

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RAFAEL NOBRE ORSI

**ANÁLISE DA CAPACIDADE COGNITIVA HUMANA POR MEIO DO
PROCESSAMENTO DE SINAIS PUPILARES EM TESTES VISUAIS**

São Bernardo do Campo

2018

RAFAEL NOBRE ORSI

**ANÁLISE DA CAPACIDADE COGNITIVA HUMANA POR MEIO DO
PROCESSAMENTO DE SINAIS PUPILARES EM TESTES VISUAIS**

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

São Bernardo do Campo

2018

Orsi, Rafael Nobre.

Análise da capacidade cognitiva humana por meio do processamento de sinais pupilares em testes visuais / Rafael Nobre Orsi. São Bernardo do Campo, 2018.

154 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

1. Pupila. 2. Cognição. 3. Desempenho cognitivo. 4. Processamento de sinais. I. Thomaz, Carlos Eduardo, orient. II. Título.

Aluno: Rafael Nobre Orsi

Matrícula: 115318-8

Título do Trabalho: Análise da capacidade cognitiva humana por meio do processamento de sinais pupilares em testes visuais.

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Imagens

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Data da realização da defesa: 28/02/2018

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 28 / 02 / 2018.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Ass.: _____

Prof.^a Dr.^a Paula Dornhofer Paro Costa

Ass.: _____

Prof. Dr. Paulo Sérgio Silva Rodrigues

Ass.: _____

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

APROVADO

REPROVADO

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA**

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 me qualifique cada vez mais. 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 dissertação e pela confiança depositada em mim.

Aos professores do Centro Universitário FEI, pelo incentivo e pelas aulas ministradas: Prof. Dr. Ivandro Sanches, Prof. Dr. Paulo Sergio Silva Rodrigues, Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior e Prof. Dr Flavio Tonidandel.

À diretora da ETEC de Itaquera, Marília Olhero Sclavo e demais membros da equipe gestora, pelo apoio e incentivo que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do mestrado, pela cooperação e compartilhamento de conhecimentos. E à todos os voluntários que contribuíram para o desenvolvimento dos experimentos.

RESUMO

A cognição humana é algo que desperta o interesse do homem desde os primórdios de sua história. No entanto, muitos processos cognitivos ainda não podem ser explicados pela ciência. Neste contexto, esta dissertação propõe um estudo sobre as reações do sistema nervoso por meio de estímulos ao sistema cognitivo. Mais especificamente, a proposta foi utilizar técnicas de processamento de sinais e estatística multivariada para avaliar a intensidade de esforço mental e o desempenho cognitivo por meio da mensuração do diâmetro pupilar. Este trabalho realizou dois experimentos cognitivos, onde os voluntários foram submetidos a estímulos visuais ao mesmo tempo em que era adquirido o sinal pupilar. Ambos experimentos contaram com um teste cognitivo computadorizado e foram aplicados utilizando um equipamento de rastreamento ocular, um microcomputador e um software de apoio para apresentação do estímulo e calibração do equipamento. Os dados coletados foram tratados e processados com o auxílio de duas plataformas de desenvolvimento para processamento de sinais e computação estatística. Os resultados alcançados apontam que existe uma relação entre a carga cognitiva e a variação do diâmetro pupilar, mostrando que a pupila é um indicador sensível ao esforço mental. Como contribuição original, os resultados também mostram que é possível projetar classificadores estatísticos para prever automaticamente o desempenho de humanos em tarefas cognitivas, se tal previsão, considerar os sinais pupilares como um todo e não somente um resumo de sua variação.

Palavras-chave: Pupila. Cognição. Desempenho cognitivo. Processamento de sinais.

ABSTRACT

Human cognition is something that has aroused the interest of man since the dawn of its history. However, many cognitive processes cannot yet be explained by science. In this context, this dissertation proposes a study on the reactions of the nervous system through stimuli to the cognitive system. More specifically, the proposal was to use of signals processing techniques and multivariate statistic to assess mental effort intensity and cognitive performance through measurement of the pupillary diameter. This work carried out two cognitive experiments, where the volunteers were submitted to visual stimuli at the same time that the pupillary signal was acquired. Both experiments had a computerized cognitive test and were applied using an eye tracking equipment, a microcomputer and support software to present equipment stimulation and calibration. The data collected were treated and processed with the aid of two development platforms for signal processing and statistical computation. The results achieved show that there is a relationship between the cognitive load and pupillary diameter variation, showing that the pupil is an indicator sensitive to mental effort. As an original contribution, the results also show that it is possible to design statistical classifiers to automatically predict the performance of humans in cognitive tasks, if such a prediction, to consider the pupillary signals as a whole and not only a summary of their variation.

Keywords: Pupil. Cognition. Cognitive performance. Signals processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura do processo da cognição. | 26 |
| Figura 2 – Tipos de memória. | 30 |
| Figura 3 – Expressões faciais das emoções básicas. | 35 |
| Figura 4 – Rede semântica. | 36 |
| Figura 5 – Técnicas empregadas na ciência da cognição. | 40 |
| Figura 6 – Funções do sistema nervoso. | 41 |
| Figura 7 – Divisões do sistema nervoso: SNC e SNP. | 42 |
| Figura 8 – Estrutura de um neurônio motor. | 44 |
| Figura 9 – Estrutura de uma sinapse. | 45 |
| Figura 10 – Classe estrutural de um neurônio. | 46 |
| Figura 11 – Classe funcional de um neurônio. | 46 |
| Figura 12 – Componentes de um arco reflexo. | 47 |
| Figura 13 – Tipos de arcos reflexos. | 48 |
| Figura 14 – Circuitos neurais. | 49 |
| Figura 15 – Vista geral das subdivisões do SNA. | 50 |
| Figura 16 – Anatomia do hipotálamo. | 52 |
| Figura 17 – Anatomia superficial do olho direito. | 53 |
| Figura 18 – Músculos extrínsecos do olho. | 54 |
| Figura 19 – Constrição e dilatação da pupila. | 55 |
| Figura 20 – Via visual para o cérebro. | 56 |
| Figura 21 – Reflexo do LED infravermelho na córnea. | 60 |
| Figura 22 – Método de diferença de imagem. | 61 |
| Figura 23 – Rastreamento pupilar escuro e brilhante. | 61 |
| Figura 24 – Aquisição de imagem pupilar brilhante e escura. | 62 |
| Figura 25 – Rastreamento ocular remoto. | 63 |
| Figura 26 – Segmentação de 4 níveis. | 64 |
| Figura 27 – Segmentação por aparência. | 65 |
| Figura 28 – Projeção sem correção angular. | 66 |
| Figura 29 – Projeção com correção angular. | 67 |
| Figura 30 – Etapas básicas para calcular a área da pupila. | 67 |
| Figura 31 – Trabalhos relacionados - Cognição e Pupila. | 68 |

| | |
|---|-----|
| Figura 32 – Quantidades dispostas no padrão A | 80 |
| Figura 33 – Quantidades dispostas no padrão B | 80 |
| Figura 34 – Quantidades dispostas no padrão C | 81 |
| Figura 35 – Equipamento de rastreamento ocular - Tobii Pro TX300. | 82 |
| Figura 36 – Parâmetros de alcance do equipamento. | 83 |
| Figura 37 – Normalização do diâmetro da pupila. | 84 |
| Figura 38 – Ajuste da linha de tendência. | 87 |
| Figura 39 – Variância por quantidade. | 89 |
| Figura 40 – Variância por quantidade (desagrupado). | 89 |
| Figura 41 – Mapa de calor por quantidade de fixação. | 90 |
| Figura 42 – Variância do diâmetro da pupila por padrão. | 91 |
| Figura 43 – Variância do diâmetro da pupila por padrão (desagrupado). | 91 |
| Figura 44 – Estimativa de desempenho por quartil. | 92 |
| Figura 45 – Estimativa de desempenho por quartil (prova real). | 94 |
| Figura 46 – Dendograma de agrupamento em cluster. | 95 |
| Figura 47 – Exemplo de cartão com sequência numérica. | 99 |
| Figura 48 – Tela de instruções. | 104 |
| Figura 49 – Exemplo de perda de sinal. | 106 |
| Figura 50 – Perda de sinal concentrada. | 108 |
| Figura 51 – Amostras isoladas. | 110 |
| Figura 52 – Identificação de amostras isoladas. | 111 |
| Figura 53 – Remoção de amostras isoladas. | 111 |
| Figura 54 – Interpolação de dados. | 112 |
| Figura 55 – Suavização dos dados. | 112 |
| Figura 56 – Antes e depois do tratamento do sinal. | 113 |
| Figura 57 – Diagrama da aplicação experimental do método PCA + MLDA. | 117 |
| Figura 58 – Validação cruzada com método k -fold. | 118 |
| Figura 59 – Matriz de respostas. | 119 |
| Figura 60 – Participantes que usam óculos. | 121 |
| Figura 61 – Tempo sem se alimentar. | 121 |
| Figura 62 – Cansaço físico e mental. | 122 |
| Figura 63 – Participantes que fizeram uso de medicamento. | 123 |
| Figura 64 – Participantes fumantes. | 124 |
| Figura 65 – Como os participantes classificaram a dificuldade do teste. | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 66 – Como os participantes classificaram o tempo do teste. | 125 |
| Figura 67 – Participantes que se sentiram cansados durante o teste. | 126 |
| Figura 68 – Variância por cartão - Fase A: Memorização. | 127 |
| Figura 69 – Variância por cartão - Fase B: Reprodução e Transformação. | 127 |
| Figura 70 – Variância por tarefa - Fase A + B. | 128 |
| Figura 71 – Variância por tarefa agrupada. | 129 |
| Figura 72 – Variância por tarefa - classe proficiente. | 130 |
| Figura 73 – Variância por tarefa - classe não-proficiente. | 130 |
| Figura 74 – Comparação das classes por fase. | 131 |
| Figura 75 – Projeção dos dados de treinamento. | 131 |
| Figura 76 – Dispersão dos dados de treinamento. | 132 |
| Figura 77 – Projeção da validação cruzada. | 133 |
| Figura 78 – Comparação de não-proficientes com desempenho distinto. | 135 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Relação de estímulo aos músculos da pupila. | 58 |
| Tabela 2 – Características dos experimentos | 97 |
| Tabela 3 – Amostras de interesse. | 105 |
| Tabela 4 – Qualidade do sinal observada na pupila esquerda. | 109 |
| Tabela 5 – Tabela de desempenho. | 120 |
| Tabela 6 – Tabela de medicamentos | 124 |
| Tabela 7 – Tabela de acurácia da validação cruzada por método. | 134 |
| Tabela 8 – Acurácia de classificação por fase. | 134 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 | OBJETIVO | 24 |
| 1.2 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 24 |
| 2 | CONCEITOS FUNDAMENTAIS | 25 |
| 2.1 | FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA COGNITIVA | 25 |
| 2.1.1 | Cognição | 25 |
| 2.1.2 | Percepção e Atenção | 26 |
| 2.1.3 | Estado de Vigília e Estado de Atenção | 27 |
| 2.1.4 | Memória | 30 |
| 2.1.5 | Processo de Aprendizagem e Recuperação de Memória | 33 |
| 2.1.6 | Emoção | 34 |
| 2.1.7 | Linguagem | 36 |
| 2.1.8 | Técnicas empregadas na ciência da cognição | 38 |
| 2.2 | FUNDAMENTOS DO SISTEMA NERVOSO | 40 |
| 2.2.1 | Sistema nervoso | 41 |
| 2.2.2 | Funções do sistema nervoso | 41 |
| 2.2.3 | Divisões básicas do sistema nervoso | 42 |
| 2.2.4 | Tecido nervoso | 43 |
| 2.2.5 | Neurônio | 43 |
| 2.2.6 | Sinapse | 45 |
| 2.2.7 | Tipos de neurônios | 45 |
| 2.2.8 | Arco reflexo | 47 |
| 2.2.9 | Circuitos neurais | 48 |
| 2.2.10 | Divisão autônoma do sistema nervoso | 49 |
| 2.2.11 | Hipotálamo | 51 |
| 2.3 | FUNDAMENTOS DA VISÃO | 53 |
| 2.3.1 | Anatomia do olho | 53 |
| 2.3.2 | Movimento ocular | 54 |
| 2.3.3 | Processamento de informação visual | 56 |
| 2.3.4 | Controle do diâmetro da pupila | 57 |
| 2.4 | TÉCNICAS DE MENSURAÇÃO PUPILAR | 58 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.4.1 | Breve histórico | 59 |
| 2.4.2 | Equipamentos atuais | 59 |
| 2.4.3 | Técnica de rastreamento ocular | 60 |
| 2.4.4 | Rastreamento remoto | 63 |
| 2.4.5 | Processamento da imagem | 64 |
| 3 | TRABALHOS RELACIONADOS | 68 |
| 3.1 | CIÊNCIA DA COGNIÇÃO E MENSURAÇÃO PUPILAR | 68 |
| 3.2 | CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS | 76 |
| 4 | EXPERIMENTO PRELIMINAR (CONTAGEM COGNITIVA) | 78 |
| 4.1 | MATERIAIS E MÉTODOS | 78 |
| 4.1.1 | Participantes | 78 |
| 4.1.2 | Tarefa e estímulos | 79 |
| 4.1.2.1 | <i>Tarefa cognitiva</i> | 79 |
| 4.1.2.2 | <i>Estímulo visual</i> | 81 |
| 4.1.2.3 | <i>Condução do teste</i> | 81 |
| 4.1.3 | Aquisição do sinal | 82 |
| 4.1.4 | Processamento dos sinais | 83 |
| 4.1.4.1 | <i>Variância pupilar</i> | 85 |
| 4.1.4.2 | <i>Classificação de desempenho</i> | 86 |
| 4.1.4.3 | <i>Predição de desempenho</i> | 86 |
| 4.2 | RESULTADOS | 88 |
| 4.3 | DISCUSSÃO | 95 |
| 5 | EXPERIMENTO SUBSEQUENTE (MÉMORIA E ADIÇÃO) | 97 |
| 5.1 | MATERIAIS E MÉTODOS | 98 |
| 5.1.1 | Protocolo experimental | 98 |
| 5.1.1.1 | <i>Experimento original</i> | 98 |
| 5.1.1.2 | <i>Modelo adaptado</i> | 99 |
| 5.1.1.3 | <i>Organização dos processos</i> | 99 |
| 5.1.1.4 | <i>Roteiro de aplicação do experimento</i> | 100 |
| 5.1.2 | Participantes | 102 |
| 5.1.2.1 | <i>Perfil do participante</i> | 102 |
| 5.1.3 | Tarefas e estímulos | 103 |
| 5.1.4 | Pré-processamento | 104 |
| 5.1.4.1 | <i>Qualidade do sinal</i> | 105 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.1.4.2 | <i>Tratamento do sinal</i> | 110 |
| 5.1.5 | Extração de característica e classificação | 113 |
| 5.1.5.1 | <i>Análise de Componentes Principais (PCA)</i> | 113 |
| 5.1.5.2 | <i>Análise de Discriminantes Lineares (LDA)</i> | 114 |
| 5.1.5.3 | <i>Análise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA)</i> | 116 |
| 5.1.5.4 | <i>Desempenho da classificação</i> | 117 |
| 5.2 | RESULTADOS | 118 |
| 5.2.1 | Desempenho apurado de cada participante | 119 |
| 5.2.2 | Análise do perfil dos participantes | 120 |
| 5.2.3 | Análise da variância pupilar | 126 |
| 5.2.4 | Análise estatística multivariada | 131 |
| 5.3 | Discussão | 136 |
| 6 | CONCLUSÃO | 137 |
| | REFERÊNCIAS | 139 |
| | APÊNDICE A – Termo de consentimento | 151 |
| | APÊNDICE B – Termo de consentimento para menores de idade | 153 |

1 INTRODUÇÃO

A cognição humana é, de forma geral, associada a processos mentais utilizados pelo homem para entender, assimilar, relacionar e conectar-se com o universo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014), mas saber como o ser humano utiliza seus recursos cognitivos ou compreender o próprio funcionamento dos processos cognitivos ainda é um desafio para a ciência.

Quando se trata de conhecimento científico sobre a cognição humana, percebemos que ainda existem mais perguntas do que respostas, o que ao mesmo tempo em que torna o tema atrativo e desafiador, também mostra uma preocupação com o alcance da ciência.

Com isso, a partir de uma abordagem ainda pouco utilizada em estudos da ciência da cognição, surgem os equipamentos de rastreamento ocular, que através da mensuração do diâmetro pupilar oferecem uma medida da reatividade do sistema nervoso e da carga de trabalho do sistema cognitivo (SIROIS; BRISSON, 2014; HAYHOE; BALLARD, 2005), concebendo uma alternativa para estudos da cognição sem a exigência de um ambiente extremamente controlado, invasivo e desconfortável para os indivíduos, possibilitando então, como neste trabalho, aplicar protocolos experimentais simplificados, capazes de medir o desempenho de indivíduos em tarefas cognitivas básicas, como memorizar e multiplicar números.

A inspiração para a elaboração desta dissertação veio do relato de um experimento realizado por Daniel Kahneman que também foi inspirado por outro cientista, Eckhard Hess, que na publicação intitulada como “Attitude and Pupil Size” descreveu a pupila como uma janela para a alma (KAHNEMAN; BEATTY, 1966; HESS, 1965). Hess, juntamente com James Polt (HESS; POLT, 1960), foram os pioneiros em pesquisas sobre a cognição humana através da análise de sinais pupilares, publicando seus primeiros trabalhos na década de 60 e inspirando desde então diversos outros cientistas, como Kahneman e Jackson Beatty (HESS; POLT, 1960; HESS; POLT, 1964; KAHNEMAN; BEATTY; POLLACK, 1967), que se tornaram referências no assunto e explicam diversos processos cognitivos a partir de seus estudos por meio de mensuração pupilar.

Diversos outros trabalhos envolvendo a cognição humana, como a investigação de níveis de inteligência proposto por (AHERN; BEATTY, 1979), a avaliação do impacto do envelhecimento em tarefas de memória (GERVEN et al., 2004), a comparação de desempenho e habilidade em tarefas de pesquisa (JÓZSA, 2010) e a comparação de métodos de aprendizagem (KORBACH; BRÜNKEN; PARK, 2017), fornecem indícios de que é possível estimar quantitativamente a intensidade de esforço mental em tarefas cognitivas, apontando o índice de variação pupilar como um indicador sensível à carga de trabalho exigida.

Desta forma, a construção de testes cognitivos computadorizados utilizando uma plataforma de aquisição de sinal pupilar é o que delimita o enfoque para todas as atividades de processamento de sinais realizadas nesta dissertação.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é investigar a relação entre o processo cognitivo e a reatividade do sistema nervoso percebida pela mensuração do diâmetro pupilar. Mais especificamente, pretende-se:

- a) Realizar experimentos cognitivos integrados com sistemas de aquisição de sinal pupilar e avaliar os níveis de esforço mental empregados na resolução das tarefas propostas;
- b) Analisar as variações do diâmetro pupilar de indivíduos durante a realização de tarefas cognitivas;
- c) Classificar o desempenho de indivíduos em tarefas cognitivas, implementando codificação estatística multivariada ao sinal pupilar como um todo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica dos principais tópicos que compõem o escopo deste trabalho. No capítulo 3, são apresentados os trabalhos relacionados com o estudo em questão. No capítulo 4, é apresentado um experimento preliminar realizado e os resultados parciais obtidos. No capítulo 5, é apresentado um experimento subsequente e os resultados finais obtidos. E, por fim, no capítulo 6, é apresentada a conclusão desta dissertação e as possibilidades de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e está dividido em quatro seções: fundamentos da ciência cognitiva, fundamentos do sistema nervoso, fundamentos da visão e técnicas de mensuração pupilar. A primeira seção apresenta uma visão geral sobre a cognição humana, abordando tópicos essenciais da ciência cognitiva a partir do ponto de vista da neurociência. A segunda seção descreve as partes que compõem o sistema nervoso completando a fundamentação necessária para compreender os processos cognitivos. A terceira seção apresenta as características da visão humana e os componentes mensuráveis do sistema nervoso sensíveis aos processos cognitivos. Por fim, a quarta seção apresenta as técnicas utilizadas para medir os sinais de variação pupilar empregadas nos estudos da cognição humana.

2.1 FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA COGNITIVA

Esta seção apresenta os principais tópicos da ciência da cognição, fornecendo embasamento teórico para entendimento dos estudos envolvendo a cognição humana. As subseções a seguir abordam o estudo da cognição humana através da análise de sinais e informações sobre o comportamento e o cérebro, descrevendo os principais processos da cognição, as teorias que envolvem cada processo e as técnicas e equipamentos utilizados em estudos correspondentes.

2.1.1 Cognição

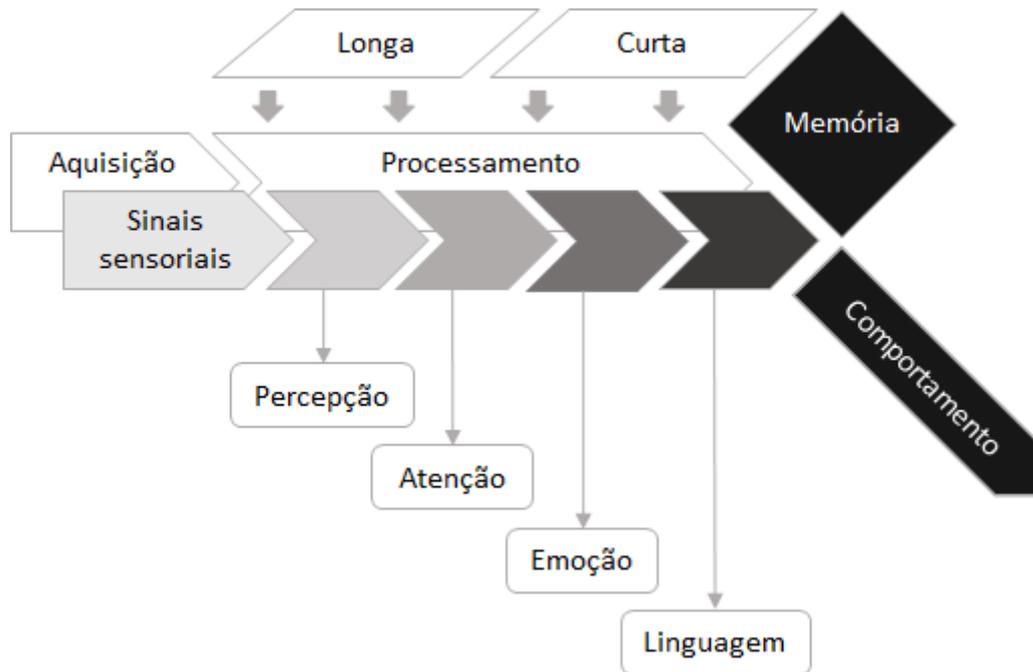
O campo de estudo das ciências da cognição é bastante abrangente e estudado por diversas áreas, como a neurologia, a psicologia, a antropologia, a pedagogia e as ciências da informação, o que torna a definição de cognição um tanto complexa, variando enormemente entre os diversos autores. No entanto, entre as diversas áreas, há em comum o objetivo de entender o funcionamento dos processos mentais, do cérebro e do comportamento humano (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

Com base na profundidade do tema ciências da cognição, este trabalho passa a adotar os conceitos sobre cognição a partir do ponto de vista da neurociência, que dentre as diversas áreas parece ser a que melhor se relaciona com os objetivos desta dissertação.

A neurociência trata a cognição em uma subárea chamada neurociência da cognição, onde de forma mais primitiva associa a cognição a um mecanismo que gerencia a aquisição de

informação, o processamento cerebral, a memorização do conhecimento e a adaptação comportamental ao meio. A partir destes conceitos primitivos a área da neurociência subdivide o processo da cognição em diversos outros processos, como a percepção, a atenção, a emoção, a linguagem, a memória e o comportamento (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, através de seus órgãos sensoriais, recebe diferentes formas de energia do meio ambiente que são conduzidas como sinais ao sistema nervoso central em meio a bilhões de células neurais e trilhões de conexões sinápticas. No entanto, boa parte destes sinais não é processada, pois nem toda informação é relevante para processamento, e se assim fosse, o sistema nervoso não seria capaz de processar tudo de uma só vez. Devido a esta limitação de processamento, o encéfalo possui um mecanismo que permite selecionar a informação e através do processo de **atenção** focar apenas em informações importantes, inibindo o processamento dos sinais dispensáveis (GUERRA; COZENZA, 2011).

Este processo realizado pelo encéfalo que seleciona os sinais sensoriais importantes para o indivíduo é chamado de **percepção**, que como o próprio nome diz, traz luz sobre os

sinais que são percebidos pelo consciente e conseqüentemente alimenta o processo cognitivo, que memoriza uma parte das informações para referência futura e converte 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.

Adicionalmente e estritamente limitado a este trabalho, pode-se dizer que a atenção é o processo chave que fornece dados para os experimentos propostos em mensuração da capacidade cognitiva. Desta forma, abre-se espaço para uma fundamentação mais detalhada sobre os estados de processamento do sistema cognitivo, os quais inspiraram a realização deste trabalho e são apresentados na subseção a seguir.

2.1.3 Estado de Vigília e Estado de Atenção

Segundo (KAHNEMAN, 2011), o sistema cognitivo possui duas formas de operar: a forma automática, quando estamos em estado de vigília, exercendo pouco ou nenhum esforço mental, não realizando percepções de controle voluntário; e a forma de pleno esforço mental, quando precisamos alocar atenção em atividades mentais complexas, como solucionar problemas, tomar decisões, filosofar, realizar cálculos complexos e diversas outras atividades que requisitam ações voluntárias e conscientes, onde o indivíduo assume o controle do pensamento sobre a atividade realizada.

