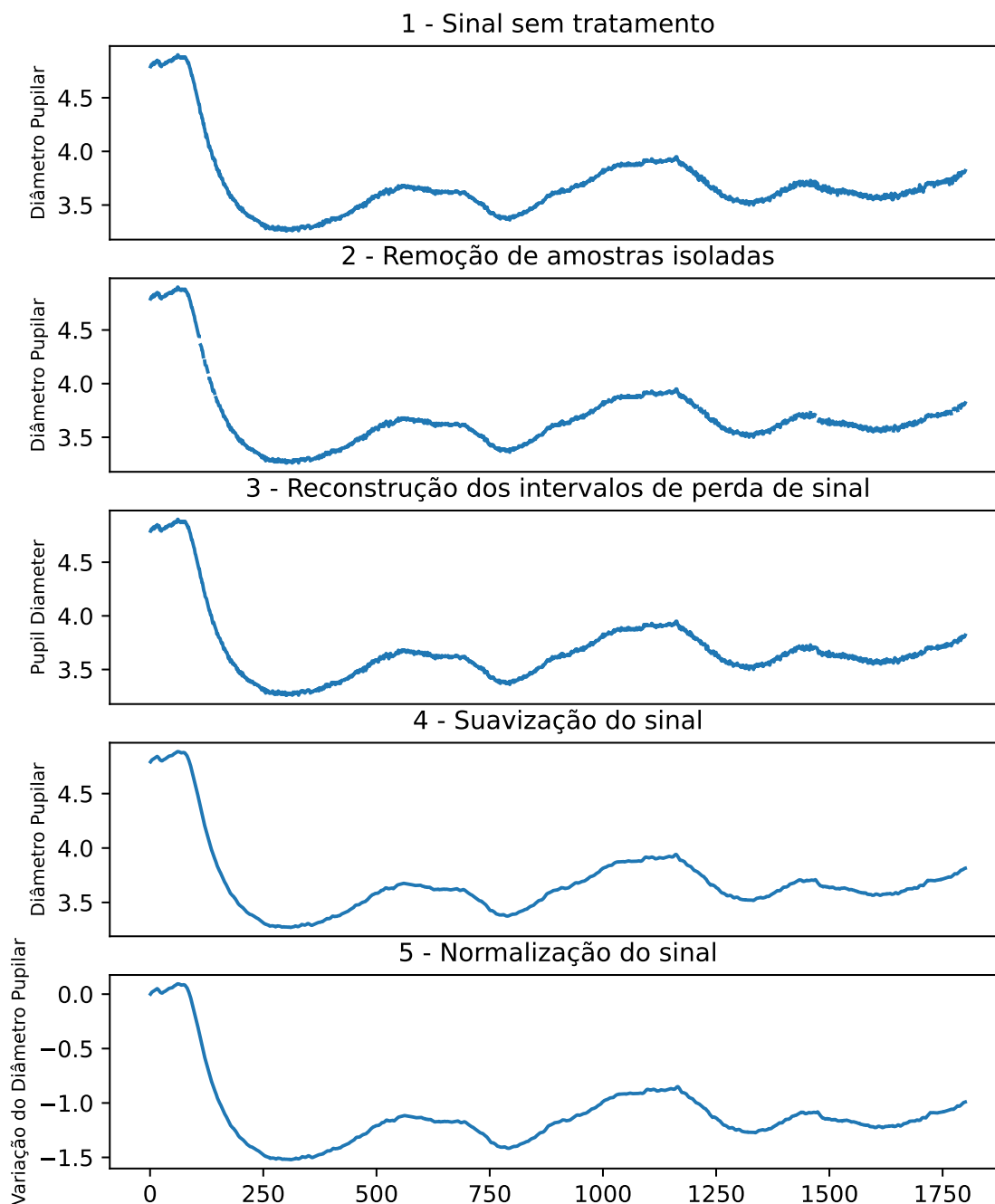
5.4.4 Pré-processamento do sinal

O experimento foi configurado para não gravar os dados de rastreamento ocular das telas de instruções e agradecimentos. Na primeira etapa de pré-processamento do sinal foram removidos todos os períodos de intervalo sem estímulo, em que era exibido uma tela preta. Portanto, a aquisição do sinal resultou em uma matriz de dados de dimensão 609x1800, em que 609 é a quantidade de amostras (29 participantes x 21 estímulos = 609 amostras) e 1800 é a quantidade de variáveis de cada amostra (300Hz de amostragem x 6 segundos = 1800 variáveis).

Considerando que é comum haver perda de sinal momentaneamente por ações involuntárias do sujeito, como piscadelas ou piscar de olhos (ORSI; FABBRO; THOMAZ, 2019), na etapa de

pré-processamento foi feito o tratamento do sinal original retirando amostras isoladas (outliers¹), reconstruindo os intervalos de perda de sinal, removendo o ruído e normalizando o sinal. Na Figura 61, é possível observar um exemplo do pré-processamento do sinal para um voluntário.

Figura 61 – Etapas do pré-processamento do sinal



Fonte: Autor

Legenda: O eixo das abscissas representa a amostragem do sinal considerando o registro de 300 amostras por segundo durante 6 segundos

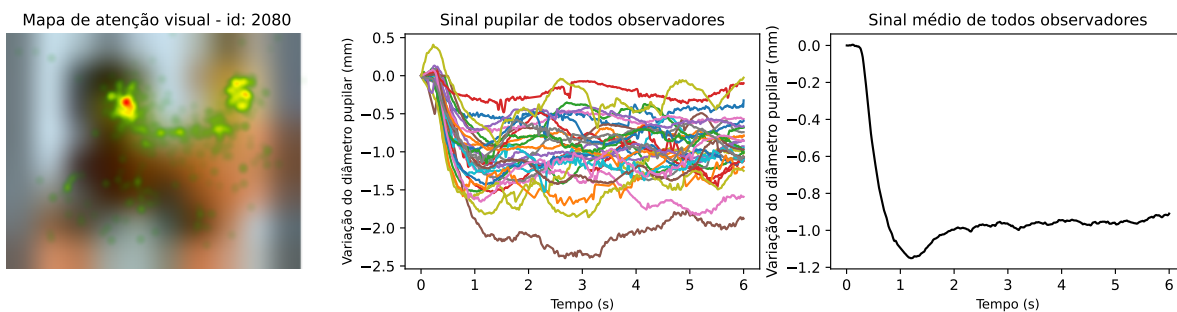
¹Outlier é uma observação que se encontra a uma distância anormal de outros valores em uma amostra aleatória de uma população. Outliers podem ser causados por vários fatores, como erro de medição, erro de entrada de dados ou presença de casos incomuns ou raros nos dados.

5.5 RESULTADOS

Após as etapas de pré-processamento do sinal, as amostras de cada voluntário foram categorizadas por estímulo, permitindo uma análise individual por imagem ou por classe.

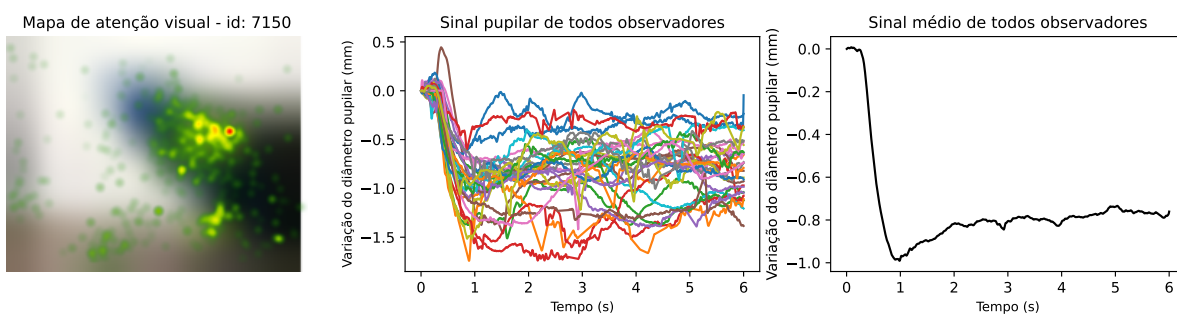
Nas Figuras 62, 63 e 64 são apresentadas as características do sinal visual obtido a partir de uma amostra de cada classe, respectivamente. No primeiro quadro, é apresentado um mapa de atenção visual, obtido a partir da imagem original, mas aplicada sobre a imagem desfocada para preservar o direito de imagem do catálogo. No segundo quadro, é apresentado o sinal pupilar correspondente de todos os observadores e no terceiro quadro é apresentado o sinal médio.