O estado de vigília é caracterizado por operações mentais normalmente involuntárias e até inconscientes, mas com capacidade de operar padrões altamente complexos 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 (que fazem parte do indivíduo desde o nascimento), como perceber o mundo ao nosso redor, reconhecer objetos, evitar perdas e sentir medo, assim como habilidades que se tornam rápidas e automáticas devido a prática prolongada, formando um conjunto de operações programadas que rapidamente processam nossas percepções e convertem em comportamento (KAHNEMAN, 2011).

Exemplos de atividades que executamos em estado de vigília:

- a) Reconhecer pessoas e expressões faciais;
- b) Detectar hostilidade em uma voz;

- c) Orientar-se em relação à fonte de um som repentino;
- d) Completar expressões do tipo “Tudo que sobe, ...” ou “Pão com ...”;
- e) Calcular a possibilidade de atravessar a rua sem ser atropelado;
- f) Dirigir um carro em uma via tranquila;
- g) E demais atividades do dia a dia como tomar banho e se alimentar.

O estado de atenção é caracterizado por operações voluntárias, que direcionam e concentram energia em tarefas cognitivas conscientes, onde o indivíduo assume o controle das ações cognitivas cadenciando o pensamento de forma a raciocinar, planejar e fazer escolhas acerca de suas ações. 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 elas exigem atenção e são instantaneamente interrompidas quando a atenção é desviada (KAHNEMAN, 2011).

Exemplos de atividades que executamos em estado de atenção:

- a) Realizar exercícios em intensidade maior que a natural para o seu corpo;
- b) Monitorar seu próprio comportamento em eventos sociais;
- c) Concentrar-se na voz de uma determinada pessoa em uma sala cheia e barulhenta;
- d) Contar a ocorrência de vogais em uma página de texto;
- e) Comparar o custo benefício entre dois equipamentos de marca distintas;
- f) Escrever um texto argumentativo;
- g) Verificar a validade lógica de um argumento;
- h) E diversas outras atividades que exijam concentração do indivíduo.

Ao observar as características do estado de vigília e do estado de atenção, pode-se perceber que eles se alternam conforme a necessidade do indivíduo. Entretanto, 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). E, como visto na subseção anterior, através do mecanismo de percepção, o cérebro filtra a quantidade de informações percebidas de acordo com a sua necessidade e capacidade de processamento, o que significa que seus recursos são limitados e que precisam ser organizados dentro dos limites da

capacidade cognitiva. Desta forma, os processos do estado de atenção ficam restritos ao limite de processamento do cérebro, normalmente não permitindo a execução de duas tarefas complexas que exijam concentração ao mesmo tempo, como, por exemplo, calcular o produto de “35 x 74” ao mesmo tempo em que se concentra em argumentos filosóficos proferidos por um locutor qualquer. Em situações como a descrita neste exemplo certamente perderíamos a concentração e fracassaríamos em ambas as atividades, pois em dado momento a intensidade de processamento requerida atingiria o limite da capacidade cognitiva, interrompendo instantaneamente 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 duas ou mais tarefas. Pode acontecer também em uma única tarefa que se alongue por muito tempo. A questão é que nosso cérebro possui um mecanismo que busca economizar energia e reduzir os níveis de processamento o tempo todo, cessando o estado de atenção instantaneamente após solucionar uma tarefa, ou da mesma forma caso não sejamos capazes de solucioná-las, abortando a operação de forma a priorizar a economia de energia. Esse mecanismo é descrito por (KAHNEMAN, 2011) como **Lei do Menor Esforço**, que de forma efetiva controla o estado de atenção economizando o máximo de energia possível, permitindo suas operações somente em situações de extrema necessidade, que só ocorrem quando nos deparamos com problemas que vão além da capacidade do estado automático, requerendo processos especializados do estado consciente.

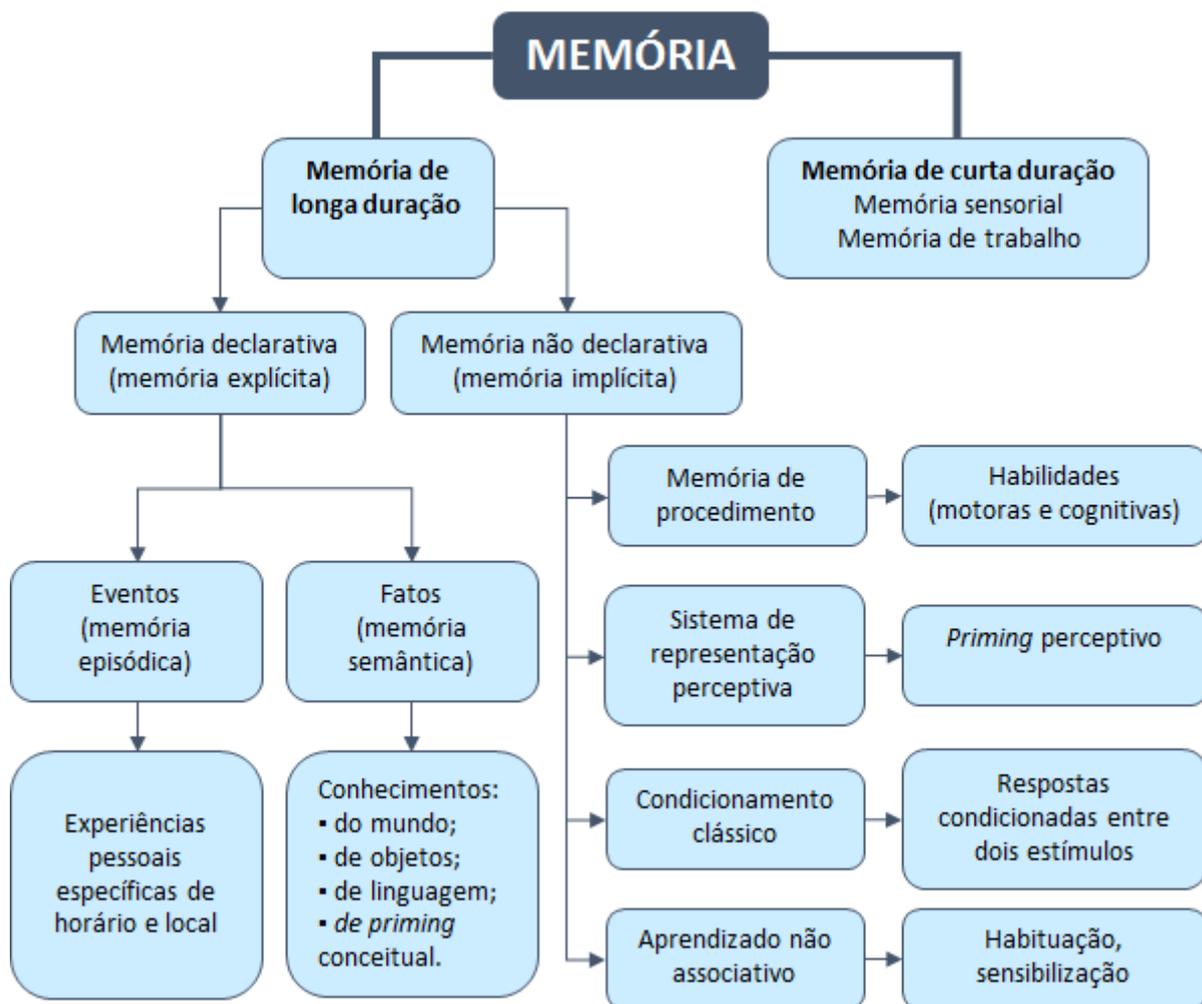
Segundo (KAHNEMAN, 2011), a lei do menor esforço indica que há várias formas de atingir o mesmo objetivo e que as pessoas tendem ao curso da ação menos exigente. Deste modo, na economia da ação, o esforço é um custo, e sabendo que o nível de esforço mental varia de acordo com as habilidades do indivíduo, pode-se dizer que quanto maior a intensidade do esforço mental em uma determinada tarefa, menos eficiente é o processo cognitivo. Em outras palavras, significa que o indivíduo possui poucas habilidades para contornar o custo da ação durante a realização da tarefa. Por outro lado, um indivíduo que possui habilidades que lhe permitam executar ações menos custosas, certamente realizará a mesma tarefa gastando menos energia (RYPMA et al., 2006; KAHNEMAN, 2011).

Desta forma, a partir de uma métrica onde a capacidade cognitiva é inversamente proporcional ao consumo de energia, ao medir a capacidade cognitiva de um indivíduo pode-se dizer que quanto mais eficiente for sua forma de pensar menos energia seu corpo gastará, podendo então, por meio de experimentos modelados comparar a capacidade cognitiva entre indivíduos medindo o esforço mental aplicado na resolução de tarefas.

2.1.4 Memória

Segundo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014), a memória é resultado do processo de aprendizagem, que através de um mecanismo cognitivo cria novas memórias sempre que algo é aprendido. No entanto, nem todas as memórias são processadas da mesma forma. Existem teorias como as descritas por (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014) e também por (SQUIRE, 2004) que apoiam a ideia de que possuímos vários tipos de memória e que cada uma delas possui processos distintos para conservar a informação, sendo algumas breves e de curta duração e outras longas que podem durar a vida inteira. Na Figura 2 pode-se observar os diferentes tipos de memória.

Figura 2 – Tipos de memória.



Fonte: Adaptado de Gazzaniga, 2004, p. 381

Legenda: Diagrama hipotético da estrutura da memória humana. Priming é um termo inglês que não possui tradução clara para português e se refere a influência de uma memória semântica que antecede a memória alvo.

A memória de curta duração compreende um conjunto de memórias que persistem por pouco tempo (milissegundos, segundos ou minutos) e incluem três tipos de memória: a retenção de informações sensoriais processadas e transformadas em estruturas sensoriais chamada de “*memória sensorial*”, com tempo de duração máxima em torno de 1000 ms; a retenção de informações sobre o mundo chamada de “*memória de curta duração*”, com tempo de duração de segundos a minutos; e a retenção de “*memória de trabalho*” que conceitualmente é apenas uma ampliação em tempo de duração da memória de curta duração com envolvimento em processos mentais, com duração de segundos a minutos respectivamente maiores que as memórias de curta de duração (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

A memória de longa duração compreende um conjunto de memórias que são armazenadas por um longo período de tempo, como dias, meses, anos ou até a vida inteira. A memória de longa duração é advinda da consolidação da memória de curta duração e, em consenso entre pesquisadores (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014; SQUIRE, 2004; TULVING et al., 1972) é subdividida em duas divisões principais chamadas de **memória declarativa** e **memória não declarativa**.

A memória declarativa, também conhecida como memória explícita, é a memória que temos acesso consciente e que pode ser verbalizada (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). A principal característica desta memória é a capacidade de detectar e codificar elementos únicos em um evento, armazenando informações ordenadas de horário e local (SQUIRE, 2004). Adicionalmente, segundo (TULVING et al., 1972), a memória declarativa ainda pode ser dividida em **memória episódica** e **memória semântica**, tal que:

a) **Eventos (memória episódica):** Memória episódica são as memórias de experiências pessoais intrínsecas a cada ser, que remetem a lembranças conscientes de eventos que aconteceram ao longo de sua vida, trazendo recordações de onde e quando aconteceram (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). A memória episódica permite ao ser humano violar a irreversibilidade do fluxo do tempo, que de forma física é imutável, mas subjetivamente pode ser acessado através de um pensamento de hoje sobre o que se fez ontem (TULVING, 2002);

b) **Fatos (memória semântica):** Já a memória semântica é o contrário. É um conjunto de conhecimentos objetivos que aprendemos no decorrer da vida, mas que não indica o contexto do aprendizado ou onde e quando foi adquirido tal conhecimento. Como exemplo, o conhecimento em cálculos básicos de aritmética é deduzível imaginar que aprendemos na escola durante as séries iniciais do Ensino Fundamental, mas não é possí-

vel lembrar o episódio em que esse conhecimento foi construído (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

A memória não declarativa, ou memória implícita, é a memória que não temos acesso consciente, ou seja, não pode ser verbalizada (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). Sua principal característica é a capacidade de extrair elementos comuns de uma série de eventos distintos (SQUIRE, 2004). E da mesma forma que a memória declarativa, estruturalmente, a memória não declarativa também pode ser subdividida em **memória processual, sistema de representação perceptual, condicionamento clássico e aprendizado não associativo**, tal que:

a) **Memória processual:** Memória processual refere-se às memórias inconscientes que adquirimos ao realizar tarefas repetitivamente, como tarefas cotidianas que executamos diariamente sem tomar consciência enquanto as realizamos, como andar pelas ruas, guardar as chaves no bolso da calça ou escrever um texto (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014);

b) **Sistema de representação perceptual:** Sistema de representação perceptual, também conhecida como memória de Priming, refere-se ao efeito preliminar que um estímulo causa ao ativar um conjunto de conhecimentos para compreensão de uma informação (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). Um exemplo deste efeito é a percepção de intenções claras em meio a um discurso confuso, compreendidas através da entonação utilizada pelo locutor;

c) **Condicionamento clássico:** Condicionamento clássico, ou aprendizagem por associação refere-se a um estímulo que evoca uma resposta condicionada. Como demonstrado por Pavlov e Anrep (2012) ao descrever as reações de seus cães ao salivarem ao som de um sino que tocará antes de lhes dar comida;

d) **Aprendizado não associativo:** Aprendizado não associativo, diferente do condicionamento clássico, não envolve a associação de estímulos para provocar comportamentos, mas sim a habituação e sensibilização que modificam a resposta a um estímulo ao longo do tempo. Um exemplo clássico descrito por (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014) para demonstrar esse tipo de aprendizado é o ato de esfregar o braço quando estamos com frio, aumentando a taxa de calor com a fricção. No entanto, se repetirmos muitas vezes essa ação iremos sentir dor e possivelmente provocar alguns machucados, o que nos dá uma resposta adaptativa e não associativa ao ato de esfregar o braço.

É importante ressaltar que, devido à grande complexidade do sistema de memória humana e dos diversos fatores ainda desconhecidos acerca de seu funcionamento, a maioria dos estudos sobre memória são apoiados em teorias e hipóteses que envolvem pontos de vista distintos. Como exemplo contrário aos processos descritos anteriormente, a partir de uma perspectiva da psicologia, é possível imaginar que exista apenas um sistema de memória, com vários processos operando neste sistema e com múltiplas formas de acessar seu conteúdo (WHITTLESEA; PRICE, 2001).

2.1.5 Processo de Aprendizagem e Recuperação de Memória

Embora existam diferentes teorias sobre o funcionamento da memória, segundo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014), existe um consenso entre a maioria dos pesquisadores quanto ao processo de aprendizagem e recuperação de memória. Este processo é compreendido em 3 etapas: **codificação**, **armazenamento** e **recuperação** da informação.

A **codificação** é dividida em duas etapas. A primeira é o processamento das informações sensoriais percebidas pelo cérebro, gerando uma resposta sensorial transitória muito breve, com duração de cerca de apenas 1000 ms, que desaparece logo em seguida sem gerar uma memória de curto prazo. Entretanto, embora durem pouco tempo, as respostas sensoriais não cessam e formam um conjunto de estímulos disponíveis para processamento, onde alguns desses estímulos são sustentados e se tornam uma memória de curta duração. A segunda etapa é a consolidação da memória de curta duração em memória de longa duração, que ocorre quando nosso cérebro julga importante armazenar tal informação para referência futura (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

O **armazenamento** é a retenção da informação consolidada. É o resultado do processo de codificação em memória de longa duração (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

A **recuperação** ou evocação da memória é o processo de lembrança da memória armazenada para uma utilização consciente ou execução de comportamento aprendido como uma atividade motora (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

Adicionalmente, algumas informações são perdidas em nossa memória, nos dando a sensação de que existe uma falha em nosso sistema de memória que não permite recuperarmos todas as informações codificadas, nos fazendo esquecer algo que já havíamos aprendido. Entretanto, o processo de esquecer uma informação não é uma falha, mas sim um mecanismo de limpeza da nossa memória que alivia a sobrecarga de informações que prioritariamente não são mais tão úteis (SQUIRE, 2004; GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). Este processo pode

ser facilmente percebido na memória de curta duração, nos processos de memória sensorial e memória de trabalho descrito anteriormente.

2.1.6 Emoção

A compreensão de emoção como um processo cognitivo, ainda hoje é um desafio para a ciência. Segundo Solomon (2008), a própria definição de emoção já é um desafio, haja vista pela pergunta formulada há mais de 130 anos pelo filósofo Willian James (1884) acerca do que é uma emoção e que até hoje em meio a milhares de estudos não se tem uma boa definição.

Inegavelmente que este assunto é complexo, mas de forma breve e complementar ao entendimento da cognição humana, pode-se observar a emoção como reações que alteram nossas funções biológicas, levando nosso corpo a um novo estado (COELHO; BROENS, 2015; DAMÁSIO, 2012).

Essa simples e generalista observação revela as emoções como sinalizadores internos de que algo importante ou significativo para o indivíduo está ocorrendo, desencadeando reações fisiológicas e impulsionando processos mentais que mobilizam outros recursos cognitivos, como a percepção e a atenção (GUERRA; COZENZA, 2011). Portanto, a emoção não se trata de um processo que atua de forma isolada, mas sim de um processo que se relaciona com outros processos cognitivos e que possui relativa influência na tomada de decisão, orientando o comportamento de forma a garantir a sobrevivência e a reprodução da espécie humana (OCHSNER; GROSS, 2005; GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014).

Na prática, a partir de uma perspectiva individual, as emoções e os sentimentos podem ser experienciados ao longo da vida, registrando um histórico entre emoções primárias que referem-se às emoções iniciais ou até mesmo às emoções que parecem ser inatas, como o medo, que é ativado instantaneamente em situações de perigo e emoções secundárias que referem-se as emoções na fase adulta, como ficar triste ao receber uma notícia ruim ou alegre ao lembrar de bons momentos da infância (DAMÁSIO, 2012).

Este histórico de emoções e sentimentos colecionados ao longo da vida pode facilitar a adaptação a respostas comportamentais (TOOBY; COSMIDES, 2008), melhorar as interações interpessoais (KELTNER; KRING, 1998) e aprimorar a lembrança de memória episódica (PHELPS, 2006). No entanto, as reações causadas pelas emoções nem sempre são uteis, podendo em alguns momentos ser até prejudiciais quando desreguladas, afetando o processo cognitivo e comprometendo a tomada de decisão (GROSS, 2008; PARROTT, 1993).

Além de orientar o comportamento, a emoção atua como um eficiente mecanismo sinalizador entre indivíduos, onde pode-se reconhecer as emoções uns dos outros constituindo um processo não verbal de comunicação (GUERRA; COZENZA, 2011; BATTY; TAYLOR, 2003). Como mostrado na Figura 3, algumas emoções básicas descritas por Batty e Taylor (2003), como tristeza, medo, nojo, raiva, surpresa e felicidade, nos causam uma reação estereotipada facilmente reconhecida entre os seres humanos.

Figura 3 – Expressões faciais das emoções básicas.



Fonte: Adaptado do site Pinterest, 2017

Legenda: Expressões faciais semelhantes em todas as culturas.

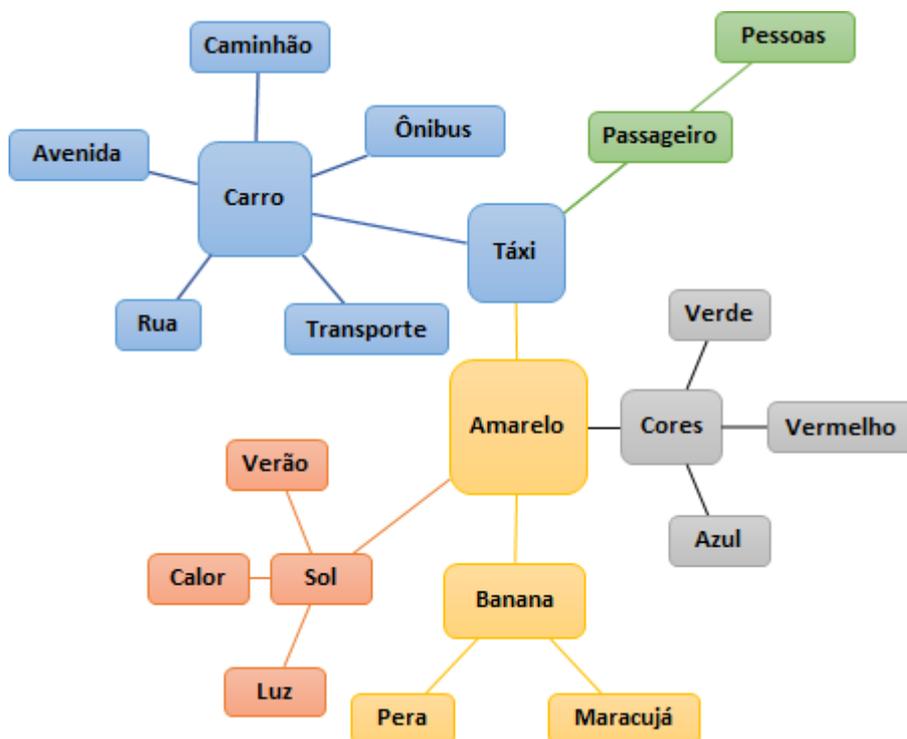
No contexto dos objetivos deste trabalho, é importante perceber as relações da emoção com outros processos cognitivos, que como visto são influenciados e mais exigidos quando orientados pela emoção, o que conseqüentemente pode aumentar a intensidade de trabalho mental em determinadas tarefas cognitivas.

2.1.7 Linguagem

Dentro das funções cognitivas, a linguagem exerce papel fundamental como sistema de representações simbólicas e interpretação de significados (MORATO, 2002). E, segundo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014), é a principal função cognitiva que diferencia os seres humanos dos demais animais, não só pelo robusto e eficiente sistema de comunicação, mas pela organização de conceitos e correlações entre características que podemos subtrair de um determinado objeto ou pessoa.

Ao estudar a linguagem partimos do princípio da aprendizagem em que o cérebro cria uma nova memória sempre que aprendemos algo novo e desta forma armazena palavras e conceitos em uma rede lexical de unidades descritoras de características (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014). Essa rede lexical é representada pelo léxico mental que processa todos esses descritores e dá significado as palavras, formando uma rede semântica de palavras e conceitos que se relacionam. A Figura 4 mostra um exemplo de rede semântica.

Figura 4 – Rede semântica.



Fonte: Adaptado de Gazzaniga, 2014, p. 477

Legenda: O diagrama apresenta um exemplo das relações semânticas entre as palavras. Reforçadas em conexões de forte associação (por exemplo táxi e carro, ou banana e amarelo).

Em um processo cognitivo, se alguém lhe descrever algo com as seguintes características: é uma fruta, nasce em árvores, possui casca com cores que variam do verde ao vermelho,

seu interior é branco e doce, possui sementes e em determinado momento da história ficou famosa por cair na cabeça de um renomado cientista inglês. Inicialmente, sem saber do que se trata e com apenas uma característica, dificilmente conseguiríamos imaginar o que é, ou talvez teríamos tantas opções em mente que não saberíamos qual escolher, mas ao interpretar as demais características facilmente reduzimos nossas alternativas a uma maçã.

Podemos perceber neste exemplo que uma simples tarefa de reconhecimento de características pode envolver diversos mecanismos cognitivos, como memórias de curto prazo para armazenar as características de entrada, memórias de longo prazo para correlacionar as características e a própria função de linguagem para interpretar e classificar uma resposta.

Desta forma, é possível perceber que os processos de linguagem se relacionam com diversos outros processos cognitivos, mas por outro lado é difícil comprovar estas relações. Embora pareça óbvio e intuitivo que existam tais relações, ainda não se sabe como as percepções, ideias e sentimentos são transformados em linguagem, tão quanto como são relacionadas as informações armazenadas na memória (KANDEL et al., 2014).

No entanto, se pensarmos nas memórias como redes semânticas, conforme descrito por (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014), podemos associar a organização da memória a mecanismos análogos a **Teoria dos Conjuntos** proposta por Georg Cantor em 1870 e mais tarde descrita por (TILES, 2004). Hipoteticamente descrevendo a memória como um complexo sistema de conjuntos, onde os objetos que conhecemos se tornam elementos desses conjuntos e são organizados conforme seus descritores. Por exemplo, se pensarmos que cada conjunto representa uma característica da memória, poderíamos atribuir a maçã como um elemento do conjunto frutas, da mesma forma que pode ser atribuída ao conjunto das cores e diversos outros descritores que a definem.

Desta forma, se pensarmos que tudo que conhecemos pode ser organizado em conjuntos e posteriormente acessados através de um mecanismo de associação, teríamos um grande número de conjuntos que aumenta sempre que aprendemos algo inédito, tal que devido às suas descrições necessita de mais conjuntos para ser descrito dentro do processo de memória.

Assim, se pensarmos na memória como organização de elementos em conjuntos e na linguagem como um interpretador de memórias, seria razoável pensar que cada conjunto é formado por um circuito neural específico, que é excitado em dois momentos, quando o mecanismo de aprendizado associa um elemento de uma nova memória a este conjunto e quando o mecanismo de interpretação recupera a informação memorizada, trazendo ao processo léxico mental todos os detalhes de uma memória, que é única dentro de seus descritores, mas que está espalhada por diversos conjuntos.

2.1.8 Técnicas empregadas na ciência da cognição

Segundo Eysenck e Keane (2017), o foco dos neurocientistas cognitivos é estudar o cérebro, analisando onde e quando ocorrem processos cognitivos específicos. E para isso existem diversas técnicas:

a) **Registro de unidade isolada:** Técnica altamente invasiva e raramente utilizada em humanos. Consiste na inserção de um microeletrodo no cérebro para estudar a atividade de neurônios isolados. Adicionalmente, esta técnica pode ser implementada com o estudo de multiunidades, com o intuito de estudar uma pequena população de neurônios. (EYSENCK; KEANE, 2017; KRALIK et al., 2001).

b) **Eletroencefalografia (EEG):** Técnica para mapeamento do escalpo que consiste no posicionamento de diversos eletrodos no couro cabeludo para medir o potencial elétrico da atividade cerebral. Trata-se de uma técnica com alta precisão temporal e pouca resolução espacial (EYSENCK; KEANE, 2017; BABILONI et al., 2009).

c) **Tomografia por emissão de pósitrons ou fóton único (PET ou SPECT):** Trata-se de técnicas de mapeamento cerebral através de emissão de radiação de raios gama. Para medir a atividade cerebral com estas técnicas é necessário injetar um radiofármaco (marcador) na corrente sanguínea do sujeito aumentando os níveis de radiação no sangue e conseqüentemente permitindo a geração de imagens dos níveis de atividade cerebral baseado na detecção de pósitrons (PET) ou fóton (SPECT). Estas técnicas possuem razoável resolução espacial, mas baixa resolução temporal (EYSENCK; KEANE, 2017; HUETTEL; SONG; MCCARTHY, 2004).

d) **Imagem por ressonância magnética (MRI):** Técnica não invasiva que utiliza as moléculas de água presentes no corpo para mapear a posição dos tecidos que compõem o cérebro. O aparelho de ressonância magnética cria um forte campo magnético que força o alinhamento das partículas de prótons do hidrogênio e em seguida emite uma onda de rádio na mesma frequência do campo magnético alterando o alinhamento dos prótons que giram e retornam a sua orientação original, liberando uma pequena quantidade de energia rotacional que é registrada pelo aparelho. Esta técnica possui alta resolução espacial e razoável resolução temporal, mas não fornece medida da atividade cerebral (EYSENCK; KEANE, 2017; HUETTEL; SONG; MCCARTHY, 2004).

e) **Imagem por ressonância magnética funcional (fMRI):** Técnica semelhante a MRI (descrita anteriormente), que se baseia na oxigenação do sangue, baseando-se nas propriedades magnéticas da hemoglobina ao invés do hidrogênio. O oxigênio consumido pela atividade neural converte oxi-hemoglobina em desoxi-hemoglobina que produz distorções no campo magnético local. A técnica de fMRI mede os níveis de concentração de desoxi-hemoglobina no sangue e consequentemente determina as regiões com maior atividade neural (EYSENCK; KEANE, 2017; HUETTEL; SONG; MCCARTHY, 2004; BABILONI et al., 2009). A técnica de fMRI possui resolução espacial e temporal melhor do que as técnicas de PET e SPECT. No entanto, ambas as técnicas fazem medidas indiretas da atividade cerebral, uma vez que medem a oxigenação do sangue provenientes da atividade neural e não propriamente a atividade elétrica neural.

f) **Magnetoencefalografia (MEG):** Técnica de mapeamento de atividade neural que mede a variação do campo magnético gerado pelo cérebro. Por se tratar de um campo magnético muito baixo e extremamente pequeno em relação ao campo magnético da terra, esta técnica exige o uso de um dispositivo de supercondução do quantum (SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) que permite a detecção do campo magnético gerado pela atividade elétrica cerebral. Esta técnica possui boa resolução espacial e excelente resolução temporal, permitindo analisar a atividade cerebral em tempo real (EYSENCK; KEANE, 2017; BABILONI et al., 2009).

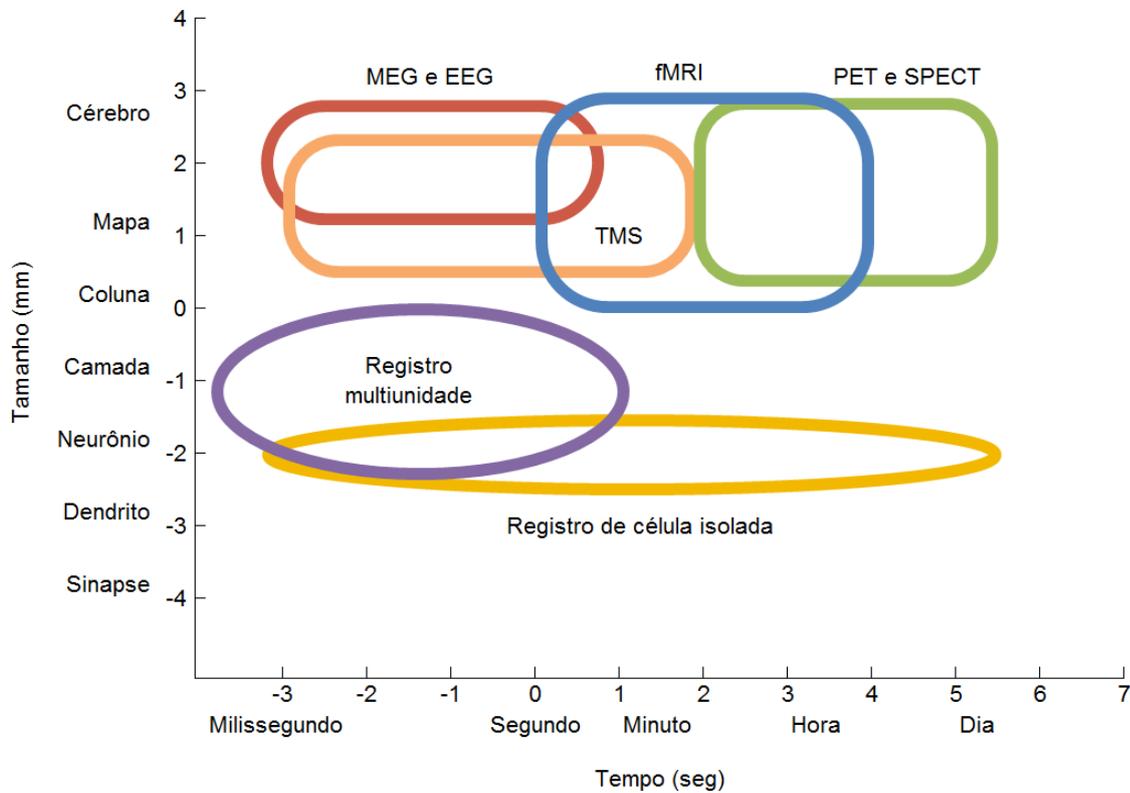
g) **Estimulação magnética transcraniana (TMS):** Técnica de interferência funcional em determinadas regiões do cérebro. Consiste na aplicação de pulsos magnéticos de curta duração que afetam momentaneamente o funcionamento de determinadas regiões do cérebro. Esta técnica é aplicada para testar determinadas regiões do cérebro que estão envolvidas no processamento de uma tarefa cognitiva (EYSENCK; KEANE, 2017).

Dentre as técnicas apresentadas até aqui, é importante ressaltar o alcance de cada equipamento para corretamente definir o que é mapeamento cerebral e o que é mapeamento do escalpo. Por exemplo, a técnica de eletroencefalografia possui ótima resolução temporal, mas tem seu alcance limitado até certa profundidade, não conseguindo atingir potenciais elétricos de regiões próximas do núcleo do cérebro, como o hipotálamo e o mesencéfalo, caracterizando uma técnica de mapeamento com alcance limitado às áreas próximas a superfície do escalpo.

Além do alcance do equipamento, as técnicas são classificadas pela precisão temporal e espacial, apresentando diferenças expressivas nos resultados obtidos, os quais podem ser obser-

vados na Figura 5, que apresenta um gráfico comparativo entre todas as técnicas apresentadas anteriormente.

Figura 5 – Técnicas empregadas na ciência da cognição.



Fonte: Adaptado de Eysenck, 2017

Legenda: Resolução espacial e temporal das principais técnicas para estudar o funcionamento cerebral.

Diferentemente das técnicas apresentadas, que focam apenas em sinais cerebrais, existem também as técnicas para estudos da cognição humana através de sinais pupilares, que através da mensuração da variação do diâmetro da pupila fornecem subsídios para análise do processo cognitivo.

Devido esta técnica estar intrinsecamente ligada aos objetivos deste trabalho e possuir características completamente distintas das técnicas anteriores, os detalhes do seu funcionamento serão apresentados mais adiante em uma seção exclusiva, nomeada como *técnicas de mensuração pupilar*.

2.2 FUNDAMENTOS DO SISTEMA NERVOSO

Esta seção apresenta uma revisão geral sobre o funcionamento do sistema de controle e comunicação do corpo humano, abordando 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 entre as células, os tipos de circuitos neurais, as divisões anatômicas e as divisões funcionais de cada parte do sistema nervoso.

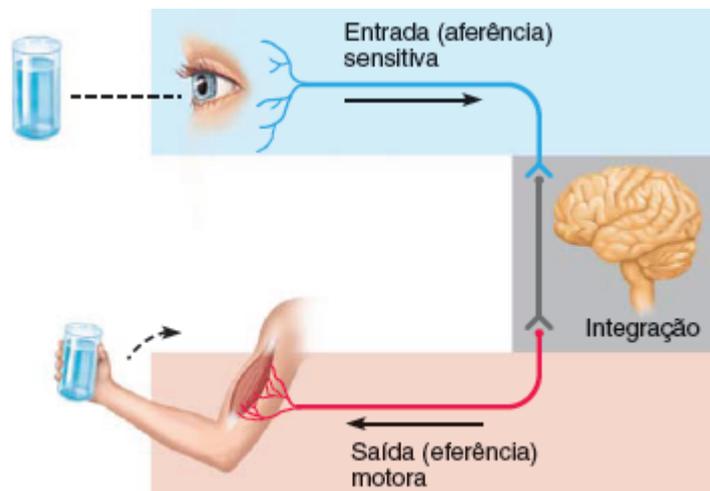
2.2.1 Sistema nervoso

Composto por uma complexa e integrada rede de ligações nervosas, formado por cerca de 86 bilhões de neurônios interconectados através de milhões de circuitos neurais, o sistema nervoso é o principal sistema de comunicação do corpo e sua função é integrar e controlar todos os outros sistemas fisiológicos. É através de suas células que processamos cada pensamento, emoção, instinto, lembrança, percepção e ação (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 **integração** e a saída motora chamada de **eferência**, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Funções do sistema nervoso.



Fonte: Marieb, 2014

Legenda: A imagem ilustra um exemplo de entrada de sinal no sistema nervoso por meio de um receptor sensitivo e a saída por um órgão motor.

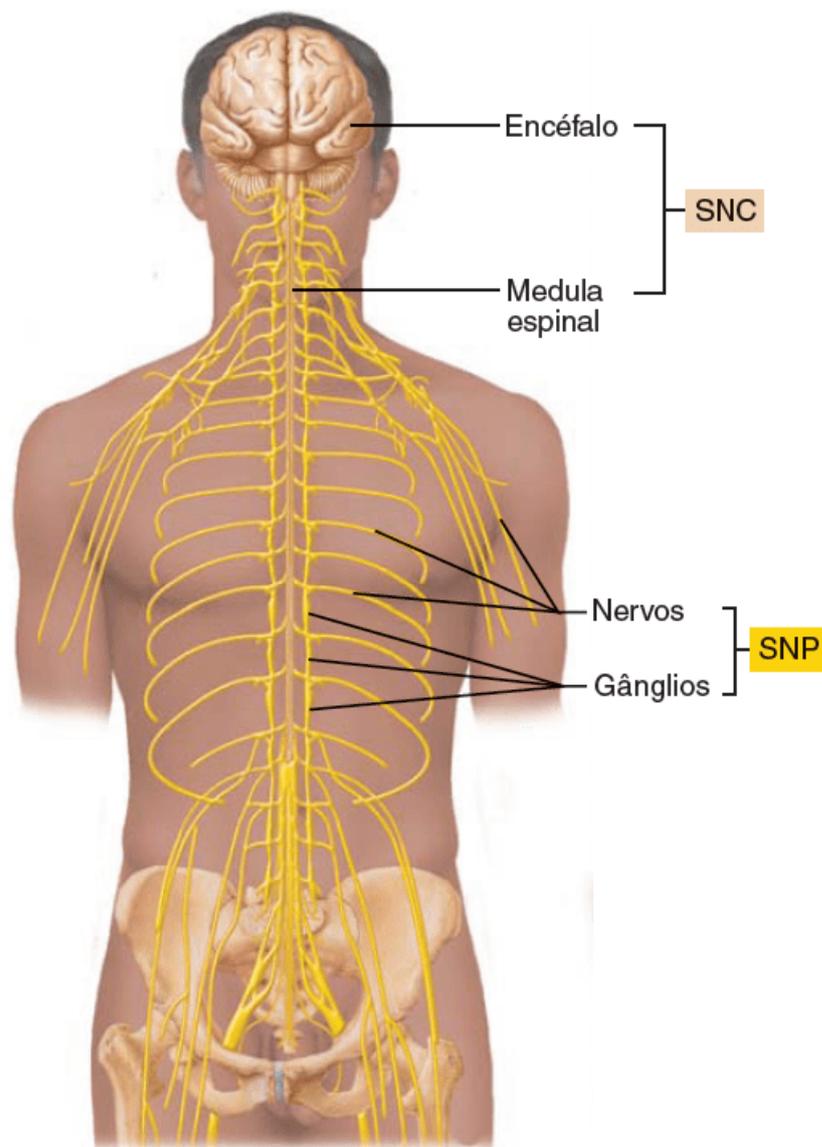
A aferência é a função de entrada de informação ao sistema nervoso, composta por um processo que reúne um conjunto de estímulos gerados pela percepção dos receptores sensitivos que monitoram as mudanças que ocorrem dentro e fora do corpo. A integração é a função que processa a entrada sensitiva e toma decisões acerca do que fazer em cada situação. E a função de

eferência é a saída do processo decisório, que indica uma resposta ativando os órgãos efetores compostos por músculos e glândulas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.2.3 Divisões básicas do sistema nervoso

O sistema nervoso humano é altamente integrado, mas por conveniência, são divididos em duas partes anatômicas, classificadas em **sistema nervoso central (SNC)** e **sistema nervoso periférico (SNP)**, ilustradas na Figura 7.

Figura 7 – Divisões do sistema nervoso: SNC e SNP.



Fonte: Marieb, 2014

Legenda: A figura mostra a localização e identificação das partes do SNC (encéfalo e medula espinhal) e do SNP (nervos e gânglios).

O sistema nervoso central é formado pelo encéfalo e medula espinal, que ocupam o crânio e o canal vertebral. O SNC é centro de integração e comando do sistema nervoso, que recebe os sinais sensitivos, interpreta-os e determina uma resposta motora. O sistema nervoso periférico é formado principalmente por nervos conectados ao cérebro e a medula espinal e servem como linhas de comunicação que ligam todas as regiões do corpo ao sistema nervoso central, realizando as funções de aferência e eferência, transportando informação dos receptores sensitivos ao SNC e do SNC aos músculos e glândulas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; KANDEL et al., 2014; PURVES et al., 2010).

O sistema nervoso periférico ainda possui quatro subdivisões. A **sensitiva somática (SS)** que é a inervação sensorial do tubo externo, formado por pele, parede corporal e membros, a **sensitiva visceral (SV)** que é a inervação sensorial das vísceras, a **motora somática (MS)** que é a inervação motora do tubo externo, composta pelos músculos esqueléticos e **motora visceral (MV)** também conhecida como **sistema nervoso autônomo (SNA)** que é a inervação motora involuntária do tubo interno, composto por músculo liso, músculo cardíaco, glândulas e algumas estruturas do tubo externo composto por músculo liso nos vasos e glândulas doríferas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.2.4 Tecido nervoso

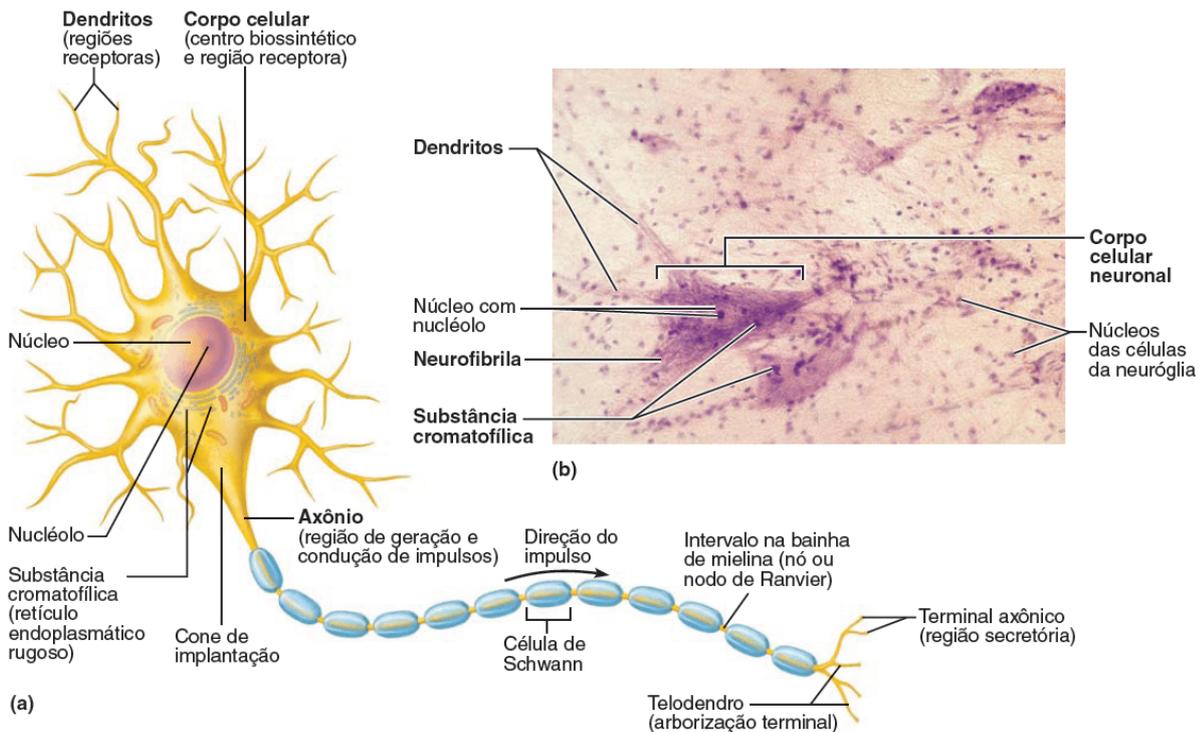
O sistema nervoso é formado por um complexo conjunto de células densamente agrupadas e entrelaçadas chamada de tecido nervoso, composto basicamente por dois tipos de células: os neurônios, que são células excitáveis e transmitem sinais elétricos; e as neuróglia, que são células não excitáveis, ou seja, não transmitem sinais elétricos, mas possuem função de sustentar, proteger, isolar e nutrir os neurônios (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; BEAR; CONNORS; PARADISO, 2016).

2.2.5 Neurônio

Os neurônios são células especializadas com capacidade de se comunicar de forma rápida e precisa com outras células em locais distantes no corpo. A comunicação entre as células neurais se dá pelo seu alto grau de assimetria funcional morfológica, que apresentam **dendritos** receptores em uma extremidade e um **axônio** transmissor na outra, possibilitando que conduzam sinais elétricos através da membrana plasmática e transmitam sinais em forma de impulsos nervosos ao longo dos circuitos neurais (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; KANDEL et

al., 2014). Segundo (KANDEL et al., 2014) existem cerca de cem tipos distintos de neurônios. Mas podemos compreender sua anatomia através de um neurônio típico, como um neurônio motor observado na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura de um neurônio motor.



Fonte: Marieb, 2014

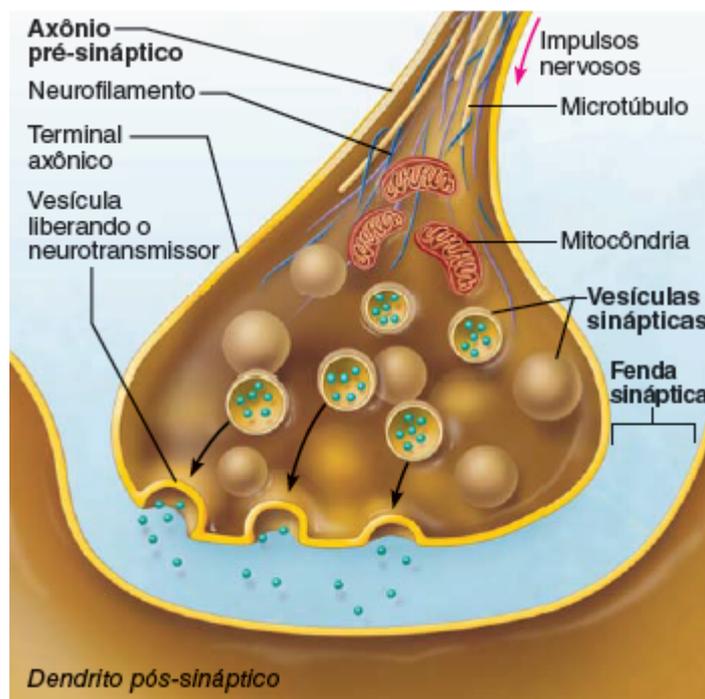
Legenda: (a) apresenta a estrutura do neurônio, indicando com uma seta a direção que os sinais percorrem e (b) apresenta uma micrografia do tecido neural da medula espinal exibindo corpos celulares neurais e as células neuróglia circundantes.

Um neurônio é composto basicamente por corpo celular, núcleo celular, dendritos, axônio e terminais axônicos. As ramificações dos dendritos, que funcionam como regiões receptoras de sinais de outros neurônios e ou receptores sensitivos, recebem impulsos nervosos contínuos através de sinapses e as direciona ao corpo celular, onde são geradas ondas de corrente elétrica no corpo da célula até a zona de disparo, coletada pelo cone de implantação do axônio. A partir deste ponto, o impulso elétrico atravessa a membrana celular onde a diferença de potencial que se forma determina se o neurônio dispara ou não, concluindo o processo que conduz o impulso nervoso até o terminal axônico e provoca a liberação de substâncias químicas chamadas neurotransmissores, permitindo uma sinapse como outro neurônio, músculos ou glândulas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.2.6 Sinapse

A sinapse é a ponte de comunicação entre neurônios, onde é transmitido o estímulo de um neurônio para o outro. A maioria das sinapses são processos químicos, que ocorrem numa **fenda sináptica** entre os terminais axônicos do **neurônio pré-sináptico** e os dendritos ou diretamente ao corpo celular do **neurônio pós-sináptico** que recebe uma descarga de neurotransmissores excitando-o ou inibindo-o, como ilustrado na Figura 9 (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; PURVES et al., 2010).

Figura 9 – Estrutura de uma sinapse.



Fonte: Marieb, 2014

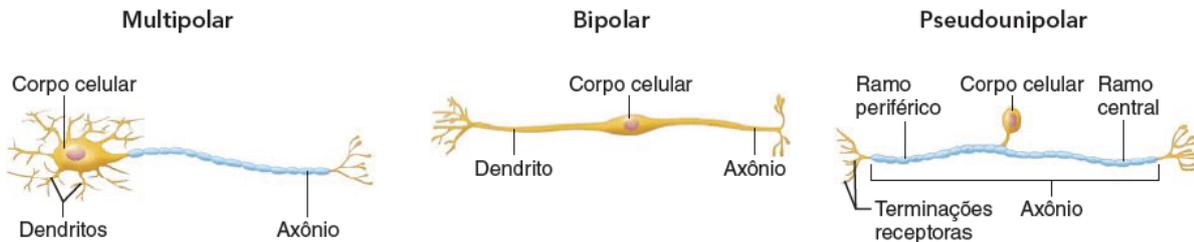
Existem também as sinapses elétricas, que ocorrem em casos em que a fenda sináptica é muito estreita. Neste caso a conexão entre neurônios é composta por proteínas chamadas de **conéxons**, que permite a continuidade do estímulo elétrico entre os neurônios sem o uso de neurotransmissores, o que diminui consideravelmente o tempo de transmissão (PURVES et al., 2010).

2.2.7 Tipos de neurônios

O tipo do neurônio é classificado de acordo com sua estrutura e função. Como pode-se ver na Figura 10, a classe estrutural está dividida entre **neurônios multipolares** (1), mais

abundante no corpo e principal neurônio no SNC, **neurônios bipolares** (2), raros e encontrados apenas em alguns órgãos sensoriais como mucosa olfatória, olho e orelha e **neurônios pseudounipolares** (3), encontrado principalmente no SNP, sendo comum apenas nos gânglios da raiz dorsal da medula espinal e dos gânglios sensoriais dos nervos cranianos (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

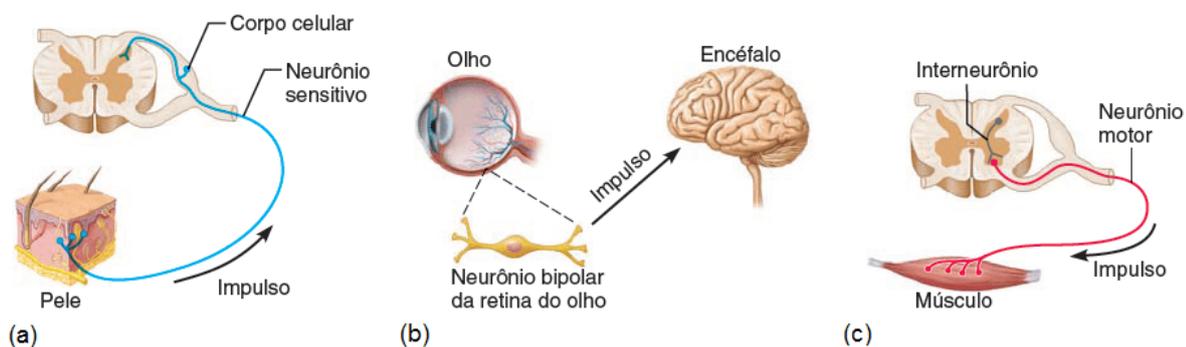
Figura 10 – Classe estrutural de um neurônio.