Figura 62 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente positivo



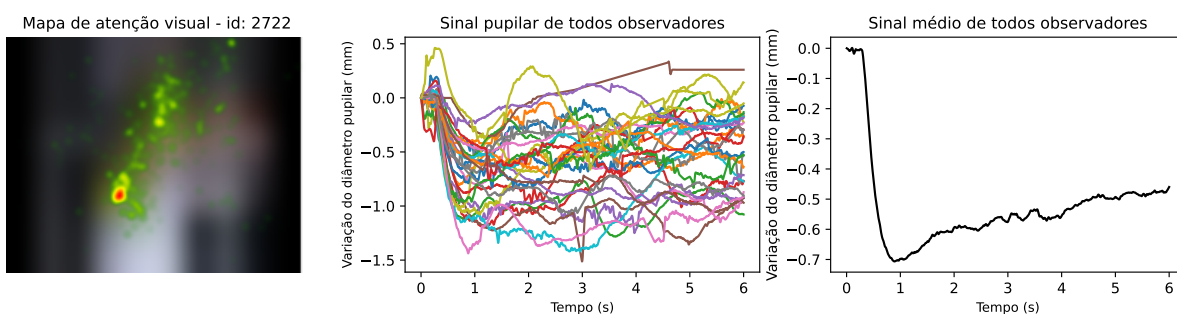
Fonte: Autor

Figura 63 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente neutro



Fonte: Autor

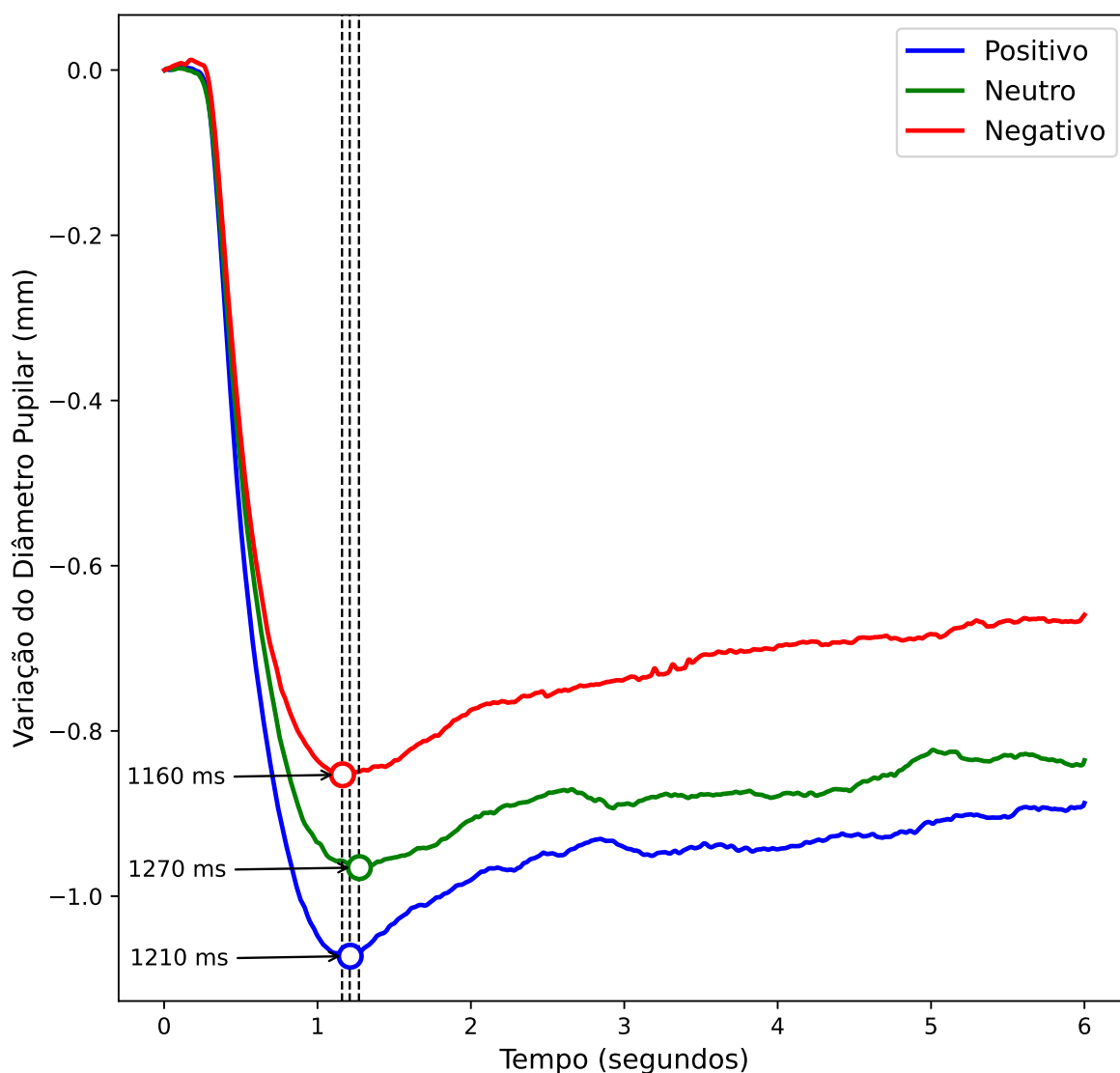
Figura 64 – Características do sinal visual de um estímulo emocionalmente negativo



Fonte: Autor

Nas Figuras 65 e 66, são apresentados os sinais médios por classe. Na Figura 65, é apresentado o sinal completo, com duração de 6 segundos, em que é possível observar que há uma constrição pupilar intensa nos primeiros 1000 milissegundos. Isso ocorreu devido a utilização de telas pretas entre a apresentação de cada estímulo, produzindo um alto contraste de luminosidade na tela do equipamento a cada troca de estímulo, que, conseqüentemente, forçou uma adaptação pupilar para controle de luminosidade (BEATTY; LUCERO-WAGONER, 2000; MCDOUGAL; GAMLIN, 2010). No entanto, é possível observar alguns pontos de inflexão a partir de 1160ms para estímulos negativos, 1210ms para estímulos positivos e 1270ms para estímulos neutros.