Fonte: Adaptado de Marieb, 2014, p.369

A classe funcional, como pode-se observar na Figura 11, está dividida de acordo com a direção percorrida pelo impulso nervoso em relação ao SNC, classificados em **neurônios sensitivos**, que conduzem os impulsos pelas vias aferentes até o SNC conhecidos também como neurônios primários ou de primeira ordem, **neurônios motores**, que conduzem os impulsos ao longo das vias eferentes, levando o estímulo do SNC até os órgãos e glândulas efetoras e **interneurônios** que conduzem os sinais dentro do SNC e integram os sinais da entrada sensitiva e saída motora (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Figura 11 – Classe funcional de um neurônio.



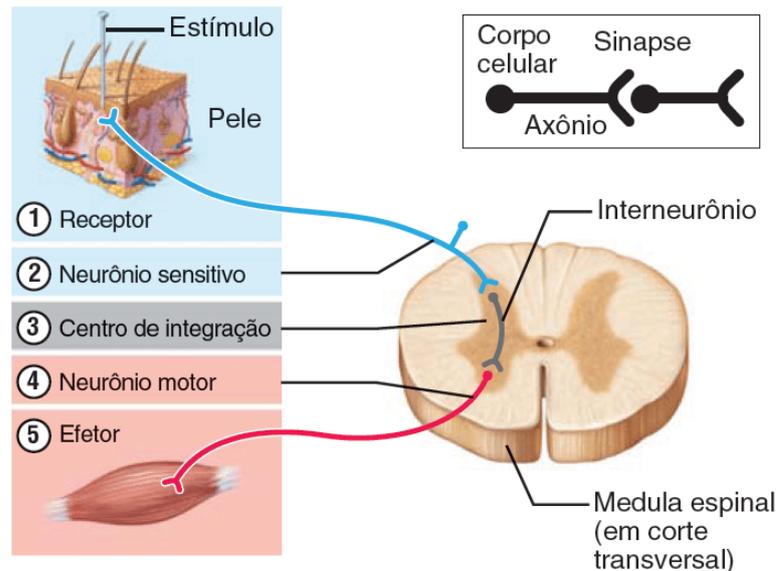
Fonte: Adaptado de Marieb, 2014, p.370

Legenda: (a) exemplo de via aferente e neurônio sensitivo, (b) exemplo de neurônio sensitivo que envia informação até o encéfalo através de uma cadeia de interneurônios, (c) exemplo de via eferente e neurônio motor.

2.2.8 Arco reflexo

O arco reflexo é uma via neural conectada por cinco componentes (ilustradas na Figura 12) que provocam os comportamentos reflexos, ou seja, um estímulo gerado por um receptor sensitivo que afeta diretamente um órgão motor (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Figura 12 – Componentes de um arco reflexo.

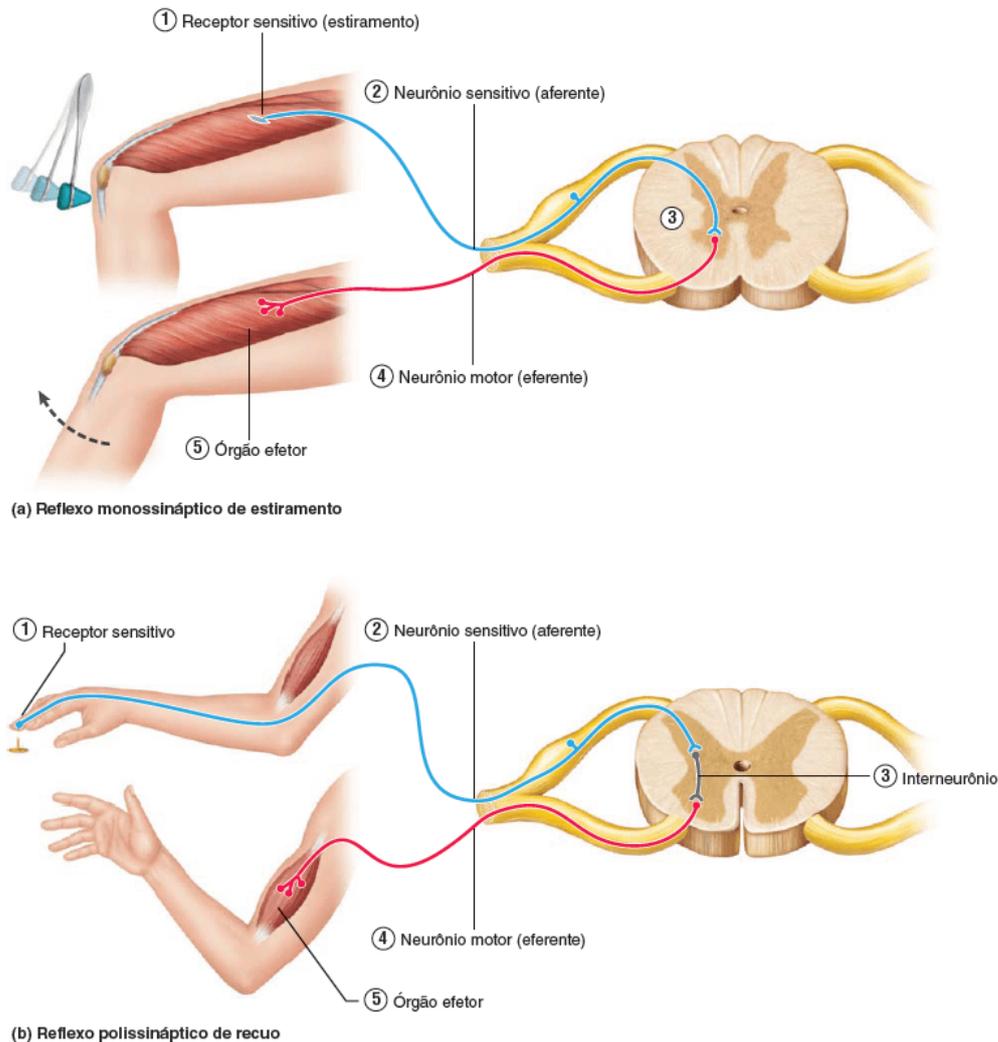


Fonte: Marieb, 2014

Legenda: Componentes de um arco reflexo indicado sequencialmente por números. Os receptores detectam mudanças no ambiente interno ou externo e através de uma cadeia de neurônios provocam comportamentos reflexos nos órgãos efetores.

Os reflexos são respostas motoras a um estímulo que acontece de forma rápida e automática. São involuntários, não são premeditados, não são aprendidos nem memorizados por experiências passadas e podem ser conscientes ou não, ou seja, se não ocorrer sinapse com nenhum neurônio integrador o órgão efector sofrerá estímulo direto de um neurônio aferente sem nenhum comando do SNC (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). Os reflexos são classificados em **reflexos monossinápticos**, quando ocorre apenas uma sinapse entre neurônio sensitivo e neurônio motor, sem sinapse com interneurônio, resultando em um reflexo inconsciente, como exemplo da contração patelar ilustrado no diagrama (a) da Figura 13; e **reflexos polissinápticos**, quando existem outros neurônios na via reflexa entre neurônio sensitivo e neurônio motor, ilustrado no diagrama (b) da Figura 13, gerando mais de uma sinapse e consequentemente percebida pelo SNC (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Figura 13 – Tipos de arcos reflexos.



Fonte: Marieb, 2014

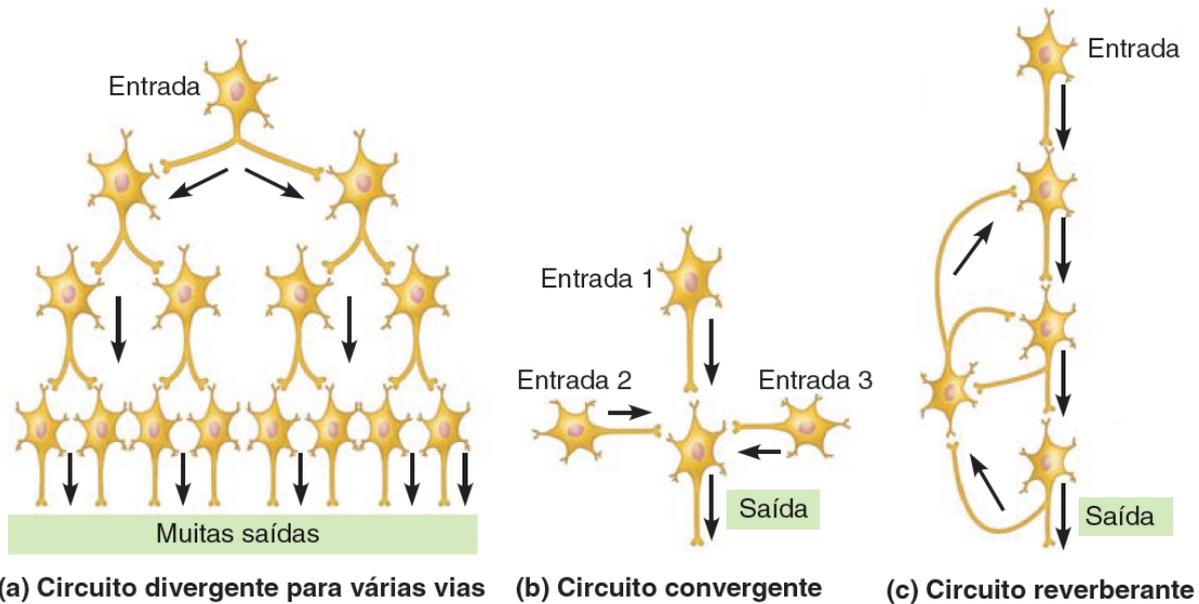
Legenda: Diferença entre arcos reflexos. (a) reflexo involuntário e inconsciente, (b) reflexo involuntário e consciente.

2.2.9 Circuitos neurais

Mais de 99% de todos os neurônios são interneurônios, ou seja, são neurônios de integração localizados no SNC, que por sua grande quantidade formam uma complexa rede com múltiplas conexões formando os circuitos neurais (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). Os circuitos neurais possuem três classificações: **circuito divergente**, **circuito convergente** e **circuito reverberante**. Em um **circuito convergente**, vários neurônios pré-sinápticos fazem conexão com um mesmo neurônio pós-sináptico, permitindo que impulsos elétricos de diferentes fontes estimulem o mesmo neurônio, como exemplo explícito no diagrama (a) da Figura 14. Já em um circuito **divergente** acontece o inverso, ou seja, um único neurônio pré-sináptico faz conexões com múltiplos neurônios pós-sinápticos, permitindo que o estímulo de um único

neurônio se multiplique por vários outros neurônios, como exemplo explícito no diagrama (b) da Figura 14. E em circuito **reverberante**, cada neurônio de uma série conecta um ramo do axônio no neurônio posterior e outro no neurônio anterior, como exemplo explícito no diagrama (c) da Figura 14, retroalimentando o estímulo no sentido do circuito até que as sinapses entrem em fadiga ou que o sinal seja inibido pela interrupção de outro sinal (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Figura 14 – Circuitos neurais.



Fonte: Adaptado de Marieb, 2014, p.379

Além de sua classificação, os circuitos podem funcionar de forma paralela ou serial. No **processamento serial**, os neurônios fazem sinapse de **um para um** em sequência, de forma que o resultado do processamento de cada circuito seja necessário para que o próximo circuito contribua com o processamento total, funcionando como um arco reflexo, conduzindo o sinal em uma única via. No **processamento paralelo**, os sinais são processados em vias distintas e as informações são transferidas de forma concomitante no tempo, seja na forma de sinais aferentes enviados de diversos receptores sensitivos ao SNC, como sinais enviados do SNC a múltiplos órgãos efetores (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; HEBB, 2005).

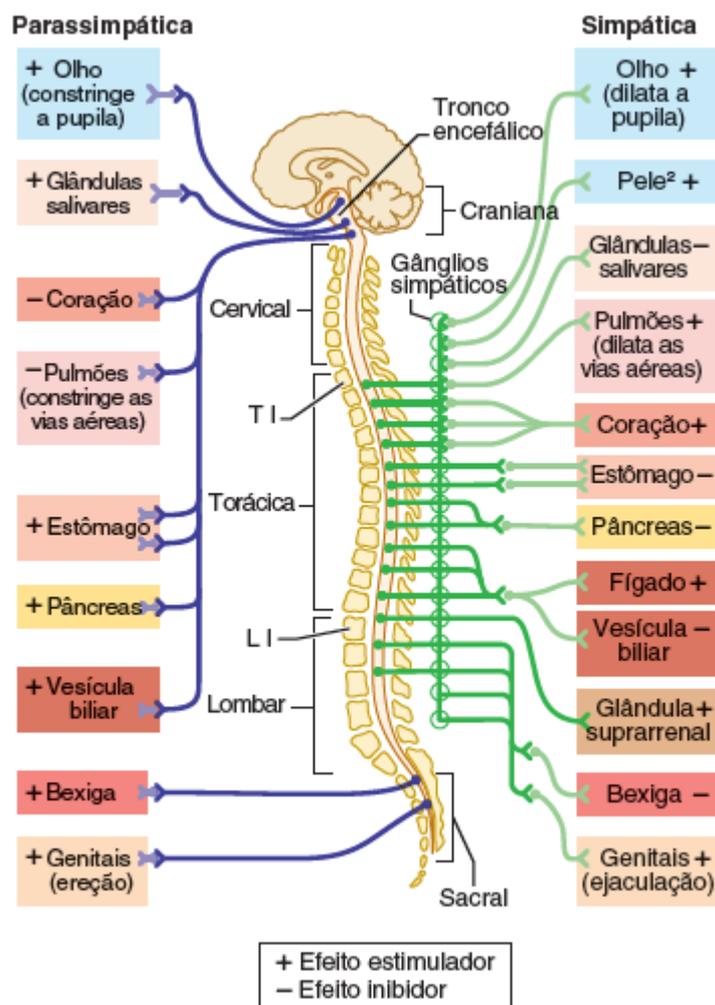
2.2.10 Divisão autônoma do sistema nervoso

Dentre as quatro divisões do sistema nervoso periférico, a divisão motora visceral, ou **divisão autônoma do sistema nervoso (SNA)**, diferencia-se por possuir um sistema motor que trabalha com relativa independência. O SNA é um sistema de neurônios motores que inervam

a musculatura lisa, regulando as funções viscerais, como pressão arterial, frequência cardíaca, sistema digestório, sistema respiratório e demais funções essenciais para manter o funcionamento do corpo que não exigem comando consciente do próprio ser (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

O SNA é dividido em duas partes, a **parte simpática** e a **parte parassimpática**, que são compostas por uma cadeia de dois neurônios motores que inervam o mesmo órgão visceral, mas que provocam efeitos opostos, onde uma divisão estimula os órgãos efetores e a outra divisão inibe essas ações. Na Figura 15, pode-se observar a vista geral das subdivisões do SNA e as ações de estímulo e inibição mobilizadas por cada divisão.

Figura 15 – Vista geral das subdivisões do SNA.



Fonte: Marieb, 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.

A parte parassimpática mobiliza o corpo a relaxar e é mais ativa quando o corpo está em repouso, mantendo as frequências cardíaca e respiratória em níveis baixos, conservando

energia corporal e direcionando esforços apenas para ações vitais de manutenção, como a digestão e a eliminação de fezes e urina. Já a parte simpática mobiliza o corpo para atividades vigorosas, como sair de situações de perigo, realizar esforço físico extra ou resolver problemas cognitivos complexos. A ação da parte simpática é evidenciada principalmente pelo aumento das frequências cardíaca e respiratória que fornecem mais sangue e oxigênio para os músculos, pelo aumento de açúcar no sangue liberado pelo fígado para suprir as necessidades energéticas e pela dilatação das pupilas para obter uma visão mais clara (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

Para encerrar a seção de fundamentos do sistema nervoso, apresenta-se a seguir a região do encéfalo que exerce controle sobre as ações da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso.

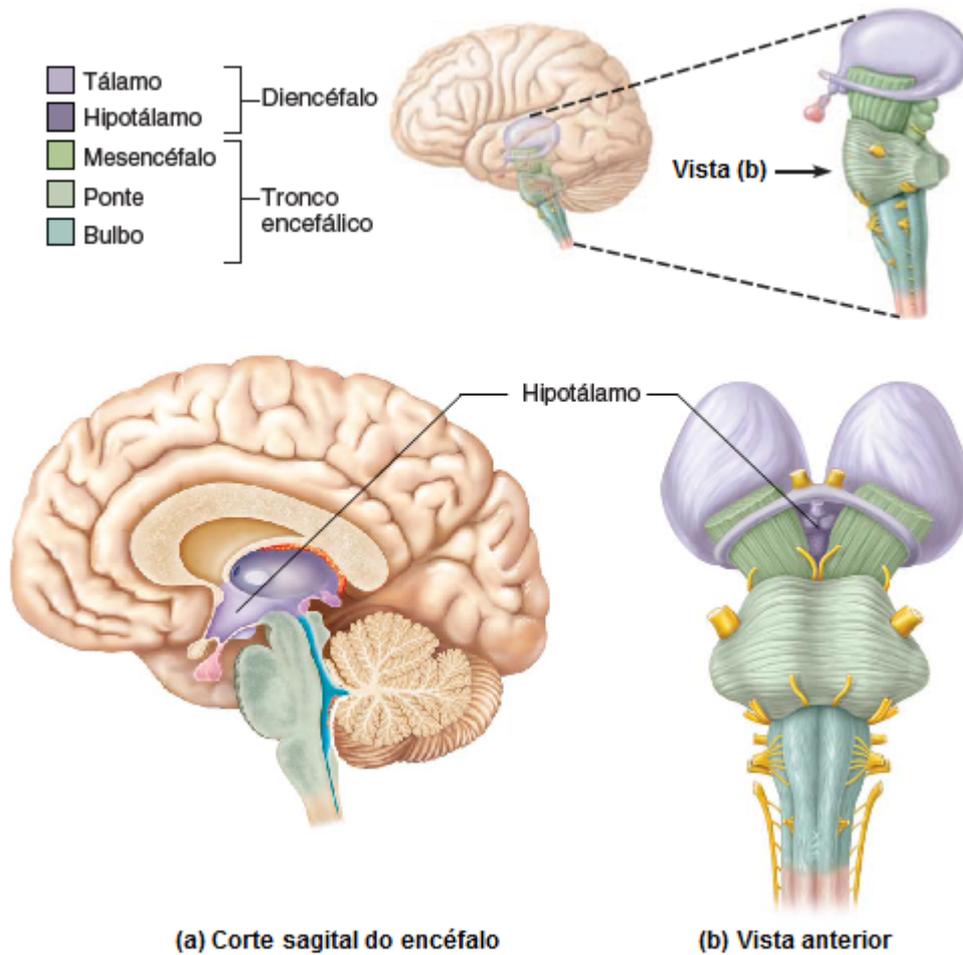
2.2.11 Hipotálamo

Localizado na parte inferior do diencéfalo, entre o quiasma óptico e os corpos mamilares, o **hipotálamo** é a parte do encéfalo que atua como centro de controle visceral do corpo, exercendo papel fundamental sobre as ações do sistema nervoso autônomo (SNA). A principal função do hipotálamo é controlar as funções necessárias para manter o corpo em funcionamento, controlando de forma autônoma os diversos ritmos biológicos, como o ritmo da frequência cardíaca e da frequência respiratória, assim como a intensidade de trabalho dos órgãos do corpo (GAZZANIGA; IVRY; MANGUN, 2014; MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). A Figura 16 ilustra a região do hipotálamo.

Com a tarefa de controlar o sistema nervoso autônomo, suas principais funções incluem:

- 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.

Figura 16 – Anatomia do hipotálamo.



Fonte: Adaptado de Marieb, 2014, p.394

Legenda: A imagem indica a localização da estrutura do hipotálamo, inserida no conjunto formado por diencéfalo e tronco encefálico.

Todas estas funções são realizadas através de envio de sinais nervosos, que ora estimulam o sistema cognitivo provocando reações comportamentais, como sentir sede e consequentemente procurar água para beber, e ora sofrem estímulos do sistema cognitivo como sentir medo e provocar reações em ritmo cardíaco e na produção de hormônios por glândulas endócrinas.

Desta forma, relacionando os efeitos do sistema cognitivo sobre o hipotálamo e baseado em diversos trabalhos que estudam a cognição por meio de sinais pupilares (HESS; POLT, 1960; HESS; POLT, 1964; HESS, 1965; KAHNEMAN; BEATTY, 1966; AHERN; BEATTY, 1979), Beatty e Lucero-Wagoner (2000) descrevem as reações desencadeadas nos órgãos controlados pelo hipotálamo quando estimulado pelo sistema cognitivo, especificando a variação do diâmetro pupilar como um indicador sensível de carga de trabalho mental.

2.3 FUNDAMENTOS DA VISÃO

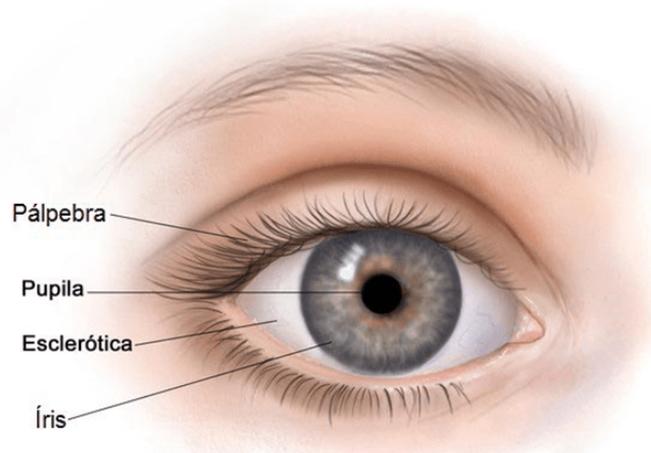
A visão é o sentido sensorial que nos permite perceber o que ocorre em nossa volta. Através dos olhos como órgão sensitivo e do cérebro com função cognitiva, a visão é o sentido de maior complexibilidade do corpo humano, com uma região do cérebro de aproximadamente 40% do córtex cerebral especialmente dedicado ao processamento de informação visual e órgãos receptores que reúnem cerca de 70% de todos os receptores sensitivos do corpo (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.3.1 Anatomia do olho

Os olhos possuem cerca de 107 milhões de células sensitivas a luz contemplando uma resolução de 576 megapixels. A função do olho é basicamente detectar luz e estimular os neurônios sensitivos que levam a informação visual até o sistema nervoso central e posteriormente até o córtex visual (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014; ROGERS, 2010).

O olho é um complexo órgão do corpo humano, composto por cerca de dois milhões de componentes funcionais, o que torna o estudo de sua anatomia algo extremamente extenso. Simplificando as diversas propriedades de sua anatomia, pode-se identificar na Figura 17 os principais componentes que fazem parte do escopo deste trabalho.

Figura 17 – Anatomia superficial do olho direito.



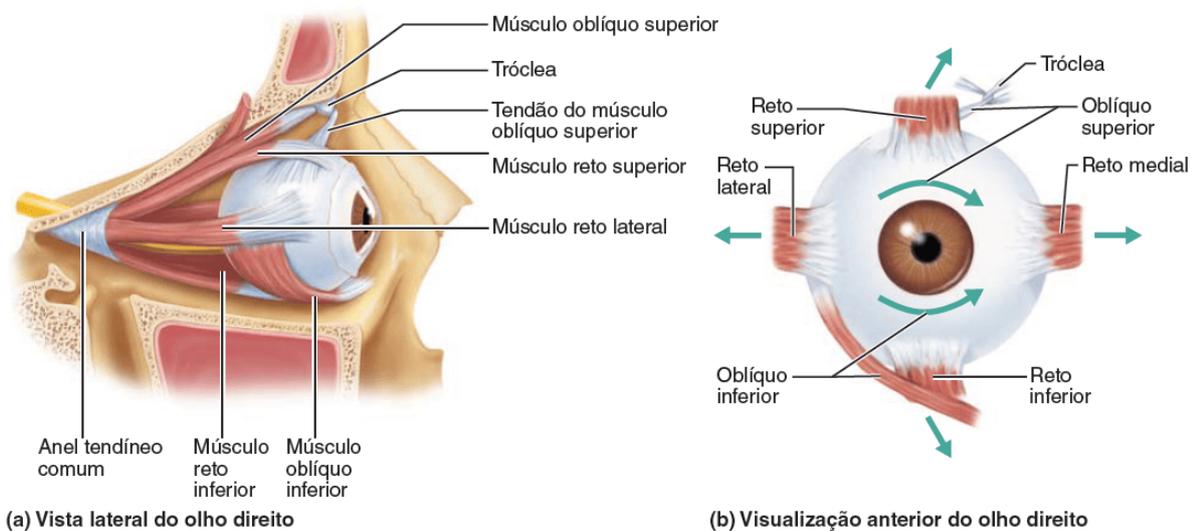
Disponível em: <<http://www.lifestyles.com.br/index.htm/2016/09/partes-olho-humano>>

Acesso em: 02 de maio de 2017.

2.3.2 Movimento ocular

O olho possui 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. 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 período 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 18. 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).

Figura 18 – Músculos extrínsecos do olho.



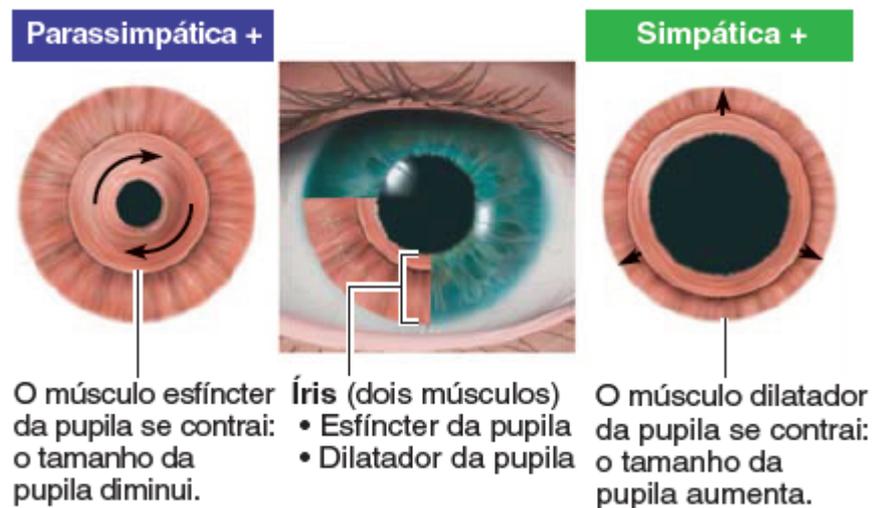
Fonte: Marieb, 2014

Legenda: No diagrama (a), é apresentado 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.

A dilatação e a constricção 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 19 mostra como os músculos esfíncter e dilatador atuam para regular o tamanho da pupila.

Figura 19 – Constrição e dilatação da pupila.



Fonte: Marieb, 2014

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

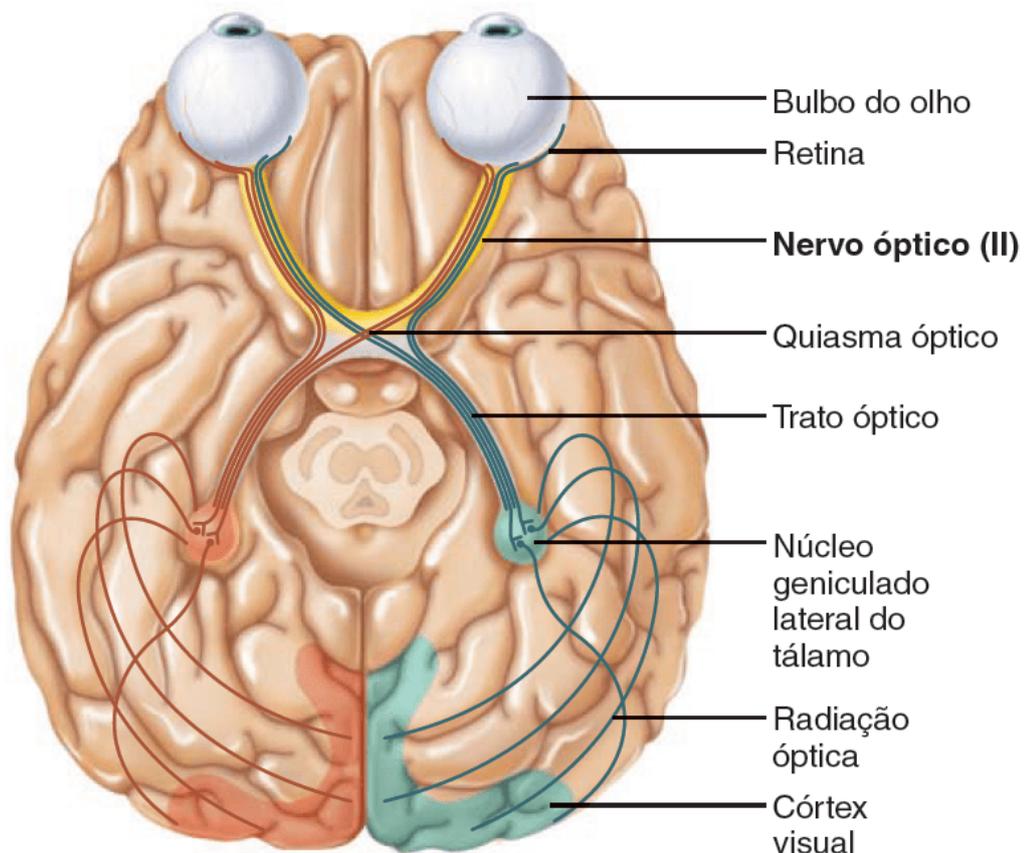
Adicionalmente, a pupila pode sofrer constrições e dilatações alheias as suas funções naturais de controle de luminosidade, pois os músculos da íris são inervados pelas fibras parassimpáticas e simpáticas do sistema nervoso, o que permite ações provenientes de outros estímulos e ou inibições da Divisão Autônoma do Sistema Nervoso (SNA). Em situações de relaxamento e economia de energia corporal, a parte parassimpática do sistema nervoso é ativada, gerando estímulos nervosos para a pupila restringir, diminuindo a quantidade de luz que entra no olho e consequentemente 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).

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).

2.3.3 Processamento de informação visual

A informação visual é gerada na retina, através de pigmentos visuais que absorvem e encaminham a luz até as células fotorreceptoras. As células fotorreceptoras, estimuladas pela luz, sinalizam às células bipolares que geram potenciais de impulsos nervosos e os enviam até o nervo óptico através das células ganglionares (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014). O processamento de informação visual acontece em diferentes partes do encéfalo. Como pode-se ver na Figura 20, a via visual principal conduz os impulsos nervosos gerados na retina até o córtex cerebral, que é a parte do encéfalo que processa maior parte da informação visual e é responsável pela visualização consciente. Além disso, uma parte da informação visual vai para o mesencéfalo e diencéfalo que controlam os reflexos e os comportamentos subconscientes que requerem informações visuais.

Figura 20 – Via visual para o cérebro.



Fonte: Marieb, 2014

Legenda: A Figura ilustra o percurso do nervo óptico até o córtex cerebral, dividindo parte dos axônios no quiasma óptico para proporcionar a percepção de profundidade, também chamada de visão estereoscópica ou tridimensional.

Seguindo a via visual pode-se observar que metade dos axônios de cada olho se cruzam no **quiasma óptico** e seguem para **trato óptico**, unindo-se com a outra metade de axônios de cada olho. O par de trato óptico estende os axônios do nervo óptico até o **núcleo geniculado lateral do tálamo**, onde formam sinapses com neurônios talâmicos que formam a radiação óptica da informação visual no **córtex visual**.

O córtex visual, localizado no lobo occipital do cérebro, é dividido em duas partes, esquerda e direita, onde cada parte é composta por córtex visual primário e córtex visual secundário. O córtex visual primário é a zona que recebe os primeiros impulsos nervosos e é onde os objetos ganham forma, identificação de luminosidade e disposição espacial. Em seguida a informação visual chega até o córtex visual secundário que possui funções mais especializadas, como a associação visual e a identificação de relevo e texturas (MARIEB; WILHELM; MALLAT, 2014).

2.3.4 Controle do diâmetro da pupila

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

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 à 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, à 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). A Tabela 1 apresenta a relação de estímulos somativos dos fatores A e B.

Tabela 1 – Relação de estímulo aos músculos da pupila.

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

Fonte: Autor

Nota: O sinal de (+) indica estímulo a dilatação e o sinal de (-) indica estímulo a constrição.

Levando em consideração a ação da luz na Tabela 1, percebe-se que ao controlar esta variável para que fique estável durante experimentos cognitivos, garante que a variação pupilar observada é proveniente apenas do esforço cognitivo refletido no SNA.

2.4 TÉCNICAS DE MENSURAÇÃO PUPILAR

Mensuração pupilar é uma técnica normalmente empregada no estudo da cognição humana, podendo em casos isolados servir também como medida de diagnóstico de doenças sintomáticas e avaliação do estado vital em pacientes pós-traumáticos (SIROIS; BRISSON, 2014; VARGAS, 2016; CLUSMANN; SCHALLER; SCHRAMM, 2001; TOKUDA; NAKAZATO; STEIN, 2003).

Em ciências da cognição, a técnica de mensuração pupilar é chamada de pupilometria e consiste basicamente em técnicas de mensuração e registro temporal da variação do diâmetro pupilar de um indivíduo exposto a um estímulo cognitivo (SIROIS; BRISSON, 2014).

2.4.1 Breve histórico

Nos primeiros trabalhos realizados por (HESS; POLT, 1960) e consecutivamente por (KAHNEMAN; BEATTY, 1966), a mensuração do diâmetro da pupila era realizada através de um conjunto de fotografias tiradas dos olhos de indivíduos durante a realização de alguns experimentos, que posteriormente eram projetadas em um quadro e tomadas as medidas manualmente com o uso de uma régua, quadro a quadro, em uma tarefa extensa e extremamente trabalhosa.

A técnica de fotografar os olhos para medir o diâmetro da pupila recebeu o nome de **fotoculografia** dando origem a uma técnica de aquisição baseada em foto, conhecida pela sigla inglesa como **POG (Photo-OculoGraphy)**. Após dominar a técnica de aquisição de imagem, o próximo passo foi padronizar a periodicidade de aquisição de amostras coletadas ao longo do tempo, que segundo (KAHNEMAN; BEATTY, 1966) foi superada utilizando um metrônomo como controlador do tempo, que a cada batida disparava um flash de luz infravermelha batendo uma foto. Após modelar uma técnica funcional, mesmo que trabalhosa, o próximo passo era aumentar a taxa de aquisição, surgindo então a técnica de aquisição baseada em vídeo, chamada de **vídeo-oculografia**, conhecida pela sigla inglesa como **VOG (Video-OculoGraphy)**. A técnica de VOG possui os mesmos princípios da técnica de POG, diferenciando-se apenas na taxa de aquisição de imagens, que inicialmente saltou para 20 quadros por segundo, permitindo análises mais precisas das variações pupilares e, conseqüentemente, processamento dessas imagens (DUCHOWSKI, 2017; SIROIS; BRISSON, 2014).

Atualmente os conceitos de POG e VOG ainda são utilizados, no entanto, ao longo dos anos, com o aumento da capacidade dos equipamentos e surgimento de novas tecnologias, muitos procedimentos foram aprimorados, transformando uma técnica manual e trabalhosa em técnicas automatizadas realizadas por sistemas computacionais.

2.4.2 Equipamentos atuais

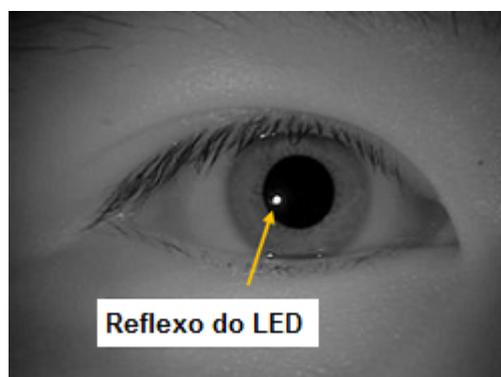
Atualmente a mensuração pupilar é feita com equipamentos completos para análise de movimento ocular, que permitem não só medir os movimentos internos de dilatação e constrição das pupilas como os movimentos externos, rastreando o foco da visão. Como exemplo destes equipamentos, tem-se o rastreador ocular **Tobii Pro TX300**, que foi utilizado nos experimentos preliminares e será utilizado nos demais experimentos propostos neste trabalho.

A maioria desses equipamentos de rastreamento ocular, 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)**, que basicamente utiliza uma fonte de luz infravermelha imperceptível ao olho humano para iluminar os olhos sem provocar alteração no diâmetro pupilar, causando reflexos nas córneas que são capturados por uma câmera sensível a luz infravermelha (BERGSTROM; SCHALL, 2014; POOLE; BALL, 2006; TOBII TECHNOLOGY, 2012).

2.4.3 Técnica de rastreamento ocular

A técnica mais comum para rastreamento ocular é a técnica de PCCR. Nesta técnica é utilizado um LED infravermelho para iluminar o rosto do indivíduo e gerar pontos de reflexo na córnea que são detectados por uma câmera sensível a infravermelho (GUESTRIN; EIZENMAN, 2006). Como pode-se ver na Figura 21, o reflexo do LED gera um ponto brilhante na córnea que servirá de marcador para identificação do olho.

Figura 21 – Reflexo do LED infravermelho na córnea.



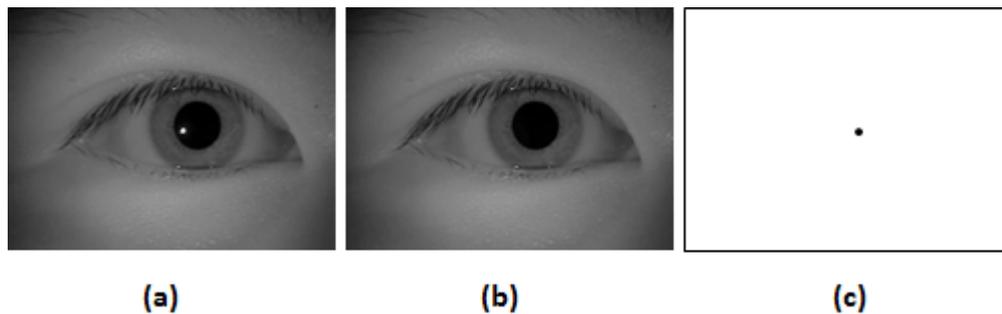
Fonte: Adaptado da base de dados CASIA
Disponível em: <<http://www.nlpr.ia.ac.cn/english/irids/irisdatabase.htm>>.
Acesso em: 26/05/2017.

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, pálpebras, 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 sincro-

nizada 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 22 mostra um exemplo da aplicação deste método.

Figura 22 – Método de diferença de imagem.



Fonte: Adaptado da base de dados CASIA

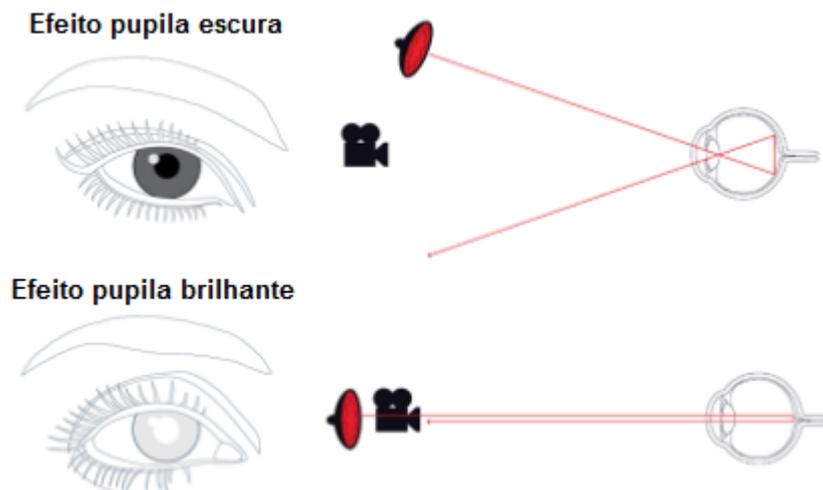
Disponível em: <<http://www.nlpr.ia.ac.cn/english/irids/irisdatabase.htm>>.

Acesso em: 26/05/2017.

Legenda: (a) imagem par, (b) imagem ímpar, (c) diferença de imagem.

As técnicas de rastreamento ocular que utilizam o método PCCR ainda podem ser definidas conforme seu sistema de iluminação, que como pode ser visto na Figura 23, pode ser configurado de duas formas distintas, proporcionando o efeito de pupila escura e o efeito de pupila brilhante (MORIMOTO et al., 2000; EBISAWA, 1970).

Figura 23 – Rastreamento pupilar escuro e brilhante.

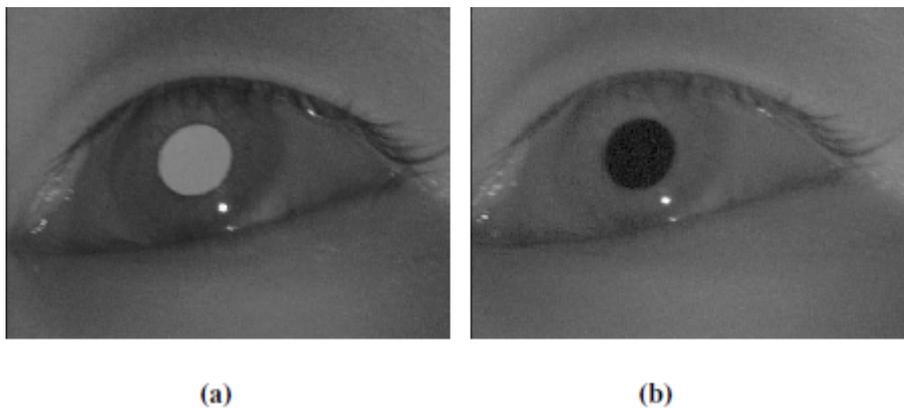


Fonte: Site Tobii, 2017

Legenda: A figura mostra diferença de posicionamento da iluminação e o efeito adquirido em cada técnica.

O efeito da pupila escura é adquirido colocando o ponto de iluminação dos olhos longe do eixo óptico do dispositivo de captura de imagem, tornando a pupila mais escura do que a íris que possui tecidos mais rasos. E o efeito da pupila brilhante é adquirido colocando o ponto de iluminação dos olhos perto do eixo óptico do dispositivo de captura de imagem, gerando o efeito de brilho nas pupilas semelhantes aos efeitos de olhos vermelhos em fotografias (MORIMOTO et al., 2000; EBISAWA, 1970). A Figura 24 mostra um exemplo real do efeito pupila escura e pupila brilhante.

Figura 24 – Aquisição de imagem pupilar brilhante e escura.



Fonte: Morimoto, 1999

Legenda: (a) Efeito pupila brilhante, (b) efeito pupila escura. Em ambas imagens é possível ver a reflexo do LED na parte inferior da íris.

A escolha do melhor efeito a ser aplicado deve levar em consideração alguns aspectos que podem impactar na rastreabilidade da pupila como a iluminação do ambiente, a posição da cabeça e os fatores da idade e etnia do indivíduo que interferem diretamente na variabilidade de tamanho e grau de abertura dos olhos (HANSEN; JI, 2010).

Alguns equipamentos utilizam as duas técnicas e durante a fase de calibração avaliam qual técnica usar conforme as características de cada indivíduo, optando pela técnica que retornar melhor precisão de rastreabilidade. As técnicas de iluminação também podem ser alteradas após iniciada a gravação caso ocorram modificações nas condições do ambiente que impacte de forma negativa na rastreabilidade da pupila. O equipamento **Tobii Pro TX300** utiliza exclusivamente a técnica de rastreamento de pupila escura o que requer um ambiente com iluminação constante entre 300 e 1000 lux (TOBII TECHNOLOGY, 2013).

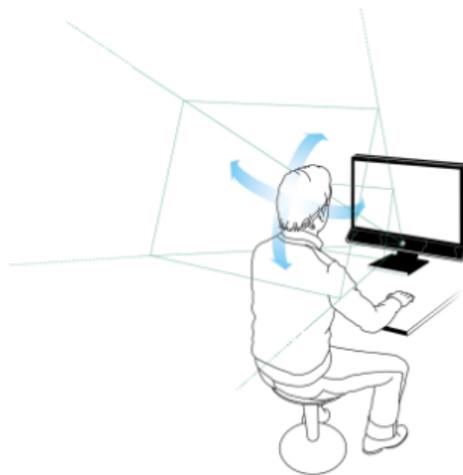
Adicionalmente, existem também os equipamentos que utilizam as duas técnicas concomitantemente, e através do método de diferença de imagem utilizam a diferença gerada entre efeito escuro e efeito brilhante para segmentar a pupila. De qualquer forma, independentemente da configuração utilizada, o que se espera com os efeitos de pupila escura ou brilhante é facili-

tar a detecção da pupila pelos algoritmos de detecção de objetos e conseqüentemente reduzir o custo computacional com processamento de imagem.

2.4.4 Rastreamento remoto

Complementar às técnicas de detecção pupilar, os atuais equipamentos de rastreamento ocular permitem a gravação de dados sem fixar nenhum equipamento no indivíduo, permitindo o livre movimento da cabeça durante o experimento. O que torna isso possível é a técnica de rastreamento remoto, conhecida pela sigla inglesa **VOR (Vestibo-Ocular Reflex)**, que utiliza os mesmos conceitos aplicados na técnica de PCCR, mas faz a captura de imagem através de duas câmeras (GUESTRIN; EIZENMAN, 2006; ALLISON; EIZENMAN; CHEUNG, 1996). As duas câmeras produzem duas imagens dos olhos com as respectivas características de detecção pupilar, mas com duas fontes diferentes sobre a posição do olho, o que permite aplicar técnicas de calibração de câmera e determinar as coordenadas dos olhos no mundo, calculando as variações no espaço tridimensional e garantindo a rastreabilidade dos olhos mesmo que a posição da cabeça mude (GUESTRIN; EIZENMAN, 2006; FORSYTH; PONCE, 2011; PINHEIRO et al., 2008). A Figura 25 ilustra a liberdade de movimentos de cabeça do indivíduo ao utilizar um equipamento com rastreamento remoto.

Figura 25 – Rastreamento ocular remoto.



Fonte: Site Tobii, 2017

Adicionalmente, é importante ressaltar que embora seja possível movimentar a cabeça, esses movimentos são limitados, podendo impactar negativamente na gravação do sinal caso o indivíduo faça movimentos rápidos ou gire a cabeça para fora dos limites do equipamento (GUESTRIN; EIZENMAN, 2006; ALLISON; EIZENMAN; CHEUNG, 1996).

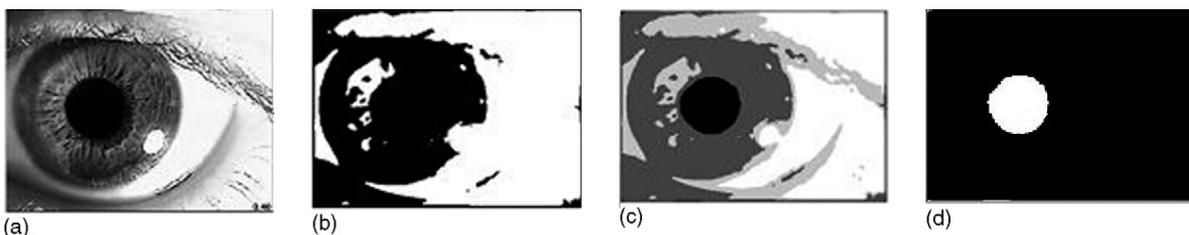
2.4.5 Processamento da imagem

A etapa de processamento de imagem é compreendida em duas fases, a fase de segmentação da pupila e a fase de estimativa de tamanho da pupila. Para a segmentação da pupila, além da técnica de PCCR e da diferença de imagens descritas anteriormente, também são utilizadas outras técnicas de visão computacional, como técnicas baseadas em formas, técnicas baseadas em características e técnicas baseadas em aparência, além de algumas otimizações com métodos híbridos desenvolvidos especificamente para processamento de imagem dos olhos (HANSEN; JI, 2010).

Os algoritmos baseados em formas utilizam um modelo de olho geométrico e uma medida de similaridade que leva em consideração diversos fatores como possíveis deformações da imagem e a forma elíptica da pupila. Esta técnica necessita de imagens com alto contraste, alta resolução do olho e de um ponto de referência que pode ser adquirido com a técnica de PCCR. Além disso, esta técnica é sensível à oclusões e à variação de luminosidade do ambiente, podendo produzir resultados imprecisos caso haja conflito de reflexos gerados pela iluminação ambiente com o ponto de referência produzido pela luz infravermelha (HANSEN; JI, 2010; SANTIS; IACOVIELLO, 2006).

Segundo (SANTIS; IACOVIELLO, 2006), a segmentação baseada em formas pode ser facilitada se previamente for implementada uma segmentação de 4 níveis, removendo informações locais para realçar as áreas geométricas de alto contraste, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Segmentação de 4 níveis.



Fonte: Adaptado de Santis, 2006, p. 04

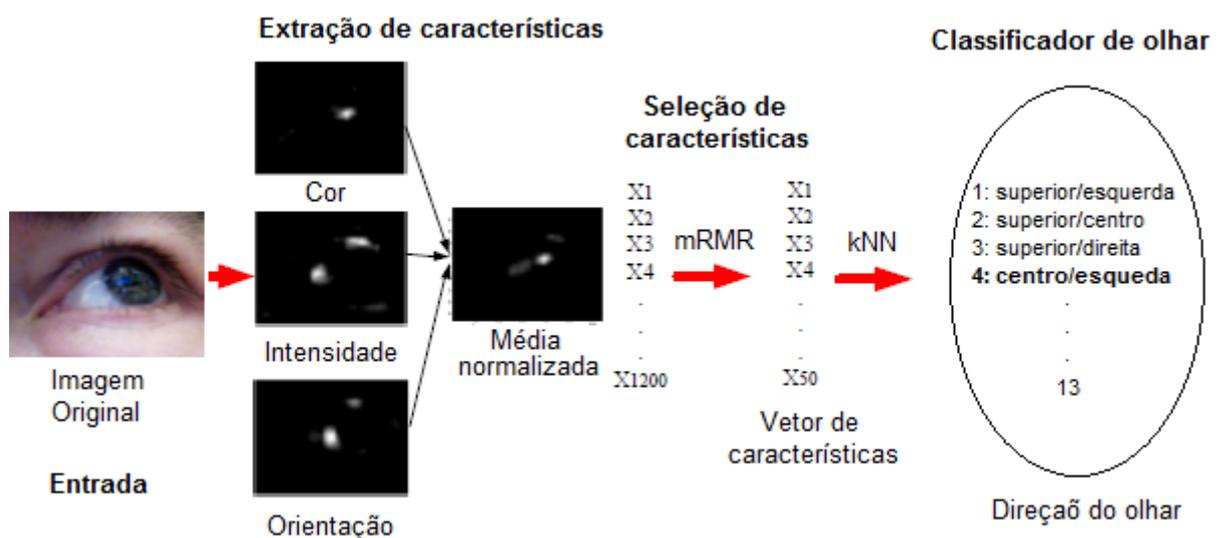
Legenda: Exemplo de resultado obtido com técnica baseada em formas e segmentação de 4 níveis. (a) dados originais, (b) binarização precoce, (c) segmentação de 4 níveis, (d) localização da pupila.