Figura 65 – Sinal pupilar médio por estímulo

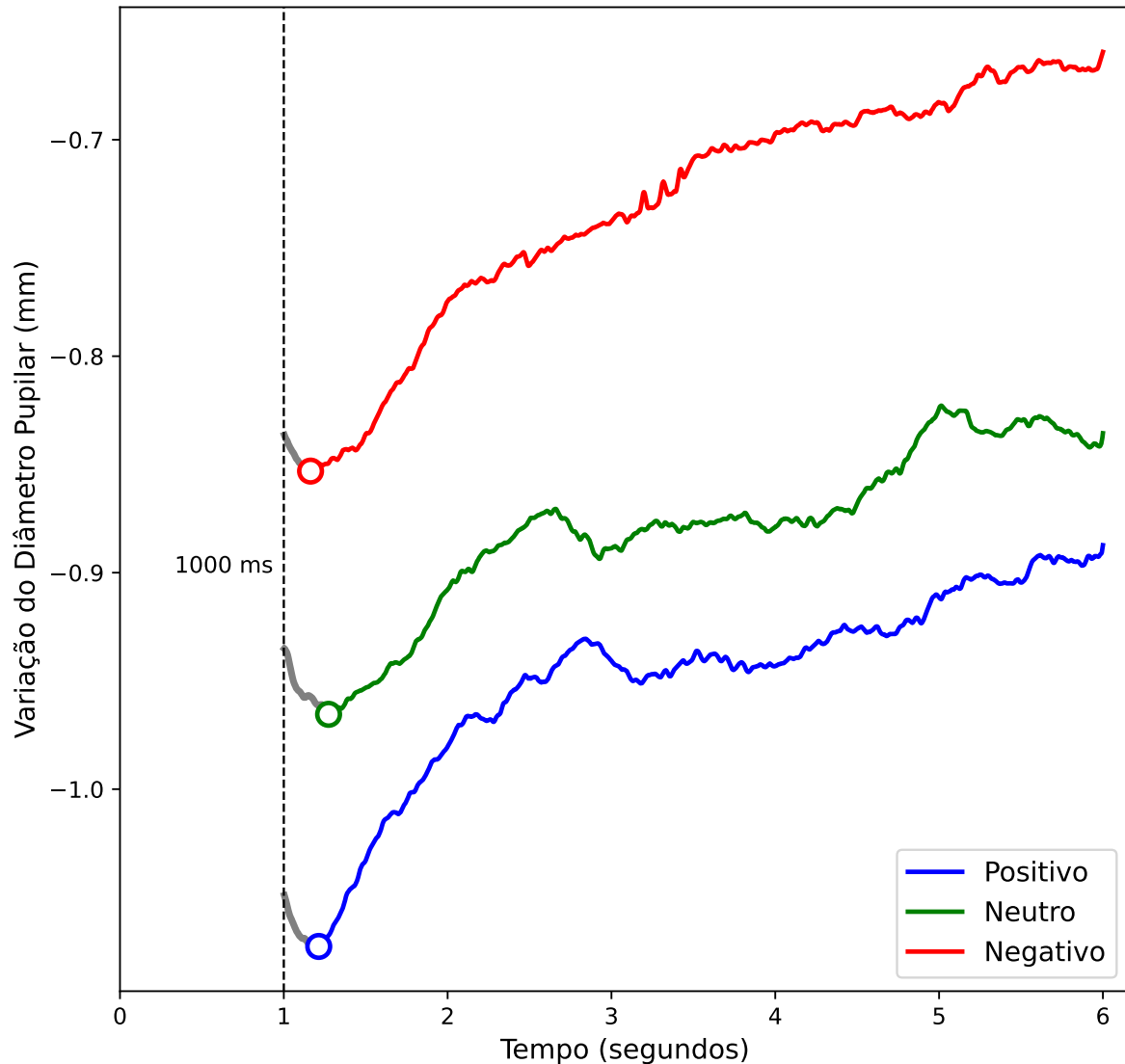


Fonte: Autor

Na Figura 66, são ilustradas as mesmas curvas, mas desprezando os primeiros 1000 milissegundos. Então, é possível ver mais claramente que há diferenças na dilatação pupilar

entre os estímulos positivos negativos e neutros. Os estímulos negativos apresentaram a maior dilatação pupilar, seguidos pelos estímulos neutros e pelos estímulos positivos que apresentaram a menor dilatação pupilar.

Figura 66 – Análise do sinal pupilar médio após remoção da primeiro segundo de gravação

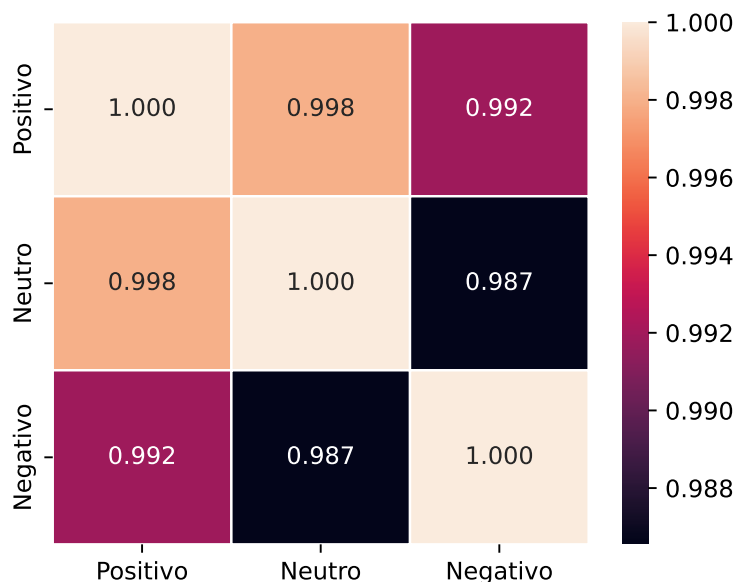


Fonte: Autor

Ao submeter o sinal médio de cada estímulo a uma análise de variância (ANOVA) (RUTHERFORD, 2011), pudemos evidenciar que há diferenças estatisticamente significativas entre as curvas, com $p < 0.01$ ($p\text{-value} = 6.15e^{-10}$). Por outro lado, também há um alto grau de relacionamento linear entre as amostras. Conforme análise de correlação (COHEN et al., 2009) apresentada na Figura 67, o menor coeficiente de correlação ocorreu entre os estímulos negativos e neutros e o maior entre positivos e neutros. Isso significa que, embora possuam características específicas, o formato do sinal pupilar dos estímulos positivos e neutros são proporcionalmente

mais parecidos entre si do que com o sinal pupilar dos estímulos negativos. Esse resultado destaca o estímulo negativo como sendo a categoria que provoca uma dilatação pupilar maior e mais distinta.

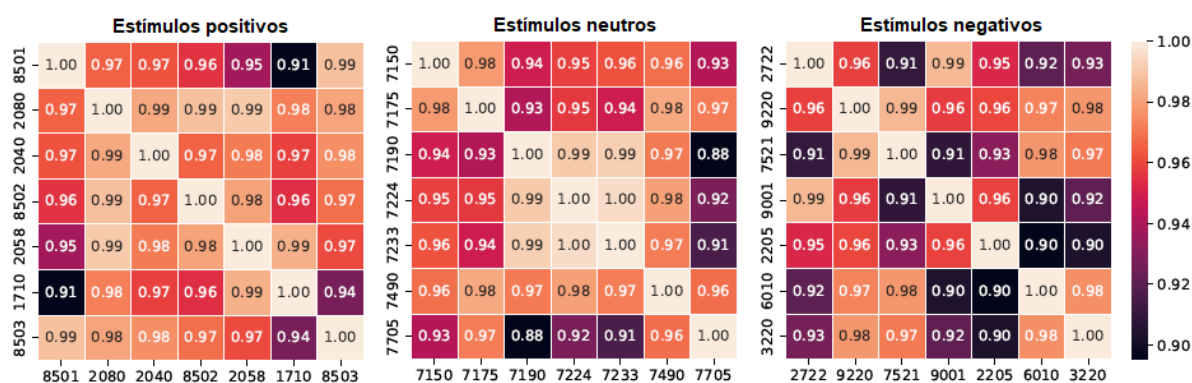
Figura 67 – Correlação do sinal pupilar médio entre classes



Fonte: Autor

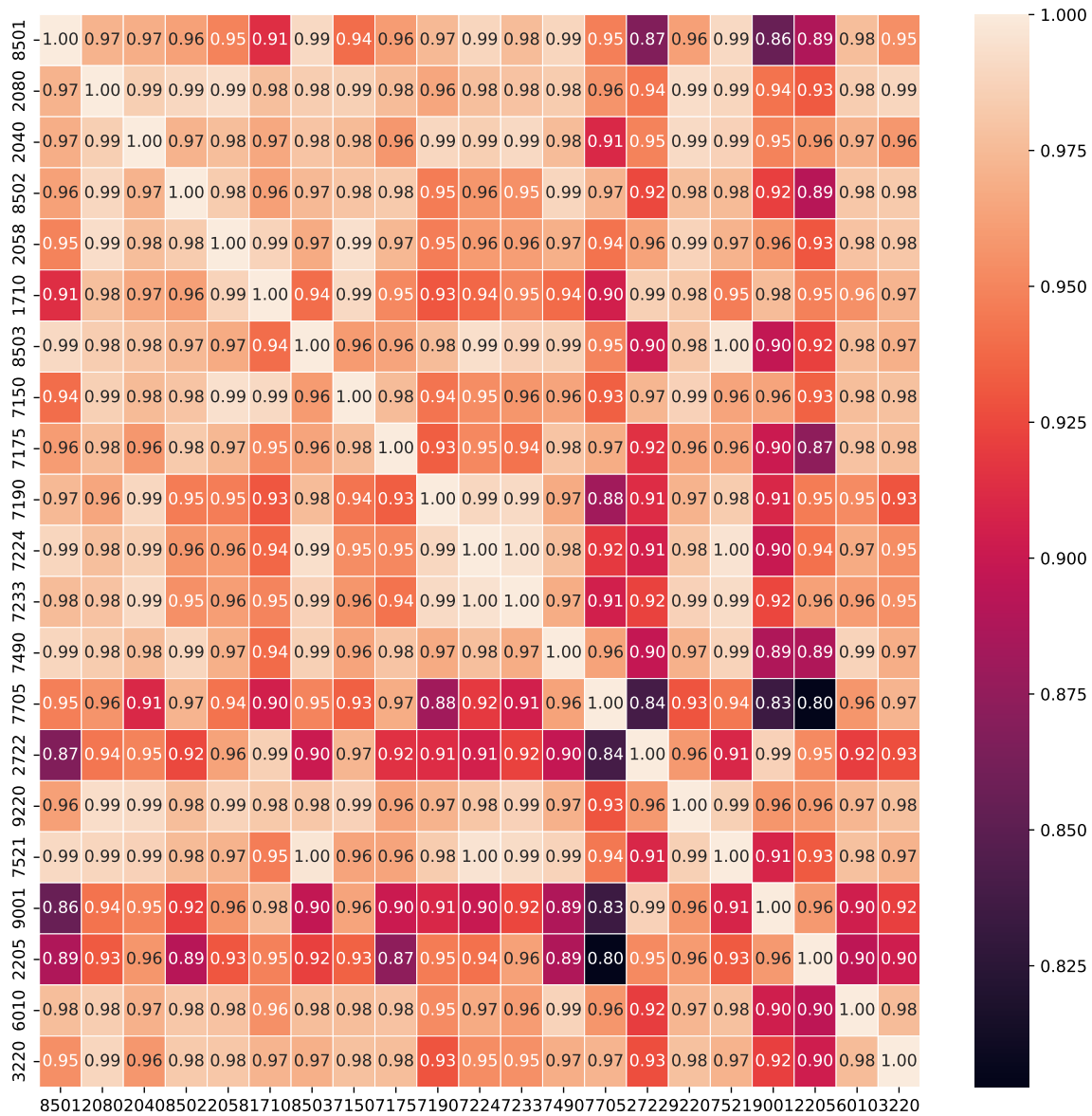
Adicionalmente, foram obtidos os coeficientes de correlação por estímulo intraclasse, apresentados na Figura 68, e os coeficientes de correlação entre todos os estímulos, apresentados na Figura 69. Em todos os casos há um alto grau de relacionamento linear entre as amostras, sendo 0.91 o menor coeficiente intraclasse dos estímulos positivos, 0.88 dos estímulos neutros e 0.90 dos estímulos negativos. Entre todos os estímulos, o menor coeficiente de correlação ocorreu entre as imagens de código 7705 e 2205, que são das classes de estímulos neutro e negativo, respectivamente.