Os algoritmos baseados em características utilizam pontos-chaves anatômicos do olho como a sobrancelha, a pálpebra, os cílios, a esclerótica, a íris e a pupila, para encontrar os limites entre cada região do olho que podem ser destacados por suas diferenças em níveis de cinza. Com esta técnica é possível detectar bordas, linhas, orientação do olho, escala, comprimento e até contorno das partes com o uso de filtros de Gabor (HANSEN; JI, 2010; HERPERS et al.,

1996; ZHANG et al., 2008). Esta técnica é menos sensível a iluminação ambiente, mas pode confundir outras características da face como área entre os olhos, dificultando a detecção da pupila (HANSEN; JI, 2010).

Semelhante aos algoritmos baseados em características, existem também os algoritmos baseados em aparência, que utilizam as características fotométricas da imagem como informações espaciais, cores e áreas com concentração de tonalidades similares. Por exemplo, a esclerótica (parte branca do olho) reúne uma grande quantidade de pixels brancos ou em tonalidades claras que são delimitados externamente pelo contorno das pálpebras e internamente pela íris, da mesma forma uma determinada quantidade de pixels pretos ou em tonalidade escura pode caracterizar a pupila que está sempre circunscrita dentro da íris. A detecção dos pontos-chaves neste método é realizada através de um motor de inferência que utiliza uma série de imagens calibradas, com modelos fotométricos definidos de cada região relevante para detecção (HANSEN; JI, 2010; SCHWEITZER; DENG; ANDERSON, 2011). Esta técnica não precisa do auxílio de um marcador de PCCR, no entanto, encontra problemas com a variação da rotação do plano da imagem e com escalas desproporcionais inerentes às diferenças entre indivíduos que podem diferir bastante do modelo calibrado (HANSEN; JI, 2010). A Figura 27 mostra um exemplo desta aplicação.

Figura 27 – Segmentação por aparência.



Fonte: Adaptado de Zhand, 2011, p. 03

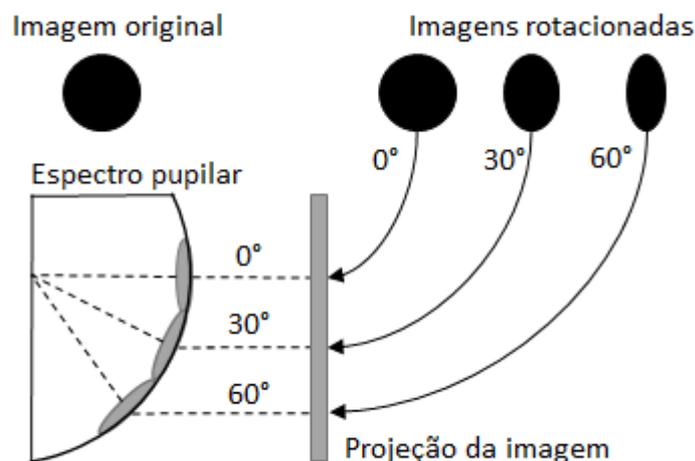
Legenda: Exemplo de mapeamento de dados para classificação de imagem. O mRMR é o método de seleção de características (minimum Redundancy maximum Relevance / mínima redundância e máxima relevância) e kNN é o método do classificador (k-Nearest Neighbors / k-vizinhos mais próximos)

As técnicas baseadas em aparência, embora possam ser utilizadas para detectar e posteriormente segmentar a pupila, normalmente não são utilizadas para este fim, sendo mais eficientes em sistemas que necessitam unicamente de interpretação da imagem, como a estimativa da posição do olhar proposta por (ZHANG; BULLING; GELLERSEN, 2011), onde a implementação da técnica foi realizada mapeando os dados da imagem de entrada, constituindo um vetor de características com informações sobre cores, intensidade e orientação, fornecendo um conjunto de até 50 características para estimar a posição do olhar através de um classificador.

Além destas técnicas, também são comuns algumas otimizações que utilizam métodos híbridos, buscando combinar as vantagens de cada técnica para superar suas fragilidades individuais e alcançar um algoritmo que determine a posição e tamanho da pupila com maior precisão e com menor custo computacional possível (HANSEN; JI, 2010).

Após a etapa de segmentação, é possível estimar o diâmetro da pupila, binarizando a imagem e calculando a quantidade de pixels pela distância focal da câmera, seja em modelos estacionários com distância fixa ou em sistemas remotos com distância determinada pelas coordenadas do centro da pupila no mundo (KIRSCHBAUM, 1998; IBANEZ; YANO; ZIMMER, 2012; GEJJI et al., 2015). Para calcular o valor escalar exato da pupila, segundo (LEE et al., 2004), é recomendável corrigir as distorções causadas na imagem ao projetar um plano tridimensional em um plano bidimensional, como mostra os exemplos nas Figuras 28 e 29.

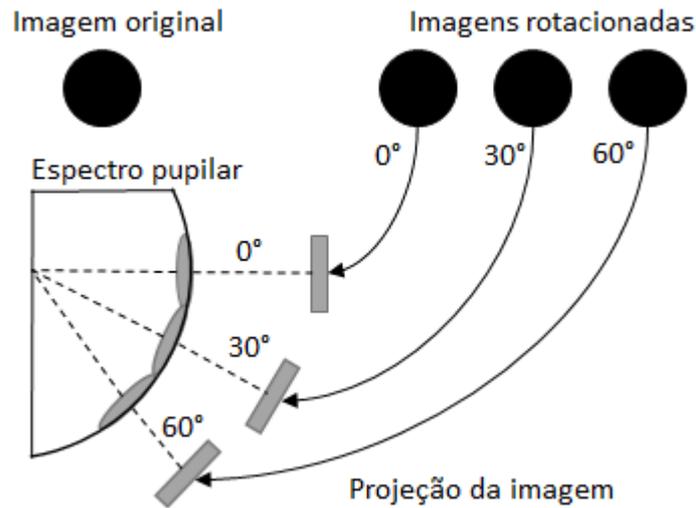
Figura 28 – Projeção sem correção angular.



Fonte: Adaptado de Lee, 2004, p. 02

Legenda: A figura mostra um exemplo de distorção da imagem ao projetar uma imagem tridimensional em um plano bidimensional.

Figura 29 – Projeção com correção angular.

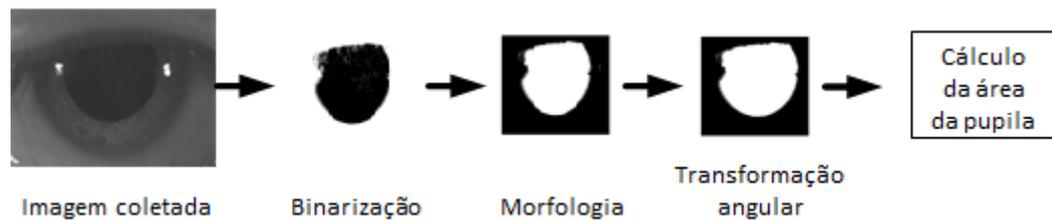


Fonte: Adaptado de Lee, 2004, p. 02

Legenda: A figura mostra um exemplo de transformação angular das coordenadas de projeção de uma imagem tridimensional em um plano bidimensional.

Desta forma, a última etapa do cálculo do tamanho da pupila deve incluir a transformação angular do plano tridimensional, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Etapas básicas para calcular a área da pupila.

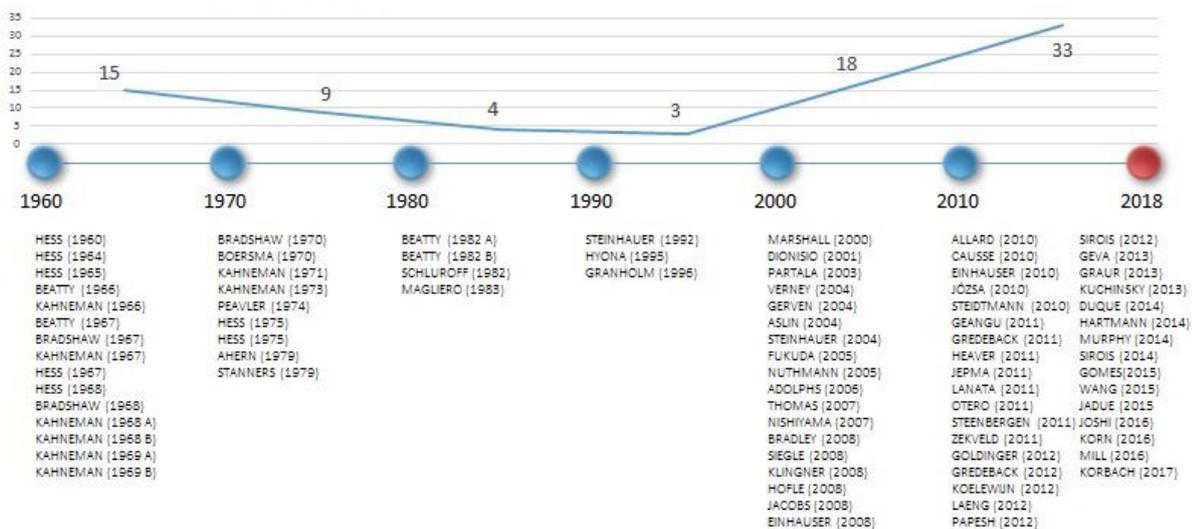


Fonte: Adaptado de Lee, 2004, p. 03

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta uma síntese dos trabalhos relacionados com estudos da ciência da cognição através da mensuração pupilar. O objetivo deste capítulo é descrever como surgiram os primeiros trabalhos e cronologicamente contextualizar as descobertas e avanços científicos que compõem e delimitam o estado da arte em pesquisas da ciência da cognição com mensuração pupilar. A Figura 31 apresenta os trabalhos mais relevantes publicados desde a descoberta desta técnica, dos quais alguns deles são descritos na seção a seguir.

Figura 31 – Trabalhos relacionados - Cognição e Pupila.



Fonte: Autor

3.1 CIÊNCIA DA COGNIÇÃO E MENSURAÇÃO PUPILAR

Os primeiros trabalhos publicados envolvendo a mensuração pupilar como técnica para observar comportamentos cognitivos ocorreram na década de 60. Os primeiros cientistas a explorar esta técnica foram os professores de psicologia da universidade de Chicago, Eckhard Heinrich Hess e James Martin Polt, que em um primeiro experimento observaram o comportamento pupilar de gatos e humanos, partindo da ideia de que a dilatação da pupila não refletisse apenas o controle de luminosidade do olho, mas também os sinais do sistema nervoso, relacionando a constrição e dilatação da pupila com os estímulos parassimpáticos e simpáticos do sistema nervoso autônomo. Partindo do pressuposto que estados emocionais fortes, como medo ou prazer, são acompanhados por estimulação simpática geral, os cientistas puderam evidenciar que a pupila dos gatos se dilatava em maior grau quando eram expostos frente a comidas e brin-

quedos estranhos ao seu dia a dia e que sua pupila retornava ao estado normal após reconhecer tais objetos. O mesmo comportamento pupilar foi evidenciado ao colocar 3 homens e 3 mulheres para observar imagens de uma mulher nua e em seguida de um homem nu, onde a pupila dos homens dilatava em maior grau ao ver a imagem da mulher nua e em menor grau ao ver a imagem do homem nu. Inversamente proporcional, as pupilas das mulheres dilataram em maior grau ao ver a imagem de um homem nu e em menor grau ao ver a imagem de uma mulher nua, o que evidenciou o fator emocional estimulando a parte simpática do sistema nervoso autônomo e conseqüentemente os músculos dilatadores da pupila (HESS; POLT, 1960).

Quatro anos mais tarde, Hess e Polt (1964) realizaram outro experimento, agora com notória relevância e grande repercussão científica ao indicar a atividade mental através da variação do tamanho da pupila. O experimento foi realizado com cinco voluntários, sendo quatro homens e uma mulher, todos com alto grau de escolaridade. Para estimular a atividade mental dos participantes foram utilizados quatro problemas simples de matemática, com complexidades diferentes e graduais. O experimento contou com um aparato engenhoso, composto por um suporte ajustável para cabeça do participante, por um sistema de iluminação com uma lâmpada de 100 watts posicionada acima da linha de visão e a 45 cm da cabeça do participante, por um espelho ajustável que refletia o foco da câmera fotográfica diretamente nos olhos do participante, por uma câmera fotográfica que tirava 2 fotos por segundo e por uma tela branca posicionada a frente do participante para exposição da tarefa mental. Após posicionar o participante no equipamento, o mesmo era orientado a permanecer tão imóvel quanto possível por cerca de 3 ou 4 minutos e assim que soubessem a resposta para o problema exposto deveriam expressá-las oralmente. As imagens coletadas ao longo de cada experimento foram capazes de determinar a variação do tamanho da pupila e os momentos exatos em que as variações ocorreram, revelando um aumento gradual conforme o nível de complexidade de cada problema, registrando dilatações que variavam de 4% a 29,5% entre cada indivíduo durante a solução do problema e a imediata constrição das pupilas após expressarem suas respostas. Os resultados obtidos evidenciaram o reflexo da variação da pupila associados com as atividades cognitivas (HESS; POLT, 1964).

No ano seguinte, Hess (1965) publicou um artigo descrevendo a pupila como uma janela para a alma, ao perceber que as pupilas são indicadores sensíveis de esforço mental, reforçando a ideia de que as pupilas além de sua função natural de controlar a quantidade de luz que entra no olho, também refletem os comandos da parte simpática e parassimpática do sistema nervoso autônomo. Hess evidenciou sua hipótese relatando uma série de experimentos, testando os efeitos da luminosidade, do sistema nervoso autônomo e atividade mental sobre as variações

apresentadas na pupila. No primeiro experimento, Hess fez um teste de aumento de luminosidade ao registrar a variação das pupilas esperando que todos os participantes tivessem dilatação negativa, ou seja, tivessem suas pupilas constringidas pela ação da luz. No entanto, foi possível perceber que os estímulos da tarefa cognitiva se sobressaíram frente a dilatação negativa causada pelo aumento de luminosidade, apresentando dilatação positiva em alguns participantes. No segundo experimento, Hess submeteu os participantes a imagens agradáveis e desagradáveis esperando ver constrição das pupilas nas imagens desagradáveis, mas, ao apresentar imagens de crianças aleijadas e soldados mortos em campo de batalha, a maioria dos participantes apresentaram um grau expressivo de dilatação das pupilas, evidenciando fatores emocionais como estímulo a dilatação das pupilas. No terceiro experimento, usando uma abordagem padrão para estudos de motivação, Hess investigou os efeitos da fome, apresentando imagens de comidas atraentes para dois grupos de dez homens cada, onde um grupo estava privado de se alimentar por cerca de quatro ou cinco horas e outro grupo havia feito uma refeição dentro da última hora. Hess observou que a dilatação pupilar dos dez sujeitos que estavam com fome foram em média duas vezes e meia maior que o grupo de dez sujeitos que estavam bem alimentados, elevando a complexidade dos sinais pupilares a questões inerentes ao estado físico de cada participante. Para completar esta série de experimentos, Hess adaptou seu equipamento para que os participantes pudessem provar alguns líquidos de sabores agradáveis e outros de sabores desagradáveis, utilizado água como bebida de controle, sucos e achocolatados como bebidas agradáveis e suco concentrado de limão e solução de quinina (remédio amargo) como bebidas desagradáveis. Os resultados mostraram que tanto as bebidas agradáveis como as desagradáveis causaram aumento na dilatação da pupila se comparadas com a ingestão de água utilizada como controle, evidenciando o reflexo dos receptores gustativos no sistema nervoso autônomo (HESS, 1965).

Em 1966, impulsionados pelas recentes descobertas de Hess, Daniel Kahneman e Jackson Beatty começaram a investigar o estado de atividade mental através da variação das pupilas (KAHNEMAN; BEATTY, 1966). Com base em resultados anteriores publicados por Hess, em que a pupila se dilata durante tarefas cognitivas e se contrai após a verbalização da resposta, Kahneman e Beatty iniciaram testes sugerindo que houvesse relação entre variação do tamanho da pupila com a carga de memória. E ao realizarem um experimento piloto com a participação de cinco voluntários e um sistema de medição pupilar realizado com técnicas de fotografia, puderam comprovar que em uma tarefa de curta memória as pupilas dilatavam-se enquanto uma pessoa recebia informação e constringia-se logo em seguida. O experimento principal realizado pela dupla consistiu em quatro blocos de sete ensaios, onde em cada bloco o sujeito ouvia uma

sequência numérica de três a sete dígitos e sua tarefa era memorizar e em seguida verbalizar a sequência, chamada de etapa de recuperação. Em seguida, recebiam uma sequência de quatro substantivos monossilábicos de alta frequência com a mesma tarefa de ouvir e recuperar a sequência e, por fim, recebiam uma sequência numérica de quatro dígitos e sua tarefa era memorizar e em seguida verbalizar a sequência adicionando um a cada dígito da sequência, chamada de etapa de transformação. O resultado do experimento apontou uma fase de carga, durante a memorização das sequências numéricas e sequências monossilábicas com aumento na dilatação pupilar, e uma fase de descarga após a recuperação das sequências, com a imediata constrição pupilar após verbalização dos sujeitos. Na fase de carga foi observado um aumento gradual na dilatação pupilar conforme o tamanho da sequência de dígitos a serem memorizados, atingindo o limite de capacidade dos sujeitos de memorizar e consequentemente imediata constrição das pupilas. E na etapa de transformação foi observado que embora fossem a mesma quantidade de dígitos a ser memorizados, por se tratar de uma tarefa que necessitava de uma operação de transformação a pupila apresentava picos de dilatação mais rápidos e em maior grau.

No ano seguinte Kahneman, Beatty e Pollack (1967) reformularam seu experimento, modelando um teste de esforço mental chamado de *Adicione 1*. O teste consistia em apresentar fichas com sequências numéricas de quatro dígitos a um sujeito previamente instruído a ler a sequência em voz alta e, após dois segundos, marcados por um metrônomo, dizer uma nova sequência de quatro dígitos, adicionando um a cada dígito da sequência original. Após confirmar a eficácia do teste, Kahneman e Beatty testaram outras variações do teste, aumentando o número de dígitos da sequência e o valor a ser adicionado na nova sequência e perceberam que sequências com mais de sete dígitos faziam os participantes desistirem, evidenciando uma instantânea constrição pupilar durante o experimento e que a adição de valor três em cada dígito da sequência produzia uma complexidade maior ao teste. Desta forma, chegando a um modelo funcional com uma sequência de quatro dígitos e duas variações de adição, o teste *Adicione 1*, onde a pupila dilatava em menor grau e o teste *Adicione 3*, onde a pupila apresentava dilatação consideravelmente maior, chegando a dilatar-se cerca de 50% do tamanho original em menos de cinco segundos (KAHNEMAN; BEATTY; POLLACK, 1967).

Encerrando a 1^o década de experimentos envolvendo a análise pupilar, Kahneman et al. (1969) realizaram um experimento cognitivo que relaciona o esforço realizado em uma tarefa mental com três funções autônomas do sistema nervoso: o diâmetro da pupila; a frequência cardíaca; e a resistência da pele. A tarefa mental possuía 3 níveis de dificuldade e foi observado um aumento simpático nas funções autônomas durante a realização da tarefa de maior dificuldade,

comprovando que existe relação entre o esforço mental e as reações fisiológicas observadas nos órgãos autônomos.

A primeira década (1960-1969) marcou a fase de formação do conhecimento teórico, que relaciona a resposta pupilar com a atividade cognitiva. Após esta década o desafio tornou-se aprimorar os métodos para processar o sinal pupilar.

Nas três décadas seguintes (entre os anos 1970 e 1999) houve uma redução de trabalhos envolvendo estudo da cognição por meio do processamento do sinal pupilar. Foram apenas 16 publicações, das quais grande parte relatava experimentos muito dispendiosos, com processos manuais para mensuração pupilar, ou processos semiautomatizados através de protótipos exclusivos de uma pequena minoria de cientistas.

Os principais trabalhos deste período foram descritos por Peavler (1974), Hess (1975), Ahern e Beatty (1979) e Beatty (1982b), com as respectivas obras: *“Tamanho da pupila, sobrecarga de informação e diferenças de desempenho”*; *“O papel do tamanho da pupila na comunicação”*; *“Variação das respostas pupilares durante o processamento de informação em testes de aptidão escolástica”* e *“Resposta pupilar evocada por esforço mental e estrutura de recursos de processamento”*. Dentre esses, o trabalho de maior contribuição para esta dissertação foi publicado por (AHERN; BEATTY, 1979).

Em 1979, Ahern e Beatty realizaram um experimento para determinar a inteligência e a capacidade mental medindo a variação pupilar durante um teste de aptidão escolar (AHERN; BEATTY, 1979). O teste de aptidão possuía três níveis de dificuldade e foi aplicado a trinta e nove alunos de graduação de sexo masculino e feminino, previamente classificados por um teste de inteligência convencional, formando um grupo de 22 sujeitos mais inteligentes e outro grupo de 17 sujeitos menos s. A aquisição de dados pupilométricos, o processamento e a análise dos dados foram realizados automaticamente sob o controle de um computador digital com um sistema de interface laboratorial. O diâmetro pupilar foi medido por um pupilômetro de televisão (Whittaker 1050S), que contém um encosto de cabeça e um sistema de iluminação infravermelho para os olhos. A câmera foi alinhada no plano horizontal do olho esquerdo do indivíduo e deslocada 45° da linha de visão, gravando um sinal analógico da medida do diâmetro da pupila que em seguida era convertido em um sinal digital amostrado a 50 milissegundos. O ambiente de aplicação do teste possuía iluminação controlada e o ajuste do foco da pupila era feita pelo próprio sujeito, com o auxílio de uma televisão que reproduzia sua pupila posicionada dois metros a sua frente. As questões do teste eram apresentadas através de um áudio previamente gravado com fala natural digitalizada a uma taxa de 10kHz para equalizar a tensão quadrática entre as palavras, produzindo uma intensidade de estímulo relativamente uniforme.

O teste possuía 38 problemas de multiplicação mental, onde o sujeito recebia dois números, um multiplicando e um multiplicador, separados por intervalos de dois segundos. Após receber o segundo número o sujeito tinha 5 segundos para solucionar o problema, totalizando uma gravação de 9 segundos para cada problema. Após cada sessão, os dados eram inspecionados e através de interpolação linear eram tratados para remover piscadas de olhos e outros artefatos que viessem a cortar o sinal. Por fim, o resultado do experimento apresentou fortes evidências de que a carga de processamento mental pode ser refletida com precisão através das mudanças no tamanho da pupila e que o processamento cognitivo pode ser psicometricamente medido e comparado entre indivíduos. Além disso, foi possível perceber diferenças psicométricas entre os grupos, com sujeitos mais inteligentes apresentando dilatações menores e sujeitos menos inteligentes apresentando dilatações maiores, fornecendo evidências de que surjam diferenças fisiológicas entre sujeitos durante uma tarefa cognitiva, tornando possível identificar sujeitos mais inteligentes.

Ao fim deste período (1970-2000), foi publicada uma patente que descreve os métodos e aparatos para realizar o rastreamento ocular e monitorar a dilatação pupilar para avaliar a atividade cognitiva. Esta patente foi registrada por Marshall (2000) e marcou um período de retomada de pesquisas e estudos da cognição por meio de processamento de sinais pupilares. A partir do ano 2000, aumentaram substancialmente as publicações de trabalhos publicados, como mostra a Figura 31 descrita anteriormente. Foi a partir deste período que os equipamentos automatizados para rastreamento ocular começaram a ser comercializados, marcando uma fase de aplicação prática das descobertas realizadas na década de 1960-1970.

Iniciando esta nova fase de aplicação prática, Partala e Surakka (2003) realizaram um experimento para investigar a variação do tamanho da pupila durante estimulação emocional. O experimento contou com 30 participantes, sendo 15 homens e 15 mulheres. Foram selecionados trinta estímulos sonoros, divididos e categorizados em 10 estímulos negativos (por exemplo, um casal brigando), 10 estímulos positivos (por exemplo, um bebe rindo) e 10 estímulos neutros (por exemplo, um ruído de fundo de um escritório). Em um ambiente com luminosidade controlada, os estímulos chegavam até os participantes através de um par de fones de ouvido, com o som controlado pelo programa *PsyScope* e a mensuração da pupila realizada através de um equipamento de rastreamento ocular com taxa de amostragem de 50 Hz, calibrado a cada sessão. O sinal coletado foi tratado para remover as piscadas de olho suavizando a linha da variância no domínio do tempo. Os resultados mostraram que durante os primeiros 400 milissegundos após o estímulo praticamente não há reação pupilar, alcançando a partir de então seus maiores picos entre 2 e 3 segundos após o estímulo. A comparação entre estímulos e reações nos partici-

pantes mostrara que a maior dilatação pupilar ocorreu com os estímulos positivos, seguidos de perto pelos estímulos negativos e bastante reduzidas pelos estímulos neutros, apresentando também maior dilatação pupilar em indivíduos do sexo feminino, indicando evidências de que os estímulos gerados provocaram reações fisiológicas inerentes a experiências subjetivas de cada indivíduo (PARTALA; SURAKKA, 2003).