Figura 68 – Correlação do sinal pupilar médio intraclasse



Fonte: Autor

Figura 69 – Correlação do sinal pupilar médio entre todos estímulos



Fonte: Autor

5.5.1 Reprodutibilidade dos resultados

Os resultados apresentados neste experimento podem ser reproduzidos a partir do conjunto de dados e do algoritmo que estão disponíveis nos links a seguir:

Conjunto de dados: <https://x.gd/cMwPv>

Algoritmo: <https://x.gd/3zW5Y>

5.6 DISCUSSÃO

Alguns estudos baseados na análise de imagens de ressonância magnética funcional mostram que a percepção de estímulos emocionais excita determinados circuitos neurais que mobilizam recursos de processamento cerebral com relativa vantagem competitiva em relação a estímulos neutros (VOLCHAN et al., 2003) e que o processamento de estímulos afetivos são modulados por uma atenção seletiva natural (SCHUPP et al., 2003; LANE; CHUA; DOLAN, 1999). Isso pode justificar porque a amplitude da dilatação pupilar mensurada neste experimento foi relativamente maior durante a percepção de estímulos negativos. Neste caso, o aumento da carga de trabalho mental pode estar associado a uma resposta comportamental defensiva e inconsciente (CAMPBELL; WOOD; MCBRIDE, 1997), impulsionada pela emoção.

A hipótese de que a emoção modula os estágios iniciais e finais de processamento visual (LANE; CHUA; DOLAN, 1999) são mais evidentes quando é comparada a dilatação pupilar entre os três tipos de estímulos, pois se considerarmos os estímulos neutros como controle, há um aumento na carga de trabalho mental para os estímulos negativos, mas há uma redução na carga de trabalho mental para os estímulos positivos. Hipoteticamente, os estímulos positivos não produzem nenhuma resposta inconsciente de defesa e, portanto, mobilizam menos recursos de processamento cerebral.

Considerando que neste experimento os sujeitos apenas contemplaram os estímulos visuais sem ser requerido a eles qualquer tipo de análise e que há uma diferença estatisticamente significativa na variação do diâmetro pupilar entre cada estímulo emocional, pode-se dizer que os resultados encontrados suportam a hipótese de que estímulos emocionais provocam respostas comportamentais correspondentes e que é possível detectar o aumento da carga de trabalho mental por meio da mensuração do diâmetro pupilar.

5.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados mostram que estímulos emocionais categorizados, mesmo que de média intensidade, provocam reações pupilares características e correspondentes. As evidências encontradas sugerem que a emoção modula o processamento cerebral e que é possível medir esse fenômeno monitorando o diâmetro pupilar. A percepção de estímulos emocionais negativos pode provocar uma resposta comportamental defensiva e inconsciente que mobiliza mais recursos de processamento cerebral do que estímulos neutros ou positivos. Neste contexto, o rastreamento ocular tem sido uma abordagem promissora para estudar o processamento cognitivo, podendo ser

aplicado em diversas áreas, como psicologia, neurociência e tecnologia, para explicar os efeitos e reações comportamentais provocados por estimulação emocional.

6 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo principal analisar as características dos movimentos oculares durante a realização de tarefas cognitivas. Para isso, foram realizados três estudos experimentais guiados por um protocolo padrão para aquisição de sinal visual correspondente e, respectivamente, foi apresentada uma análise de padrões visuais em tarefas de leitura com estímulos que simulam condições de estresse visual; uma análise da atenção visual durante a avaliação de expressões faciais de dor em neonatos; e uma análise da dilatação pupilar durante a percepção de estímulos emocionais categorizados.

Na primeira análise, foi utilizada uma abordagem de engenharia reversa para avaliar quantitativamente como uma pessoa lê um texto em português, e a partir dos dados de rastreamento ocular foram utilizadas técnicas de estatística multivariada para extrair e classificar padrões visuais de leitura. Os resultados experimentais sugerem que uma análise holística dos padrões de movimento ocular é mais vantajosa do que tentar traduzir todas as informações em parâmetros numéricos, e que a classificação automatizada pode ajudar a identificar o comportamento visual que contribui para o estresse visual durante a leitura. Por outro lado, a análise dos parâmetros de leitura pode ajudar a explicar semanticamente quais movimentos oculares não correspondem com os padrões visuais esperados e que, conseqüentemente, justificam a dificuldade de leitura.

Na segunda análise, foi utilizada a variação do diâmetro pupilar e a quantidade de fixações oculares para observar como ocorre a inferência sobre expressões faciais de dor em recém-nascidos. Os resultados experimentais mostraram que 2 segundos são suficientes para inferir visualmente a presença ou ausência de dor e que estímulos contendo expressões faciais de dor provocam dilatações pupilares maiores do que expressões faciais sem dor. Adicionalmente, é importante considerar que as mudanças no comportamento dos movimentos oculares após 2 segundos pode ser um fator de confusão ao analisar a área de interesse visual, pois percebe-se que há uma redução expressiva no número de fixações, com olhares estáticos sobre a mesma região, logo após obtida as impressões iniciais, que ocorreram nos 2 primeiros segundos. Considerando que a área de interesse é obtida por meio da soma das fixações correspondentes, é fundamental extrair as características somente dos momentos em que, de fato, o voluntário está obtendo informações para a sua tomada de decisão.

Na terceira análise, foi utilizada a variação do diâmetro pupilar para avaliar as reações do sistema nervoso autônomo diante de estímulos emocionalmente categorizados. Os resultados mostraram que estímulos emocionais provocam repostas comportamentais correspondentes e

que, em especial, os estímulos emocionalmente negativos podem mobilizar mais recursos de processamento cerebral do que estímulos positivos e neutros. Em outras palavras, e considerando que neste experimento não era requerido nenhuma tarefa mental além da contemplação dos estímulos, os resultados encontrados suportam a hipótese de que o aumento do diâmetro pupilar pode ser provocado por uma resposta inconsciente de defesa quando há a percepção de um estímulo emocionalmente negativo.

Em geral, a análise do olhar humano, por meio de estudos experimentais de rastreamento ocular, mostrou ser um método revelador para explicar padrões visuais em tarefas cognitivas, e robusto o suficiente para responder adequadamente algumas questões acerca de como o cérebro processa informações visuais e para quantificar a alocação de atenção visual em tarefas cognitivas. Acredita-se que os relatos descritos nesta tese podem ser aplicados na área clínica para realizar diagnósticos mais precisos acerca de condições de estresse visual e para fundamentar uma abordagem mais distinta e seletiva para análise de expressão facial de recém-nascidos.