No ano seguinte, Gerven et al. (2004) publicaram um trabalho de investigação de carga de memória e resposta cognitiva pupilar no envelhecimento. Foi feito um experimento com 16 adultos jovens e 16 adultos mais velhos, propondo-lhes uma tarefa dividida em duas fases: a fase de codificação, onde o participante deve memorizar uma sequência de números entre 1 e 6 dígitos; e a fase de decodificação, onde o participante recebe aleatoriamente diversos números e deve indicar o mais rápido possível se o número recebido pertence ao conjunto de números da fase de codificação. O experimento foi realizado com um equipamento computadorizado de rastreamento ocular, com taxa de aquisição de 50Hz, sistema de iluminação infravermelho para os olhos e monitor para apresentação do estímulo. Na etapa de processamento dos dados foi feito um filtro para as perdas de sinal durante o piscar dos olhos, substituindo por interpolação linear todos os dados com uma razão diferente de um desvio padrão. E na etapa de análise dos dados, foi possível encontrar um padrão de interação no qual os tempos de reação dos participantes idosos em função da carga de memória foram maiores do que em participantes mais jovens. Na fase de decodificação, a dilatação média dos participantes mais jovens foi consideravelmente maior do que na fase de codificação, onde não foi observado diferenças. No entanto, a dilatação média dos participantes mais velhos não foi tão sensível a carga de memória quanto dos participantes mais jovens, indicando fortes evidências de que a resposta pupilar, correlata com a carga de memória exercida, diminui com a idade avançada (GERVEN et al., 2004).

Quatro anos depois, Hofle et al. (2008) propuseram um estudo que relaciona a dilatação pupilar com a reatividade do sistema nervoso, utilizando o tamanho da pupila como indicador de dor. O experimento foi realizado com 20 participantes do mesmo gênero, compondo um conjunto de 20 mulheres saudáveis com idade entre 20 e 28 anos. O estímulo de dor foi realizado através de um dispositivo computadorizado de controle de pressão, que através de um êmbolo de 3 mm de diâmetro, posicionado sobre um dos dedos da mão, exercia pressão durante 20 segundos, variando os níveis de pressão de 1109,5 kPa para dores de baixa intensidade e 1317,6 kPa para dores de alta intensidade. Os resultados apresentaram uma reação pupilar imediata ao estímulo da dor, fazendo a pupila atingir o pico máximo de dilatação em aproximadamente 2 segundos. No entanto, houve pouca diferença na amplitude de dilatação pupilar ao comparar

os dois níveis de dor, indicando a dilatação máxima percebida como uma reação evocada pelo sistema nervoso precoce ao processamento cognitivo, apresentando picos de dilatação antes mesmo da assimilação do nível de dor pelo indivíduo (HOFLE et al., 2008).

Refinando as descobertas em torno de estudos cognitivos através de mensuração pupilar, Józsa (2010) relatou em um experimento que compara e avalia a variação da pupila durante testes cognitivos, descrevendo através de uma tarefa de usabilidade da internet em pesquisas, que indivíduos mais experientes apresentam dilatação menor que indivíduos menos experientes. Józsa testou também o impacto da quantidade de atividades propostas e, ao contrário do que se esperava, não foi possível perceber aumento de dilatação pupilar conforme aumentavam as tarefas de esforço mental. Entretanto, foi possível perceber imediata constrição das pupilas nos instantes em que os indivíduos obtinham sucesso na resolução das tarefas ou obtinham uma nova ideia de como concluir a tarefa, mostrando evidências que um indicador fisiológico de alívio pode ser detectado com a constrição das pupilas (JÓZSA, 2010).

Em 2015, partindo do pressuposto de que o nível de interesse de um indivíduo por dada opção em uma tarefa de escolha esteja fortemente relacionado com o grau de dilatação pupilar apresentado, Jadue et al. (2015) propuseram um experimento com objetivo de prever níveis de interesse em uma aplicação prática. O objetivo da aplicação era aprimorar as intenções de click de um usuário em determinadas páginas da internet. O experimento foi realizado com 25 indivíduos, um equipamento de rastreamento ocular e um simulador de páginas da internet. Os indivíduos foram instruídos a navegar no simulador e, a cada série, escolher um entre os nove objetos apresentados, clicando no objeto de maior interesse. O simulador repetia o processo de escolha 90 vezes e o equipamento de rastreamento ocular registrava a dilatação pupilar a cada escolha. Por fim, com os dados de dilatação pupilar e os dados de escolha, foi possível criar um modelo de previsão baseado em redes neurais artificiais com 82% de precisão de intenção de clicks, confirmando a relação de interesse com o grau de dilatação pupilar e consequentemente possibilitando o uso de informações implícitas dos indivíduos para recomendar melhorias em páginas da internet (JADUE et al., 2015).

Mais recentemente, o estudo realizado por (KORBACH; BRÜNKEN; PARK, 2017) apresenta um trabalho evidenciando os diferentes fatores que modificam a carga cognitiva e os impactos no uso de recursos cognitivos em processos de aprendizagem. O experimento parte do pressuposto que a capacidade cognitiva disponível é limitada pela capacidade de memória de trabalho e que a aquisição de conhecimento é promovida pelo uso eficiente dos recursos disponíveis. Desta forma, pressupondo também que indivíduos mais inteligentes, ou que utilizam os recursos cognitivos de forma mais eficiente, acabam por ter mais recursos a disposição e

consequentemente maior capacidade cognitiva. O experimento foi dividido em 3 etapas, cada uma com um conjunto de 26 participantes, totalizando 78 participantes, dentre eles cerca de 70% era do sexo feminino e 30% do sexo masculino e a idade média era de 23 anos. Foi obtido o consentimento de todos participantes para o estudo. O equipamento utilizado para mensuração pupilar foi o Tobii Pro TX300, com taxa de aquisição de sinal de 300Hz e um monitor de 23 polegadas para apresentação da tarefa de aprendizagem. A cada grupo de participantes foi proposto um método de aprendizagem, formando o grupo de aprendizagem com detalhes de distração, adicionando informações altamente interessantes, mas totalmente irrelevantes para o processo, um grupo de aprendizagem com animação mental, estimulando o processo de imaginação e um grupo de introdução básica de aprendizagem, como grupo de controle. Após a realização do experimento, foi comparado os sinais pupilares dos participantes dos 3 grupos, utilizando as medidas de variação pupilar para analisar a concentração de atenção de cada indivíduo. E, como esperado, foi possível perceber diferenças significativas de carga cognitiva entre cada grupo, apresentando uma carga significativamente maior no grupo de aprendizagem por imaginação do que no grupo de controle e no grupo com detalhes de distração. Entretanto, os resultados também apontaram o grupo de aprendizagem por imaginação como o grupo com melhor desempenho, indicando que embora fosse um processo custoso em nível de recursos cognitivos, mostrou-se um processo eficiente.

3.2 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Este capítulo apresentou uma revisão dos principais trabalhos realizados entre 1960 e 2017 que envolvem os estudos da ciência da cognição através de mensuração pupilar, fornecendo informações importantes para delimitar o estado da arte e orientar os próximos passos deste trabalho.

A partir da literatura apresentada, podemos destacar algumas características relevantes:

- a) O sinal pupilar é um indicador sensível de esforço mental;
- b) O desempenho mental torna-se limitado quando a demanda da carga cognitiva excede os recursos disponíveis;
- c) Fatores inerentes a cada indivíduo podem afetar significativamente o tamanho da pupila, como o estado emocional, o cansaço, o sono, o esgotamento de energia mental, a fome e habilidades específicas;

- d) A pupilometria é um método não invasivo que permite experimentos mais próximos da realidade do sujeito observado, não sendo necessário ambientes extremamente controlados como no caso dos experimentos com ressonância magnética e tomografia que exigem ambiente isolado, controle de movimento, restrições de uso por questões de segurança, entre outros;
- e) A pupilometria pode ser feita em qualquer lugar desde que seja controlada a luminosidade do ambiente;
- f) Os equipamentos atuais para mensuração pupilar são relativamente acessíveis e fornecem uma grande variedade de opções em análise e processamento de sinal;
- g) Comumente são utilizadas técnicas de interpolação linear para normalizar o sinal coletado;
- h) E comumente são utilizadas técnicas de análise de variância, que resumem a mensuração pupilar, para realizar inferências estatísticas sobre o sinal coletado.

4 EXPERIMENTO PRELIMINAR (CONTAGEM COGNITIVA)

Como estudo preliminar foi realizado um experimento cognitivo envolvendo a captura de sinais de movimento ocular e o respectivo processamento e análise da variância do diâmetro da pupila, com o objetivo de verificar a carga de esforço mental que indivíduos exerciam em uma atividade de contagem de objetos.

Principais objetivos do experimento:

- a) Analisar a variação pupilar de indivíduos em atividades cognitivas, verificando a sensibilidade da pupila frente às tarefas de contagem de objetos;
- b) prever o desempenho cognitivo dos participantes conforme o índice de variação pupilar.

Hipóteses testadas:

- a) A primeira hipótese investiga se tarefas cognitivas com operações de multiplicação estimulam a dilatação da pupila, de forma que possa ser relacionado o grau de complexibilidade do cálculo com o grau de dilatação da pupila.
- b) A segunda hipótese investiga se há alteração na variação do diâmetro pupilar ao agrupar os objetos da tarefa de contagem em subconjuntos ou em formatos geométricos, associando outras habilidades que não apenas a multiplicação de números ou a soma quantidades agrupadas em conjuntos menores.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o conjunto de materiais e métodos utilizados na realização do experimento preliminar e esta dividido em quatro subseções: participantes, tarefa e estímulos, aquisição do sinal e processamento dos sinais.

4.1.1 Participantes

O experimento contou com 33 participantes voluntários, sendo 28 homens e 5 mulheres, com idades entre 19 e 40 anos. O grupo de participantes foi constituído basicamente por estudantes da graduação e pós-graduação das áreas de Engenharia, Ciências da Computação,

Química, Pedagogia e Letras. Todos saudáveis e cognitivamente capazes, não possuíam problemas de visão e demonstravam conhecimentos básicos em aritmética.

4.1.2 Tarefa e estímulos

A criação e modelagem das tarefas e estímulos do experimento foram baseadas na literatura acerca de estudos cognitivos através de psicometria pupilar e na análise de dados de um experimento adjacente ao tema, realizado por um membro do grupo de pesquisas da área de processamento de sinais da FEI (FABBRO; THOMAZ, 2016).

O experimento realizado por Fabbro inicialmente não tinha o objetivo de analisar a variação do diâmetro da pupila, abordando apenas aspectos relacionados ao tempo de reação visual durante uma tarefa de contagem de moedas. No entanto, através de dados do diâmetro da pupila, gerados durante o experimento, foi possível perceber indícios que relacionava o aumento do diâmetro da pupila com a tarefa de contagem. E, de acordo com a literatura, sobre estudos cognitivos, descritas no capítulo anterior, o aumento do diâmetro da pupila relaciona-se sensivelmente com o aumento da carga de memória e com o aumento do valor de variáveis em cálculos aritméticos, destacando diferenças relevantes em cálculos de multiplicação entre dois números com um dígito e multiplicações entre dois números com dois dígitos.

Portanto, para testar a relação entre esforço cognitivo e diâmetro da pupila, foi criado um experimento de contagem de objetos, de forma que os participantes realizassem operações aritméticas para encontrar a resposta mais rapidamente. Os detalhes deste experimento são descritos a seguir nas subseções **tarefa cognitiva**, **estímulo visual** e **condução do teste**.

4.1.2.1 Tarefa cognitiva

Para composição do teste, foram escolhidos aleatoriamente 6 quantidades diferentes, resultantes de multiplicações entre dois números. O teste foi dividido em três níveis de dificuldade.

Nível 1: Multiplicação entre dois números de um dígito cada, escolhidos aleatoriamente, resultando nas multiplicações 4×5 e 7×8 , totalizando as respectivas quantidades 20 e 56.

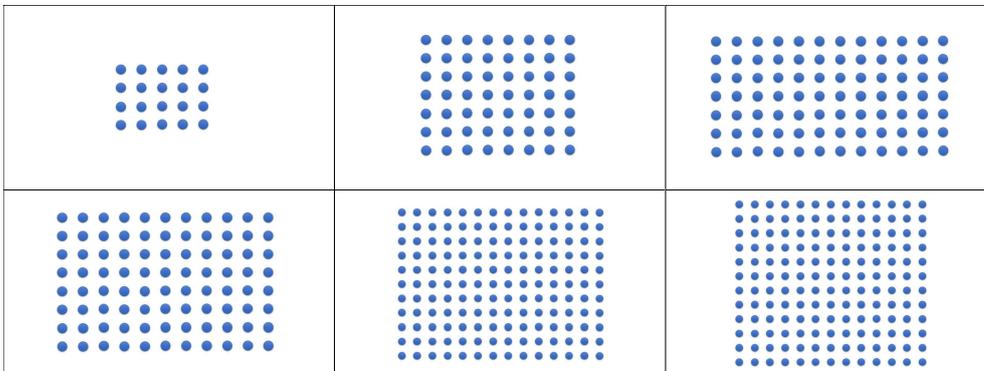
Nível 2: Multiplicação entre um número de um dígito e um número de dois dígitos compreendido entre 10 e 20, escolhidos aleatoriamente, resultando nas multiplicações 7×12 e 8×11 , totalizando as respectivas quantidades 84 e 88.

Nível 3: Multiplicação entre dois números de dois dígitos compreendidos entre 10 e 20, escolhidos aleatoriamente, resultando nas multiplicações 11×14 e 12×13 , totalizando as quantidades 154 e 156.

Para observar os padrões de contagem e a diferença na aquisição de informação, foram criados 3 padrões de distribuição diferentes para cada quantidade.

Padrão A: Quantidades agrupadas em retângulos, estimulando o participante a realizar multiplicação direta, como ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Quantidades dispostas no padrão A

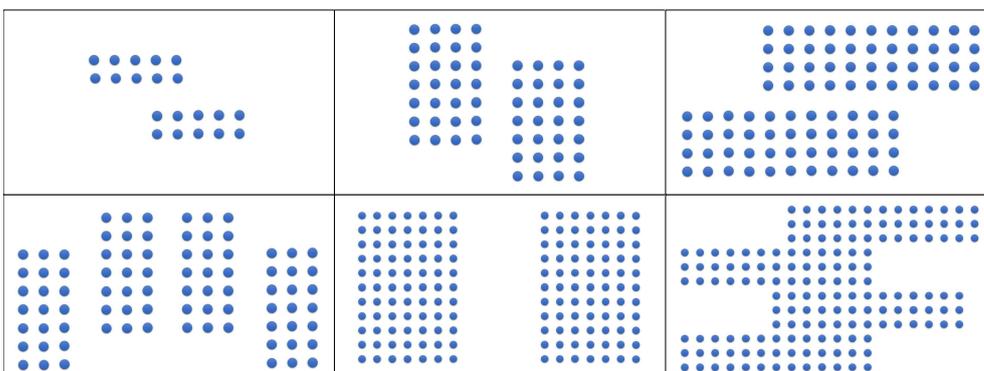


Fonte: Autor

Legenda: Quantidades 20, 56, 84, 88, 154 e 156 agrupadas em retângulos.

Padrão B: Quantidade total dividida em subgrupos menores, estimulando o participante a realizar multiplicação e adição, como ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Quantidades dispostas no padrão B

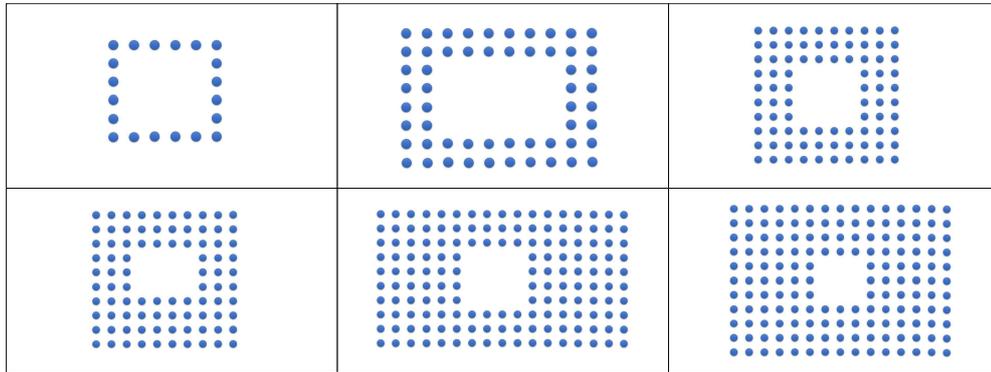


Fonte: Autor

Legenda: Quantidades 20, 56, 84, 88, 154 e 156 divididas em subgrupos retangulares.

Padrão C: Quantidades agrupadas em retângulos com a inclusão de uma região vazia no centro do grupo, estimulando o participante a realizar multiplicação e subtração, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Quantidades dispostas no padrão C



Fonte: Autor

Legenda: Quantidades 20, 56, 84, 88, 154 e 156 agrupadas em retângulos com região vazia no centro.

4.1.2.2 *Estímulo visual*

Os objetos utilizados para contagem foram dispostos em um fundo branco, que conforme especificações técnicas do equipamento, aumentam a acurácia do sistema de iluminação em cerca de 25% caso haja oscilação de luminosidade (TOBII TECHNOLOGY, 2013). Os objetos para contagem foram círculos azuis com diâmetros pequenos, entre 5 e 10 milímetros, que facilitam a percepção do foco das fixações do participante, evitando as associações por visão periférica. E a cor dos círculos eram homogêneas para não criar nenhuma região de destaque que chamasse a atenção do participante.

4.1.2.3 *Condução do teste*

O teste começa com uma tela de instruções que orienta de forma clara as tarefas do participante, em seguida é apresentado uma tarefa prévia com um exemplo aleatório da tarefa com o intuito de perceber se o participante entendeu as regras durante a instrução. Nesta etapa ainda não é feito nenhuma medição, permitindo intervenções do aplicador do teste se necessário. Após a leitura das regras e o teste de compreensão das mesmas que o teste é liberado pelo aplicador do teste. O tempo para resolução da tarefa é livre, mas é enfatizado nas instruções que o tempo de resposta é utilizado como critério de desempenho e que a contagem deverá ser feita o mais rapidamente possível.

Após a etapa de instrução, o participante recebe uma sequência de 18 tarefas, distribuídas de forma aleatória para não o induzir a nenhum valor. Em cada tarefa, o participante deve contar a quantidade de círculos azuis na tela, informar em voz alta a sua resposta e em seguida

apertar qualquer tecla do teclado para iniciar a próxima tarefa. Entre uma tarefa e outra existe a etapa de transição, onde é inserido uma tela com fundo branco com duração de 1 segundo para dispersar o foco ocular da última tarefa e não viciar um ponto de fixação inicial.

4.1.3 Aquisição do sinal

A aquisição do sinal foi feita em uma sala fechada, com iluminação artificialmente controlada dentro das especificações ideais entre 300 e 1000lux e posicionada fora do campo visual do participante. Para aquisição do sinal foi utilizando um equipamento de rastreamento ocular, da marca Tobii, modelo TX300 com capacidade de captura de dados de 300 Hz, um teclado comum padrão ABNT e um notebook com processador core i7 e 16Gb de RAM, sistema operacional Windows 7 e um software de apoio para a calibração do equipamento e mineração dos dados coletados. O equipamento de rastreamento ocular utilizado é composto por um monitor TFT de 23 polegadas com sistema de iluminação infravermelho e 2 câmeras de captura acopladas na parte inferior. A Figura 35 mostra o equipamento.

Figura 35 – Equipamento de rastreamento ocular - Tobii Pro TX300.

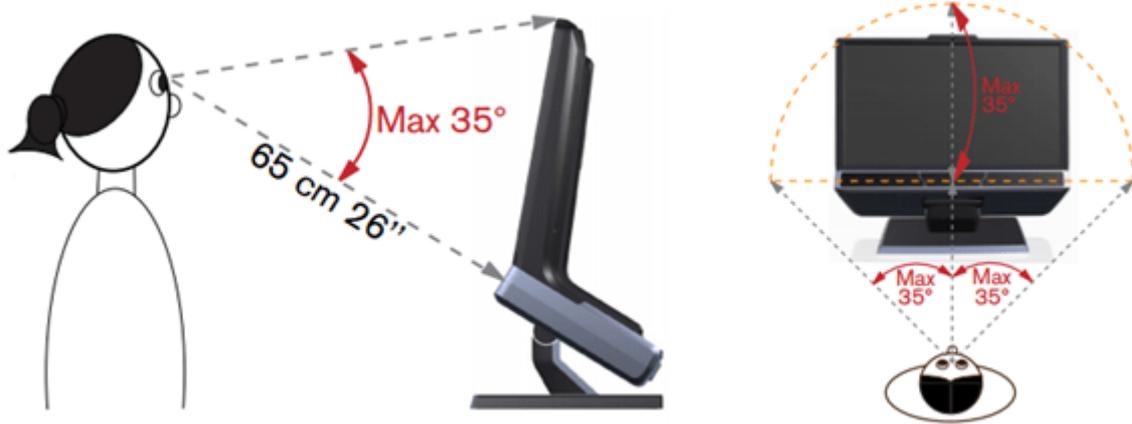


Fonte: site Tobii, 2017

Antes de iniciar o experimento, todos participantes são acomodados em frente ao equipamento de rastreamento ocular e orientados a olhar apenas para a tela a sua frente, evitando fechar os olhos ou fazer movimentos bruscos com a cabeça para não perder o sinal. Com o auxílio do software aplicativo **Tobii Studio**, o equipamento é calibrado a cada coleta, ajustando

a posição do participante dentro do alcance do equipamento (como mostrado na Figura 36) e ajustando o foco da fixação ocular através de uma grade de calibração.

Figura 36 – Parâmetros de alcance do equipamento.



Fonte: site Tobii, 2017

Legenda: A distância ideal entre o indivíduo e o equipamento é de aproximadamente 65 cm e o ângulo máximo em relação ao centro da tela é de 35°.

4.1.4 Processamento dos sinais

Os dados coletados foram armazenados pelo software **Tobii Studio** e posteriormente tratados e processados em duas partes. A parte dos dados referente aos movimentos oculares externos (fixação e sacada) foram tratados e processados pelo próprio Tobii Studio; E a parte dos dados referente aos movimentos oculares internos, de dilatação e constrição pupilar, foram exportados em um arquivo de texto no formato “**TSV**” (*tab separated values*) e tratados e processados na plataforma **R Statistics**.

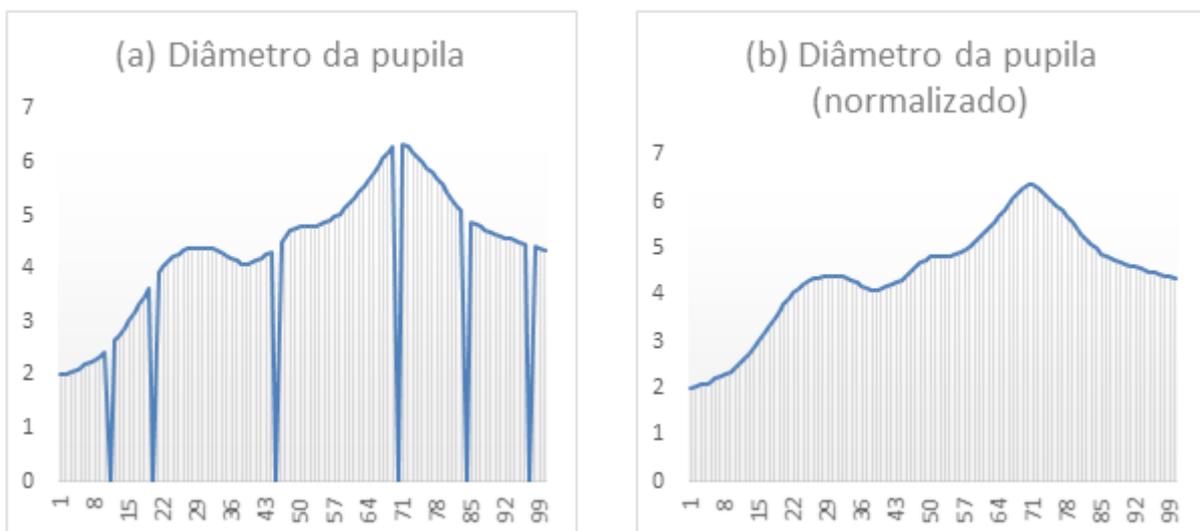
Com os dados de rastreamento ocular foram gerados mapas de atenção visual, que são formados através de um algoritmo que detecta as fixações medindo o tempo de inércia de movimento ocular em determinados locais. Para isso, este algoritmo precisa de dois parâmetros, o tamanho da área de dispersão e o tempo de inércia de movimento ocular. Neste experimento a área de dispersão foi ajustada em **40 pixels** e o tempo de inércia de movimento ocular ajustado em **60ms**, o que significa que para ser contabilizado 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 foram gerados com técnicas de mapa de calor, onde 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 25 pixels, resulta em uma matriz de 384x216 pontos, onde cada ponto representa uma área de 25 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, onde uma fixação de 2000ms será 20 vezes maior que uma fixação de 100ms. O mapa de calor gerado nesta etapa foi ponderado pelo número de fixações sobrepondo as matrizes de todos os participantes em um único mapa.