Por fim, cabe ressaltar que o assunto abordado nesta tese é relativamente abrangente e que foram descritos aqui apenas alguns caminhos percorridos. Estudos futuros podem contemplar outras análises a partir da base de dados obtidas nestes experimentos, incluindo a utilização de novos métodos para classificação automatizada de padrões visuais, como, por exemplo, a utilização de redes neurais baseadas em álgebra tensorial, que geralmente são construídas usando uma arquitetura de aprendizado profundo, como as redes neurais convolucionais (CNN) ou as redes neurais recorrentes (RNN). Há pelo menos 86 tipos de variáveis relacionadas aos movimentos oculares que ainda não foram explorados em sua totalidade, como, por exemplo, o tempo de fixação do olhar em conjunto com a direção e amplitude de cada sacada, que podem ser utilizados, baseado no método de grafo, para modelar o comportamento da atenção visual e analisar a trajetória do olhar entre as áreas de interesse de forma mais simples e intuitiva. Além disso, para aprimorar os resultados encontrados, estudos futuros também podem contemplar a combinação dos métodos apresentados nesta tese com outras tecnologias para aquisição de biosinal, como, por exemplo, imagem por ressonância magnética funcional (fMRI) e eletroencefalografia (EEG).

REFERÊNCIAS

- ABDI, Hervé; WILLIAMS, Lynne J. Principal component analysis. **Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics**, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010.
- AHERN, Sylvia; BEATTY, Jackson. Pupillary responses during information processing vary with Scholastic Aptitude Test scores. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 205, n. 4412, p. 1289–1292, 1979.
- ALEXANDRIDIS, Evangelos; TELGER, Terry. **The pupil**. New York: Springer, 1985.
- ANAND, KJS; SCALZO, Frank M. Can adverse neonatal experiences alter brain development and subsequent behavior? **Neonatology**, Karger Publishers, v. 77, n. 2, p. 69–82, 2000.
- BALDA, Rita de Cássia Xavier et al. The recognition of facial expression of pain in full-term newborns by parents and health professionals. **Archives of pediatrics & adolescent medicine**, American Medical Association, v. 154, n. 10, p. 1009–1016, 2000.
- BARROS, Marina Carvalho de Moraes et al. Identification of pain in neonates: the adults' visual perception of neonatal facial features. **Journal of Perinatology**, Nature Publishing Group, v. 41, n. 9, p. 2304–2308, 2021.
- BATTY, Magali; TAYLOR, Margot J. Early processing of the six basic facial emotional expressions. **Cognitive Brain Research**, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 613–620, 2003.
- BEATTY, Jackson; KAHNEMAN, Daniel. Pupillary changes in two memory tasks. **Psychonomic Science**, Springer, v. 5, n. 10, p. 371–372, 1966.
- BEATTY, Jackson; LUCERO-WAGONER, Brennis. The pupillary system. **Handbook of psychophysiology**, v. 2, p. 142–162, 2000.
- BENGIO, Yoshua; GRANDVALET, Yves. No unbiased estimator of the variance of k-fold cross-validation. **Journal of machine learning research**, v. 5, Sep, p. 1089–1105, 2004.
- BERGSTROM, Jennifer Romano; SCHALL, Andrew. **Eye tracking in user experience design**. [S.l.]: Elsevier, 2014.
- BICALHO, Luíza Figueiras et al. Síndrome de irlen: Um olhar atendo sobre o funcionamento cerebral durante a leitura. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 6, n. 1, p. 35–44, 2015.
- BINDA, Paola; PEREVERZEVA, Maria; MURRAY, Scott O. Pupil size reflects the focus of feature-based attention. **Journal of neurophysiology**, American Physiological Society Bethesda, MD, v. 112, n. 12, p. 3046–3052, 2014.
- BITSIOS, P; SZABADI, E; BRADSHAW, CM. The inhibition of the pupillary light reflex by the threat of an electric shock: a potential laboratory model of human anxiety. **Journal of psychopharmacology**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 10, n. 4, p. 279–287, 1996.

BOULDOUKIAN, Joelle; WILKINS, Arnold J; EVANS, Bruce JW. Randomised controlled trial of the effect of coloured overlays on the rate of reading of people with specific learning difficulties. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 22, n. 1, p. 55–60, 2002.

BRADLEY, Margaret M et al. The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 4, p. 602–607, 2008.

BREMNER, Fion D. Pupillometric evaluation of the dynamics of the pupillary response to a brief light stimulus in healthy subjects. **Investigative ophthalmology & visual science**, The Association for Research in Vision e Ophthalmology, v. 53, n. 11, p. 7343–7347, 2012.

CAMPBELL, Byron A; WOOD, Gwendolyn; MCBRIDE, Thomas. Origins of orienting and defensive responses: An evolutionary perspective. **Attention and orienting: Sensory and motivational processes**, p. 41–67, 1997.

CARLINI, Lucas Pereira et al. A visual perception framework to analyse neonatal pain in face images. In: SPRINGER. INTERNATIONAL Conference on Image Analysis and Recognition. [S.l.: s.n.], 2020. P. 233–243.

CARROLL, Thomas Anthony; MULLANEY, Paul; EUSTACE, Peter. Dark adaptation in disabled readers screened for scotopic sensitivity syndrome. **Perceptual and motor skills**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 78, n. 1, p. 131–141, 1994.

CARTER, Benjamin T; LUKE, Steven G. Best practices in eye tracking research. **International Journal of Psychophysiology**, Elsevier, v. 155, p. 49–62, 2020.

CHOUINARD, Brea D et al. A functional neuroimaging case study of Meares–Irlen syndrome/visual stress (MISVis). **Brain topography**, Springer, v. 25, n. 3, p. 293–307, 2012.

COHEN, Israel et al. Pearson correlation coefficient. **Noise reduction in speech processing**, Springer, p. 1–4, 2009.

CORNSWEET, Tom. **Visual perception**. [S.l.]: Academic press, 2012.

CUSTERS, Ruud; AARTS, Henk. The unconscious will: How the pursuit of goals operates outside of conscious awareness. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 329, n. 5987, p. 47–50, 2010.

DE GRAAF, Joke et al. Long-term effects of routine morphine infusion in mechanically ventilated neonates on children's functioning: five-year follow-up of a randomized controlled trial. **Pain**, Elsevier, v. 152, n. 6, p. 1391–1397, 2011.

DELAITRE, Vincent et al. Scene semantics from long-term observation of people. In: SPRINGER. COMPUTER Vision–ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012, Proceedings, Part VI 12. [S.l.: s.n.], 2012. P. 284–298.

DEVIJVER, Pierre A; KITTLER, Josef. **Pattern recognition: a statistical approach**. [S.l.]: Prentice hall, 1982.

DIJK, Monique van et al. Observational visual analog scale in pediatric pain assessment: useful tool or good riddance? **The Clinical journal of pain**, LWW, v. 18, n. 5, p. 310–316, 2002.

DUCHOWSKI, Andrew T. **Eye tracking methodology: theory and practice**. [S.l.]: Springer, 2017.

EBISAWA, Yoshinobu. Unconstrained pupil detection technique using two light sources and the image difference method. **WIT Transactions on Information and Communication Technologies**, WIT Press, v. 15, 1970.

EBISAWA, Yoshinobu; SATOH, S-I. Effectiveness of pupil area detection technique using two light sources and image difference method. In: IEEE. ENGINEERING in Medicine and Biology Society, 1993. Proceedings of the 15th Annual International Conference of the IEEE. [S.l.: s.n.], 1993. P. 1268–1269.

EGEDE, Joy et al. Automatic neonatal pain estimation: An acute pain in neonates database. In: IEEE. 2019 8th international conference on affective computing and intelligent interaction (ACII). [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–7.

EGGER, Maria; LEY, Matthias; HANKE, Sten. Emotion recognition from physiological signal analysis: A review. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, Elsevier, v. 343, p. 35–55, 2019.

EVANS, Bruce JW; ALLEN, Peter M; WILKINS, Arnold J. A Delphi study to develop practical diagnostic guidelines for visual stress (pattern-related visual stress). **Journal of optometry**, Elsevier, v. 10, n. 3, p. 161–168, 2017.

EVANS, Bruce JW; JOSEPH, Florence. The effect of coloured filters on the rate of reading in an adult student population. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 22, n. 6, p. 535–545, 2002.

FARIA, Laura Nequini de. Frequência da Síndrome de Meares-Irlen entre alunos com dificuldades de leitura observadas no contexto escolar. **Instituto de Ciências Biológicas da UFMG**, UFMG, 2011.

FISHER, Ronald A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. **Annals of human genetics**, Wiley Online Library, v. 7, n. 2, p. 179–188, 1936.

FUKUNAGA, Keinosuke. **Introduction to statistical pattern recognition**. 2. ed. [S.l.]: Academic press, 2013.

GARCIA, Ana Carla Oliveira; SANTOS, Teresa Maria Momensohn; VILHENA, Douglas de Araújo. Effects of spectral overlays on reading performance of brazilian elementary school children. **Folia Phoniatica et Logopaedica**, Karger Publishers, v. 69, n. 5-6, p. 219–225, 2017.

GAZZANIGA, Michael; IVRY, Richard; MANGUN, George. **Cognitive Neuroscience: the Biology of the Mind**. 4. ed. New York: W. W. Norton, 2014.

GILMORE, John H; KNICKMEYER, Rebecca C; GAO, Wei. Imaging structural and functional brain development in early childhood. **Nature Reviews Neuroscience**, Nature Publishing Group, v. 19, n. 3, p. 123, 2018.

GKIKAS, Stefanos; TSIKNAKIS, Manolis. Automatic assessment of pain based on deep learning methods: A systematic review. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, Elsevier, v. 231, p. 107365, 2023.

GOODALE, Melvyn A. Transforming vision into action. **Vision research**, Elsevier, v. 51, n. 13, p. 1567–1587, 2011.

GREGORI, Ivan RS; SANCHES, Ivandro; THOMAZ, Carlos E. Clutch judder classification and prediction: A multivariate statistical analysis based on torque signals. **IEEE transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 64, n. 5, p. 4287–4295, 2016.

GRUNAU, Ruth E; HOLSTI, Liisa; PETERS, Jeroen WB. Long-term consequences of pain in human neonates. In: ELSEVIER, 4. SEMINARS in Fetal and Neonatal Medicine. [S.l.: s.n.], 2006. v. 11, p. 268–275.

GRUNAU, Ruth E et al. Neonatal pain, parenting stress and interaction, in relation to cognitive and motor development at 8 and 18 months in preterm infants. **Pain**, Elsevier, v. 143, n. 1-2, p. 138–146, 2009.

GRUNAU, Ruth VE; CRAIG, Kenneth D. Pain expression in neonates: facial action and cry. **Pain**, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 395–410, 1987.

GRUNAU, Ruth VE; JOHNSTON, C Celeste; CRAIG, Kenneth D. Neonatal facial and cry responses to invasive and non-invasive procedures. **Pain**, Elsevier, v. 42, n. 3, p. 295–305, 1990.

GUERRA, L; COZENZA, R. **Neurociência e Educação**: como o cérebro aprende. Porto Alegre: Artmed, 2011.

GUESTRIN, Elias Daniel; EIZENMAN, Moshe. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. **IEEE Transactions on biomedical engineering**, IEEE, v. 53, n. 6, p. 1124–1133, 2006.

GUIMARAES, Marcia Reis; GUIMARAES, Ricardo. Por que ler pode ser tão difícil Síndrome de Irlen & Distúrbios do Processamento Visual pela Via Magnocelular. **XXVI Encontro Nacional de Professores do PROEPRE**, 2013.

GUINSBURG, Ruth. Avaliação e tratamento da dor no recém-nascido. **J Pediatr (Rio J)**, v. 75, n. 3, p. 149–60, 1999.

GUINSBURG, Ruth et al. Are behavioral scales suitable for preterm and term neonatal pain assessment? In: INT ASSOC STUDY PAIN (IASP) PRESS. PROCEEDINGS of the 8th World Congress on Pain. [S.l.: s.n.], 1997.

HEIDERICH, Tatiany Marcondes; BARROS, Marina Carvalho de Moraes; GUINSBURG, Ruth. Inter-observer agreement in the identification of pain faces in full-term and late preterm

newborns: cross-sectional study. **Brazilian Journal of Pain**, Sociedade Brasileira para o Estudo da Dor, v. 3, n. 4, p. 348–353, 2020.

HEIDERICH, Tatianny Marcondes; LESLIE, Ana Teresa Figueiredo Stochero; GUINSBURG, Ruth. Neonatal procedural pain can be assessed by computer software that has good sensitivity and specificity to detect facial movements. **Acta Paediatrica**, Wiley Online Library, v. 104, n. 2, e63–e69, 2015.

HENDERSON, Lisa M; TSOGKA, Natassa; SNOWLING, Margaret J. Questioning the benefits that coloured overlays can have for reading in students with and without dyslexia. **Journal of Research in Special Educational Needs**, Wiley Online Library, v. 13, n. 1, p. 57–65, 2013.

HENTSCHEL, Juliane et al. Neonatal facial movements in the first minutes of life-eye opening and tongue thrust: an observational study. **American Journal of Perinatology**, © Thieme Medical Publishers, v. 24, n. 10, p. 611–618, 2007.

HESS, Eckhard H. Attitude and pupil size. **Scientific american**, Scientific American, Inc., 1965.

HESS, Eckhard H; PETROVICH, Slobodan B. Pupillary behavior in communication. **Nonverbal behavior and communication**, Erlbaum: Hillsdale, NJ, v. 1, p. 327–348, 1987.

HESS, Eckhard H; POLT, James M. Pupil size as related to interest value of visual stimuli. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 132, n. 3423, p. 349–350, 1960.

HESS, Eckhard H; POLT, James M. Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 143, n. 3611, p. 1190–1192, 1964.

HESS, Eckhard H; POLT, James M. Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 143, n. 3611, p. 1190–1192, 1964.

HO, Chun-Heng; LU, Yen-Nien. Can pupil size be measured to assess design products? **International Journal of Industrial Ergonomics**, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 436–441, 2014.

HOLLIS, Jarrod; ALLEN, Peter M. Screening for Meares–Irlen sensitivity in adults: Can assessment methods predict changes in reading speed? **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 26, n. 6, p. 566–571, 2006.

HUDSON-BARR, Diane et al. Validation of the pain assessment in neonates (PAIN) scale with the neonatal infant pain scale (NIPS). **Neonatal Network**, Springer, v. 21, n. 6, p. 15–21, 2002.

HUFF, Trevor; MAHABADI, Navid; TADI, Prasanna. Neuroanatomy, visual cortex. StatPearls Publishing, 2019.

HYÖNÄ, Jukka; TOMMOLA, Jorma; ALAJA, Anna-Mari. Pupil dilation as a measure of processing load in simultaneous interpretation and other language tasks. **The Quarterly Journal of Experimental Psychology**, Taylor & Francis, v. 48, n. 3, p. 598–612, 1995.

IRLEN, Helen. **Reading by the colors: Overcoming dyslexia and other reading disabilities through the Irlen method.** [S.l.]: Penguin, 2005.

IRLEN, Helen. **The Irlen revolution: a guide to changing your perception and your life.** [S.l.]: Square One Publishers, Inc., 2012.

IRLEN, Helen L. **Method and apparatus of treatment of symptoms of the Irlen syndrom.** [S.l.]: Google Patents, 1990. US Patent 4,961,640.

IRLENINSTITUTE. **Irlen Institute.** [S.l.: s.n.], 2020. Acessado em 03 de Abril de 2020. Disponível em: <https://irlen.com/>.

JOHNSON, RA; WICHERN, DW. Applied multivariate statistical analysis. 4th prentice hall. **Applied multivariate statistical analysis, 4th edition, Prentice Hall, New Jersey, USA**, v. 1, 1998.

KAHNEMAN, Daniel. **Thinking, fast and slow.** New York: Farrar, Straus e Giroux, 2011.

KAHNEMAN, Daniel; BEATTY, Jackson. Pupil diameter and load on memory. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 154, n. 3756, p. 1583–1585, 1966.

KAHNEMAN, Daniel; WRIGHT, Patricia. Changes of pupil size and rehearsal strategies in a short-term memory task. **The Quarterly journal of experimental psychology**, Taylor & Francis, v. 23, n. 2, p. 187–196, 1971.

KAHNEMAN, Daniel et al. Pupillary, heart rate, and skin resistance changes during a mental task. **Journal of experimental psychology**, American Psychological Association, v. 79, 1p1, p. 164, 1969.

KANDEL, Eric et al. **Princípios de Neurociências.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014.

KIM, Ji Hyun et al. Functional magnetic resonance imaging findings in meares-irlen syndrome: A pilot sudy. **Korean Journal of Ophthalmology**, v. 29, n. 2, p. 121–125, 2015.

LANE, Richard D; CHUA, Phyllis ML; DOLAN, Raymond J. Common effects of emotional valence, arousal and attention on neural activation during visual processing of pictures. **Neuropsychologia**, Elsevier, v. 37, n. 9, p. 989–997, 1999.

LANE, Richard D et al. Neuroanatomical correlates of pleasant and unpleasant emotion. **Neuropsychologia**, Elsevier, v. 35, n. 11, p. 1437–1444, 1997.

LANG, Peter J; BRADLEY, Margaret M; CUTHBERT, Bruce N. International affective picture system, 1988.

LANG, Peter J; BRADLEY, Margaret M; CUTHBERT, Bruce N et al. **International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual.** [S.l.]: NIMH, Center for the Study of Emotion & Attention Gainesville, FL, 2005.

- LANG, Peter J; MCTEAGUE, Lisa M; BRADLEY, Margaret M. RDoC, DSM, and the reflex physiology of fear: A biodimensional analysis of the anxiety disorders spectrum. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 53, n. 3, p. 336–347, 2016.
- LEWINE, Jeffrey David et al. A magnetoencephalographic investigation of visual information processing in Irlen's Scotopic Sensitivity Syndrome. **Conducted at The Center for Advanced Medical Technologies, The University of Utah School of Medicine, Salt Lake City, Utah, and Department of Psychology, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico**, 1997.
- LIM, Jia Zheng; MOUNTSTEPHENS, James; TEO, Jason. Emotion recognition using eye-tracking: taxonomy, review and current challenges. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 8, p. 2384, 2020.
- LOE, Stephen J; WATSON, Kenneth. A prospective genetic marker of the visual-perception disorder Meares-Irlen syndrome. **Perceptual and motor skills**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 114, n. 3, p. 870–882, 2012.
- MARIEB, Elaine N; WILHELM, Patricia B; MALLAT, Jon. **Anatomia humana**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- MARX, Esther et al. Eyes open and eyes closed as rest conditions: impact on brain activation patterns. **Neuroimage**, Elsevier, v. 21, n. 4, p. 1818–1824, 2004.
- MATHÔT, Sebastiaan. Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function. **Journal of Cognition**, Ubiquity Press, v. 1, n. 1, 2018.
- MCDOUGAL, David H; GAMLIN, Paul D. The influence of intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response dynamics of the human pupillary light reflex. **Vision research**, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 72–87, 2010.
- MCKONE, Elinor; PALERMO, Romina. A strong role for nature in face recognition. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 107, n. 11, p. 4795–4796, 2010.
- MCTEAGUE, Lisa M et al. Fearful imagery in social phobia: generalization, comorbidity, and physiological reactivity. **Biological Psychiatry**, Elsevier, v. 65, n. 5, p. 374–382, 2009.
- MEARES, Olive. Figure/ground, brightness contrast, and reading disabilities. **Visible language**, Visible Language, etc., v. 14, n. 1, p. 13–29, 1980.
- MELO, Gleicia Martins de et al. Escalas de avaliação de dor em recém-nascidos: revisão integrativa. **Revista Paulista de Pediatria**, SciELO Brasil, v. 32, p. 395–402, 2014.
- MIKELS, Joseph A et al. Emotional category data on images from the International Affective Picture System. **Behavior research methods**, Springer, v. 37, n. 4, p. 626–630, 2005.
- MIYASAKA, Jordan Da Silva et al. Irlen syndrome: systematic review and level of evidence analysis. **Arquivos de neuro-psiquiatria**, v. 77 3, p. 194–207, 2019.

- MOLINA, Juliana et al. Classification of the International Affective Picture System (IAPS) images for teenagers of the city of São Paulo. **Psychology & Neuroscience**, Educational Publishing Foundation, v. 11, n. 1, p. 58, 2018.
- MONGER, Laura; WILKINS, Arnold; ALLEN, Peter. Identifying visual stress during a routine eye examination. **Journal of optometry**, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 140–145, 2015.
- NEWELL, Ben R; SHANKS, David R. Unconscious influences on decision making: A critical review. **Behavioral and brain sciences**, Cambridge University Press, v. 37, n. 1, p. 1–19, 2014.
- NICHOLS, SA et al. Screening for dyslexia, dyspraxia and Meares-Irlen syndrome in higher education. **Dyslexia**, Wiley Online Library, v. 15, n. 1, p. 42–60, 2009.
- NOBLE, Jeanne et al. A controlled field study of the use of coloured overlays on reading achievement. **Australian Journal of Learning Difficulties**, Taylor & Francis, v. 9, n. 2, p. 14–22, 2004.
- NORTHWAY, Nadia. Predicting the continued use of overlays in school children—a comparison of the Developmental Eye Movement test and the Rate of Reading test. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 23, n. 5, p. 457–464, 2003.
- O’CONNOR, Peter D et al. Reading disabilities and the effects of colored filters. **Journal of Learning Disabilities**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 23, n. 10, p. 597–603, 1990.
- OCHSNER, Kevin N; GROSS, James J. The cognitive control of emotion. **Trends in cognitive sciences**, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 242–249, 2005.
- OLSEN, Anneli. **The tobii i-vt fixation filter**. [S.l.], 2012.
- OLSSON, Emma et al. The use and reporting of neonatal pain scales: a systematic review of randomized trials. **Pain**, Wolters Kluwer Health, v. 162, n. 2, p. 353, 2021.
- ORSI, Rafael N; THOMAZ, Carlos E. Classificação automática do desempenho humano em tarefas cognitivas por meio da mensuração do diâmetro pupilar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. XXII Congresso Brasileiro de Automática - Sistemas Inteligentes. João Pessoa - PB, Brasil: CBA2018, set. 2018.
- ORSI, Rafael Nobre. **Análise da capacidade cognitiva humana por meio do processamento de sinais pupilares em testes visuais**. Fev. 2018. Diss. (Mestrado) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo - SP, Brazil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2018.
- ORSI, Rafael Nobre; FABBRO, Davi Araujo Dal; THOMAZ, Carlos Eduardo. Eye-Tracking Data Analysis During Cognitive Task. In: SPRINGER. COMPUTATIONAL Neuroscience: Second Latin American Workshop, LAWCN 2019, São João Del-Rei, Brazil, September 18–20, 2019, Proceedings 2. [S.l.: s.n.], 2019. P. 200–219.

ORSI, Rafael Nobre; THOMAZ, Carlos Eduardo. A reverse engineering framework to detect visual stress conditions. **Multimedia Tools and Applications**, 2022.

ORSI, Rafael Nobre et al. Visual attention during neonatal pain assessment: A 2-s exposure to a facial expression is sufficient. **Electronics Letters**, Wiley Online Library, v. 59, n. 6, e12756, 2023.

PARTALA, Timo; SURAKKA, Veikko. Pupil size variation as an indication of affective processing. **International journal of human-computer studies**, Elsevier, v. 59, n. 1, p. 185–198, 2003.

PEREIRA, Andrea Lübe de S Thiago et al. Validity of behavioral and physiologic parameters for acute pain assessment of term newborn infants. **São Paulo medical journal**, SciELO Brasil, v. 117, p. 72–80, 1999.

PEREIRA, JORGE RESENDE; REIS, AM; MAGALHÃES, ZITA. Neuroanatomia funcional: Anatomia das áreas activáveis nos usuais paradigmas em ressonância magnética funcional. **Acta médica portuguesa**, v. 16, p. 107–116, 2003.

PIRES, WILSON. A influência de imagens emocionais na dilatação pupilar e na tomada de decisão econômica intertemporal. Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2021.

PIRES, Wilson; ORSI, Rafael Nobre; THOMAZ, Carlos Eduardo. Influence of Emotional Stimuli on Human Pupillary Behavior. In: SPRINGER. COMPUTATIONAL Neuroscience: Second Latin American Workshop, LAWCN 2019, São João Del-Rei, Brazil, September 18–20, 2019. [S.l.: s.n.], 2019.

POOLE, Alex; BALL, Linden J. Eye tracking in HCI and usability research. **Encyclopedia of human computer interaction**, Idea Group Reference Hershey, PA, v. 1, p. 211–219, 2006.

PURVES, Dale et al. **Neurociências**. 4. ed. São Paulo: Artmed Editora, 2010.

RITCHIE, Stuart J; DELLA SALA, Sergio; MCINTOSH, Robert D. Irlen colored filters in the classroom: A 1-year follow-up. **Mind, Brain, and Education**, Wiley Online Library, v. 6, n. 2, p. 74–80, 2012.

RITCHIE, Stuart J; DELLA SALA, Sergio; MCINTOSH, Robert D. Irlen colored overlays do not alleviate reading difficulties. **Pediatrics**, Am Acad Pediatrics, v. 128, n. 4, e932–e938, 2011.

ROBINSON, GL et al. A biochemical analysis of people with chronic fatigue who have Irlen Syndrome: Speculation concerning immune system dysfunction. **Perceptual and Motor Skills**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 93, n. 2, p. 486–504, 2001.

ROBINSON, Gregory L; CONWAY, Robert NF. Irlen lenses & adults a small scale study of reading speed, accuracy, comprehension & self-image. **Australian Journal of Learning Difficulties**, Taylor & Francis, v. 5, n. 1, p. 4–13, 2000.

ROGERS, Kara. **The eye: the physiology of human perception**. [S.l.]: The Rosen Publishing Group, 2010.

ROMEI, Vincenzo et al. Resting electroencephalogram alpha-power over posterior sites indexes baseline visual cortex excitability. **Neuroreport**, LWW, v. 19, n. 2, p. 203–208, 2008.

ROMERA, Joao Vitor Macedo et al. Visual Patterns in Reading Tasks: An Eye-Tracking Analysis of Meares-Irlen Syndrome Simulation Effects. In: ANAIS do XV Workshop de Visão Computacional. [S.l.]: SBC, 2019. P. 131–136.

RUTHERFORD, Andrew. **ANOVA and ANCOVA: a GLM approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

RYPMA, Bart et al. Neural correlates of cognitive efficiency. **Neuroimage**, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 969–979, 2006.

SALZWEDEL, Andrew P et al. Development of amygdala functional connectivity during infancy and its relationship with 4-year behavioral outcomes. **Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging**, Elsevier, 2018.

SCHIAVENATO, Martin et al. Neonatal pain facial expression: Evaluating the primal face of pain. **Pain**, Elsevier, v. 138, n. 2, p. 460–471, 2008.

SCHMOLESKY, Matthew T. Primary Visual Cortex. In: **Encyclopedia of Neuroscience**. Edição: Marc D. Binder, Nobutaka Hirokawa e Uwe Windhorst. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. P. 3276–3277. ISBN 978-3-540-29678-2. DOI: 10.1007/978-3-540-29678-2_4790.

SCHUPP, Harald T et al. Emotional facilitation of sensory processing in the visual cortex. **Psychological science**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 14, n. 1, p. 7–13, 2003.

SELVANATHAN, Thiviya et al. Early-life exposure to analgesia and 18-month neurodevelopmental outcomes in very preterm infants. **Pediatric Research**, Nature Publishing Group US New York, p. 1–9, 2023.

SHARMA, Priyanka; KAUR, Manavjeet. Classification in pattern recognition: A review. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, v. 3, n. 4, 2013.

SILVA, Laercio. **Um estudo sobre mapeamento cerebral e análise de movimentos oculares em jogadores de xadrez**. Fev. 2017. Diss. (Mestrado) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo - SP, Brazil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2017.

SKARAMAGKAS, Vasileios et al. Review of eye tracking metrics involved in emotional and cognitive processes. **IEEE Reviews in Biomedical Engineering**, IEEE, v. 16, p. 260–277, 2021.

SOARES, Fernanda Amaral; GONTIJO, Lucília Silva. Production of knowledge: genetic basis, biochemical and immunological of Meares-Irlen Syndrome. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, SciELO Brasil, v. 75, n. 5, p. 412–415, 2016.

SOARES, Juliana do Carmo Azevedo et al. Looking at neonatal facial features of pain: do health and non-health professionals differ? **Jornal de pediatria**, Elsevier, v. 1, 2021.

SOARES, Juliana do Carmo Azevedo et al. Looking at neonatal facial features of pain: do health and non-health professionals differ? **Jornal de Pediatria**, SciELO Brasil, v. 98, p. 406–412, 2022.

SOLÉ, Isabel. **Estratégias de Leitura-6**. [S.l.]: Penso Editora, 2015.

SOLEYMANI, Mohammad; PANTIC, Maja; PUN, Thierry. Multimodal emotion recognition in response to videos. **IEEE transactions on affective computing**, IEEE, v. 3, n. 2, p. 211–223, 2011.

SPARKES, DL et al. Plasma Cholesterol levels and Irlen Syndrome: Preliminary Study of 10-to 17-yr.-old students. **Perceptual and motor skills**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 97, n. 3, p. 743–752, 2003.

TAMANAKA, Fernanda G et al. Neonatal pain assessment: A Kendall analysis between clinical and visually perceived facial features. **Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization**, Taylor & Francis, v. 1, p. 1–10, 2022.

TENORIO, Eliana Zacchi; THOMAZ, Carlos Eduardo. Análise multilinear discriminante de formas frontais de imagens 2d de face. In: PROCEEDINGS of the X Simposio Brasileiro de Automacao Inteligente SBAI. [S.l.: s.n.], 2011. P. 266–271.

THOMAZ, Carlos E et al. A multivariate statistical analysis of the developing human brain in preterm infants. **Image and Vision Computing**, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 981–994, 2007.

THOMAZ, Carlos Eduardo et al. A multi-linear discriminant analysis of 2D frontal face images. In: IEEE. 2009 XXII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. [S.l.: s.n.], 2009. P. 216–223.

THOMAZ, CE et al. A priori-driven multivariate statistical approach to reduce dimensionality of MEG signals. **Electronics letters**, IET, v. 49, n. 18, p. 1123–1124, 2013.

TOBII, Technology. **Accuracy and precision test report**. 2.1.7. ed. [S.l.], 2013. Rev AB.

TOBII, Technology. **Tobii Studio**. 3.4.5. ed. [S.l.], 2016.

VOLCHAN, Eliane et al. Estímulos emocionais: processamento sensorial e respostas motoras. **Brazilian Journal of Psychiatry**, SciELO Brasil, v. 25, p. 29–32, 2003.

WADE, Nicholas; TATLER, Benjamin W et al. **The moving tablet of the eye: The origins of modern eye movement research**. [S.l.]: Oxford University Press, USA, 2005.

WALDIE, Michelle; WILKINS, Arnold. How big does a coloured overlay have to be? **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 24, n. 1, p. 57–60, 2004.

WHITING, PR; ROBINSON, GL. The interpretation of emotion from facial expression for children with irlen syndrome. In: SEVENTH International Irlen Conference, Vancouver, Canada. [S.l.: s.n.], 2002.

WILKINS, A Jeanes et al. Rate of Reading Test®: its reliability, and its validity in the assessment of the effects of coloured overlays. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 16, n. 6, p. 491–497, 1996.

WILKINS, AJ. Reading through colour. **Chichester (EG): Wiley**, 2003.

WILKINS, Arnold; NEARY, Catherine. Some visual, optometric and perceptual effects of coloured glasses. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Wiley Online Library, v. 11, n. 2, p. 163–171, 1991.

WILKINS, Arnold J. **Visual stress**. [S.l.]: Oxford University Press, 1995.

WILKINSON, Krista M; LIGHT, Janice. Preliminary investigation of visual attention to human figures in photographs: Potential considerations for the design of aided AAC visual scene displays. **Journal of Speech, Language, and Hearing Research**, ASHA, v. 54, n. 6, p. 1644–1657, 2011.

WILMER, Jeremy B et al. Human face recognition ability is specific and highly heritable. **Proceedings of the National Academy of sciences**, National Acad Sciences, v. 107, n. 11, p. 5238–5241, 2010.

WYATT, Harry J. The form of the human pupil. **Vision Research**, Elsevier, v. 35, n. 14, p. 2021–2036, 1995.

YAN, Hu; DAI, Yu. The comparison of five discriminant methods. In: IEEE. 2011 International Conference on Management and Service Science. [S.l.: s.n.], 2011. P. 1–4.

ZAMANI, N. Is international affective picture system (IAPS) appropriate for using in Iranian culture, comparing to the original normative rating based on a North American sample. **European Psychiatry**, Elsevier, v. 41, s520, 2017.

ZAMZMI, Ghada et al. A comprehensive and context-sensitive neonatal pain assessment using computer vision. **IEEE Transactions on Affective Computing**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 28–45, 2019.

ZAMZMI, Ghada et al. Convolutional neural networks for neonatal pain assessment. **IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science**, IEEE, v. 1, n. 3, p. 192–200, 2019.

ZHENG, Wei-Long; DONG, Bo-Nan; LU, Bao-Liang. Multimodal emotion recognition using EEG and eye tracking data. In: IEEE. 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. [S.l.: s.n.], 2014. P. 5040–5043.