Outra parte dos dados foram exportados para o R Statistics para análise de informação estatística. Os dados do diâmetro da pupila são variáveis contínuas no tempo e o objetivo das pesquisas em ciências cognitivas é avaliar as flutuações desta variável em função de tarefas temporizadas, onde o indivíduo recebe um estímulo durante um intervalo de tempo que geram as reações pupilares. Inicialmente é necessário tratar os dados coletados, pois além de ocorrer perdas de sinal durante a gravação, o tamanho da pupila esquerda e direita nem sempre são simetricamente iguais, então o primeiro passo nesta etapa foi calcular a média aritmética das pupilas quadro a quadro, gerando um vetor com a média do diâmetro das pupilas. Em seguida, devido ao fato de haver perdas de sinal toda vez que o indivíduo pisca o olho, é necessário fazer a normalização do sinal ou poda do intervalo. Como podemos ver no exemplo da Figura 37, toda vez que o sinal é perdido, momentaneamente o valor do sinal passa a ser zero, com isso para analisar o sinal no domínio do tempo é necessário normaliza-lo através de uma interpolação linear.

Figura 37 – Normalização do diâmetro da pupila.



Fonte: Autor

Legenda: O diagrama (a) mostra um exemplo característico do sinal da pupila coletado durante o experimento e o diagrama (b) mostra o mesmo sinal normalizado.

A interpolação linear utilizada nessa etapa leva em consideração a média ponderada com pesos inversamente proporcionais à distância entre as amostras perdidas (OLSEN, 2012), dada pela Equação (1):

$$V_i = V_a \cdot \left(1 - \frac{P_i - P_a}{P_p - P_a}\right) + V_p \cdot \left(1 - \frac{P_p - P_i}{P_p - P_a}\right), \quad (1)$$

onde V_i é o valor da amostra ausente no vetor, V_a é o valor da amostra imediatamente anterior aos pontos ausentes, V_p é o valor da amostra imediatamente posterior aos pontos ausentes, P_i é a posição da amostra V_i no vetor, P_a é a posição da amostra V_a no vetor e P_p é a posição da amostra V_p no vetor.

Como o objetivo da aplicação da interpolação linear é corrigir a perda de sinal devido ao piscar de olhos e sabendo que o olho humano leva de 50 a 100ms a cada piscada (ALEXANDRIDIS; TELGER, 1985), para não criar valores irreais a interpolação linear só é realizada em intervalos de perda de sinal inferiores a 100ms, totalizando intervalos máximos de 30 amostras com a aquisição em 300Hz.

Por outro lado, quando a análise do sinal não é feita no domínio do tempo, requerendo dados apenas para calcular a média, a variância e o desvio padrão, é recomendado que não seja feita a interpolação linear para não criar dados artificiais que possam mascarar o sinal coletado. Neste caso é recomendado fazer a poda do intervalo sem sinal, pois a média, a variância e o desvio padrão levam em consideração apenas os valores dos termos pela quantidade dos termos, não apresentando diferença se a quantidade de amostras for aumentada pelo preenchimento dos intervalos de perda de sinal.

Após as etapas de pré-processamento, os dados foram manipulados conforme os objetivos do experimento, organizados em três etapas: análise da variância pupilar, classificação de desempenho e predição de desempenho.

4.1.4.1 Variância pupilar

O cálculo da variância do diâmetro da pupila foi realizado baseado na variância da população de amostras de cada tarefa (PINHEIRO, 2009), calculando o coeficiente de variação através da média do quadrado dos desvios (σ^2), que é dada pela Equação (2):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2, \quad (2)$$

onde N é a quantidade de amostras, y_i o valor de cada amostra i e μ a média global das amostras.

A partir do cálculo da variância, foi gerado um vetor com os coeficientes de variação do diâmetro pupilar em cada tarefa, compondo um conjunto de 18 coeficientes que descrevem o desempenho de cada participante. No entanto, avaliar o desempenho individualmente não é estatisticamente relevante, então os coeficientes foram agrupados e ordenados de acordo com a complexidade das tarefas, compondo uma matriz de dados com 33 linhas (participantes) e 18 colunas (coeficientes da variância), permitindo a análise da variação pupilar.

4.1.4.2 *Classificação de desempenho*

O desempenho dos participantes foi classificado levando em consideração a quantidade de respostas certas, o tempo de cada participante dentro do universo de tarefas e o tempo médio de todos os participantes. O critério utilizado para classificação foi uma adaptação da equação proposta por (VOLKE et al., 2002), dada pela Equação (3):

$$H = \left(N_{correct} - \frac{N}{2} \right) \cdot \frac{RT_m}{RT_s}, \quad (3)$$

onde H é o índice de desempenho, $N_{correct}$ o número de acertos, N o número de tarefas, RT_m o tempo médio de todos os participantes e RT_s o tempo de reação do indivíduo.

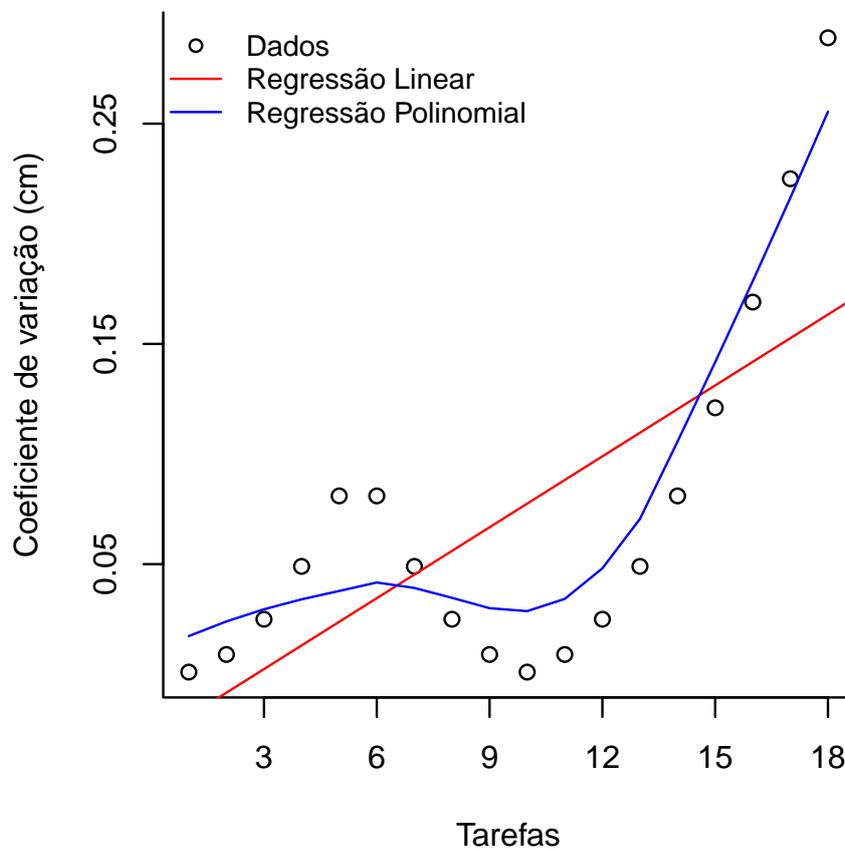
Desta forma, partindo da ideia de que os participantes que apresentassem alto índice de variação pupilar, conseqüentemente teriam tido maior dificuldade para resolver as atividades cognitivas, foram geradas duas listas de classificação, uma com todos os participantes ordenados pela Equação (3), e outra com os participantes agrupados por quartil, de modo que fosse possível comparar a variação pupilar entre cada quartil. A partir do agrupamento por quartil, foi gerado quatro grupos de indivíduos com desempenho distintos, proporcionando um conjunto de dados segmentado para a etapa de predição.

4.1.4.3 *Predição de desempenho*

Segundo (DEMÉTRIO; ZOCCHI, 2006), umas das formas de prever um evento estatisticamente é realizar uma regressão de dados passados, afim de modelar linhas de tendência para eventos futuros, ou seja, indicar um alvo para onde os dados tendem a regredir. Assim, a predição de eventos futuros se dá pela estimativa de que a maior parte dos dados se aproxime dos parâmetros de tendência indicada pela regressão, possibilitando inferência estatística sobre as hipóteses testadas.

Desta forma, com o objetivo de prever o desempenho de indivíduos em tarefas cognitivas, foi aplicado um modelo de regressão linear, que estima um limite contínuo baseado no cálculo dos mínimos quadrados das variáveis independentes. Entretanto, após observar a dispersão dos dados, foi observado que as linhas de tendência poderiam ser melhores ajustadas se fosse aplicada uma regressão polinomial, que parte dos mesmos princípios da regressão linear, mas que realiza ponderações locais para ajustar a linha de tendência conforme o comportamento dos dados, como mostra o exemplo da Figura 38.

Figura 38 – Ajuste da linha de tendência.



Fonte: Autor

Legenda: A imagem mostra como a regressão linear pode ser ajustada se for ponderada localmente.

Logo, se olharmos a regressão polinomial como uma generalização da regressão linear simples, igualando-a a uma regressão polinomial de grau um, podemos ao invés de usar a equação da regressão linear, dada pela Equação (4), utilizar a equação da regressão polinomial, dada pela Equação (5), que é baseada na regressão ponderada localmente proposta por Cleveland (1979):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i \quad (4)$$

Onde:

- a) Y representa o eixo das ordenadas e X representa o eixo das abscissas;
- b) β_0 é o ponto de intersecção entre a reta de regressão e o eixo Y, onde $X=0$;
- c) β_1 é o coeficiente angular da reta;
- d) ϵ é o erro, que é dado pela variância de Y, onde $Var(Y_i) = \sigma^2$;
- e) i é índice de par ordenado (X,Y).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \dots + \beta_k X_i^k + \epsilon_i \quad (5)$$

Onde as variáveis acrescidas:

- a) $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ são os coeficientes angulares da regressão curvilínea;
- b) k é o grau do polinômio.

Ao aplicar a regressão polinomial é possível ajustar a linha de tendência da regressão linear através de um procedimento de suavização multivariante, ajustando a função localmente de acordo com os valores das variáveis independentes (CLEVELAND; DEVLIN, 1988).

Então, a partir de cada vetor descritor de desempenho, foi gerada uma linha de tendência, concluindo a etapa de processamento de dados deste experimento preliminar.

Adicionalmente, todos os algoritmos utilizados para análise estatística dos dados descritos nas etapas de processamento de sinais, são fornecidos como uma caixa de ferramentas em um repositório público (<https://github.com/RafaelOrsi/Pupil>).

4.2 RESULTADOS

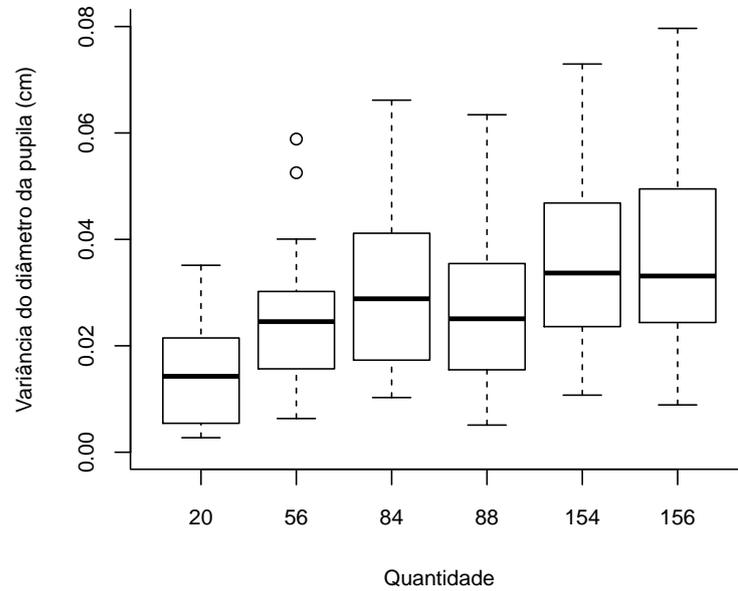
Com a proposta de investigar a relação entre a dilatação da pupila e esforço mental empregado na solução de tarefas, a análise dos dados apresentadas a seguir foram baseadas na dilatação da pupila e desempenho de cada participante em cada tarefa.

A primeira hipótese levantada por este trabalho, sustentada por Hess e Polt (1960) e reafirmada por Ahern e Beatty (1979), de que a pupila apresenta aumento na dilatação quando indivíduos realizam tarefas de multiplicação e que o grau de dilatação é acentuado em multiplicações entre números com mais de um algarismo, foi constatada.

Ao verificar a variância média da dilatação da pupila de cada participante por tarefa, foi possível ver o aumento no grau de dilatação pupilar conforme aumentavam os valores das

operações de multiplicação. As Figuras 39 e 40 apresentam gráficos de caixa “boxplot” da variância pupilar por quantidade.

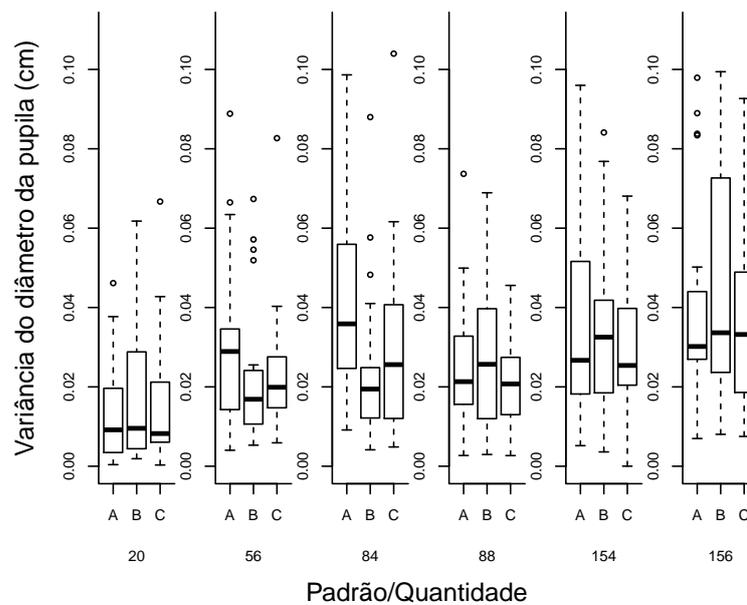
Figura 39 – Variância por quantidade.



Fonte: Autor

Legenda: Cada caixa do gráfico representa o agrupamento da variância pupilar de todos os participantes por tarefa, expressa pela quantidade de objetos a ser contabilizado.

Figura 40 – Variância por quantidade (desagrupado).

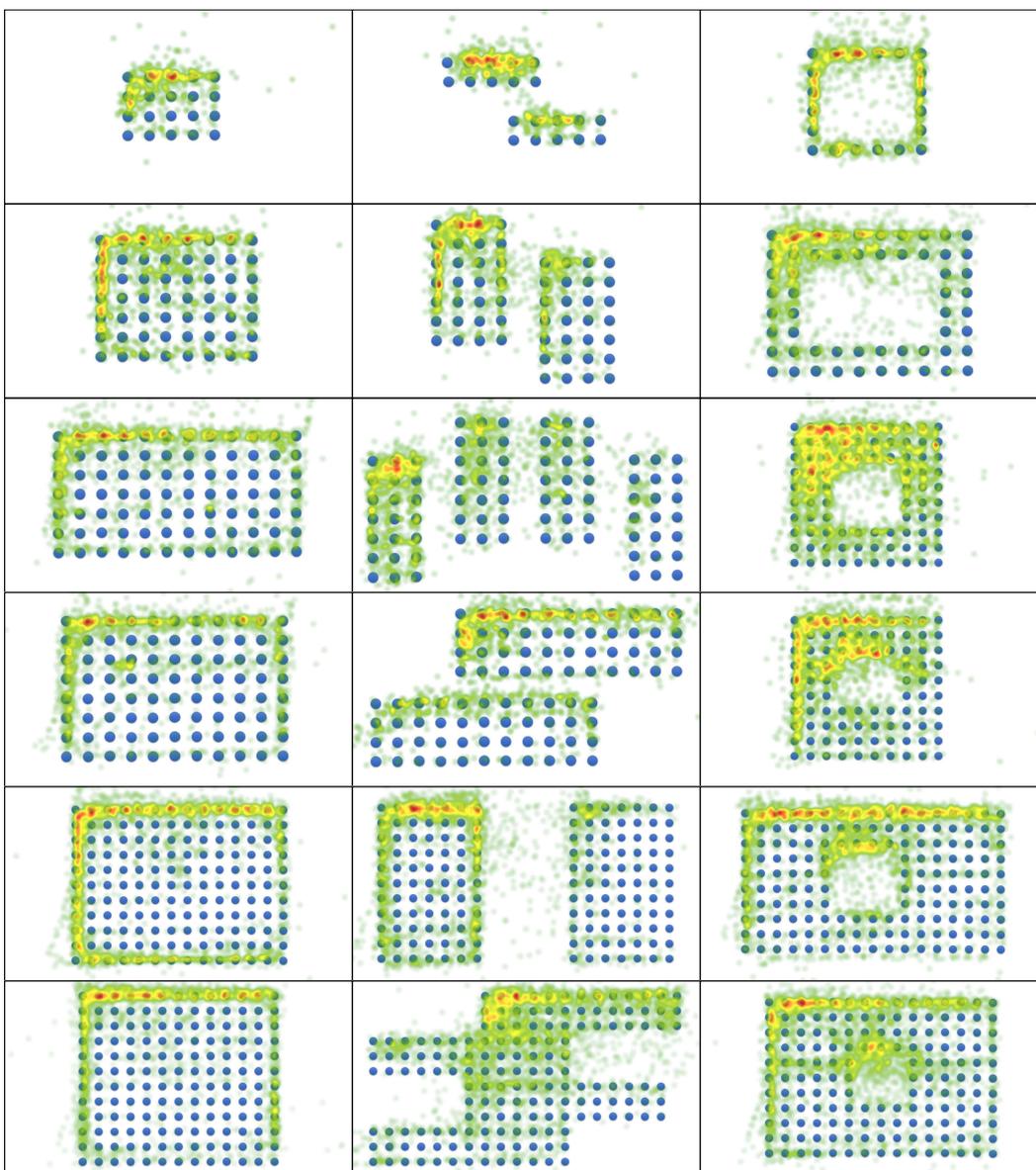


Fonte: Autor

Legenda: Este gráfico apresenta os dados da figura 39 desagrupados, ilustrando também os padrões A, B e C que compõem cada conjunto de quantidade.

A análise dos dados apurados foi pautada na condição do uso de operações aritméticas como ferramenta para solução das tarefas cognitivas e a evidência de que os participantes utilizaram operações de multiplicação pode ser observado nos padrões de reconhecimento visual em cada tarefa, conforme Figura 41.

Figura 41 – Mapa de calor por quantidade de fixação.



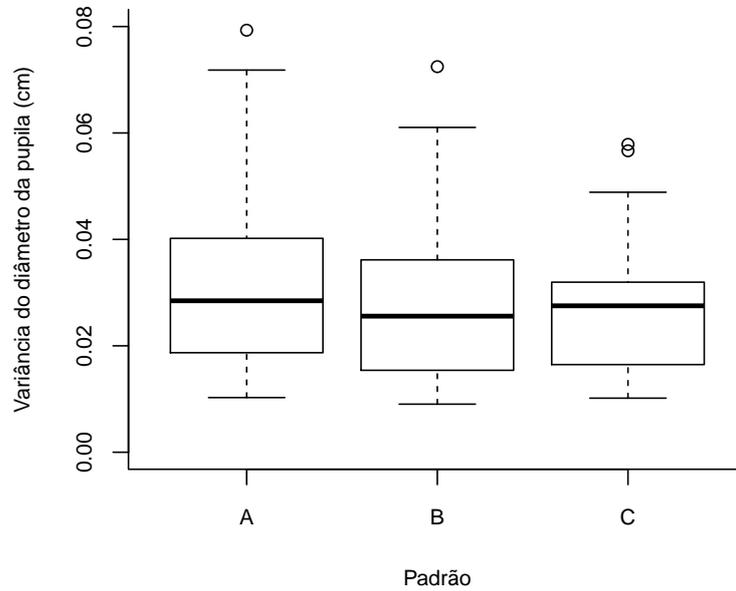
Fonte: Autor

Legenda: As regiões coloridas destacam as quantidades de fixações em uma graduação de cores que vai do vermelho (maior quantidade de fixações) ao verde (mínimo de uma fixação).

A segunda hipótese que investiga se há alteração na dilatação da pupila em tarefas de contagem com padrões distintos para mesma quantidade se mostrou pouco relevante. Como pode-se ver nas Figuras 42 e 43, a média de variância do diâmetro da pupila por padrão apre-

senda bastante similaridade entre os padrões, o que indica que a diferença entre os padrões não foi um fator de impacto na carga de esforço mental.

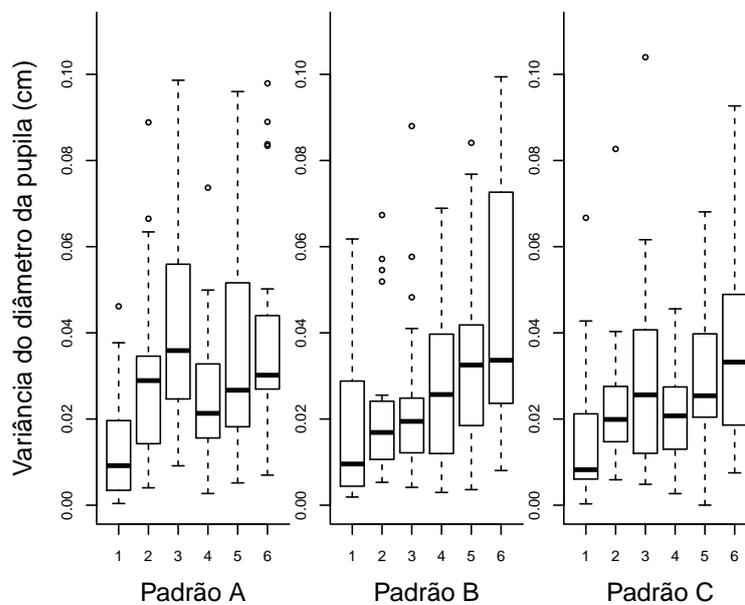
Figura 42 – Variância do diâmetro da pupila por padrão.



Fonte: Autor

Legenda: Cada caixa do gráfico representa o agrupamento da variância pupilar de todos os participantes por padrão de tarefa, incluindo todas as quantidades do mesmo padrão.

Figura 43 – Variância do diâmetro da pupila por padrão (desagrupado).



Fonte: Autor

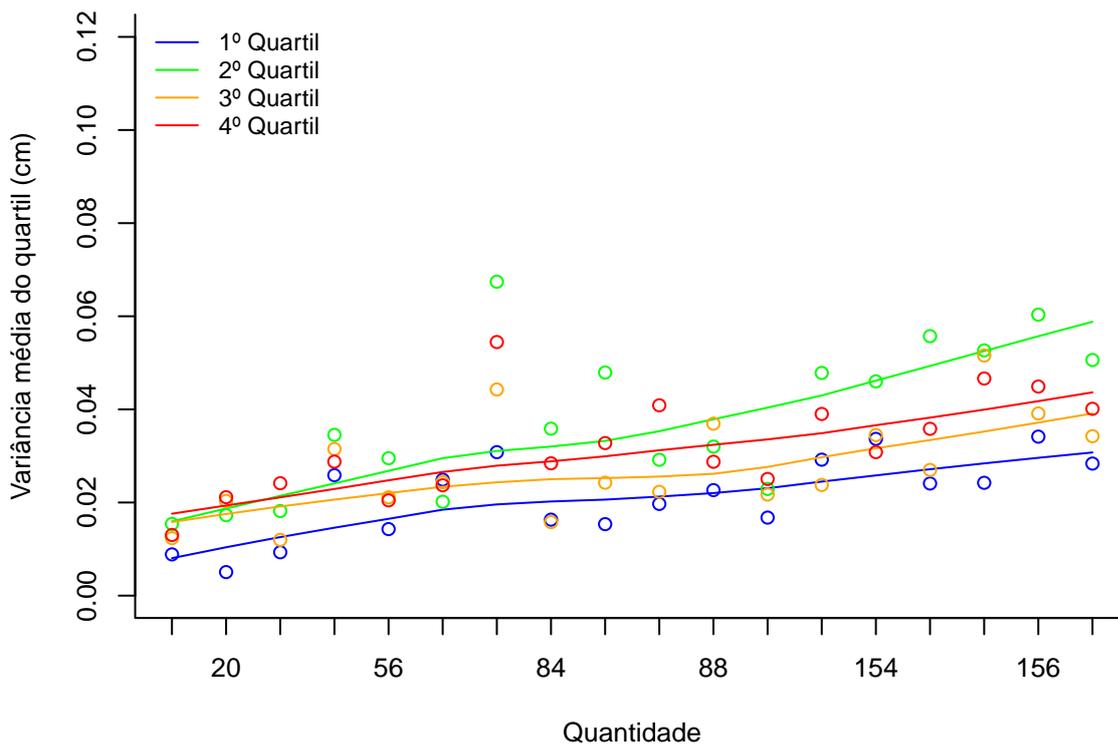
Legenda: Este gráfico apresenta os dados da Figura 42 desagrupados, ilustrando também as quantidades (1)20, (2)56, (3)84, (4)88, (5)154 e (6)156 que compõem cada conjunto de padrão.

Ao desagrupar os padrões por tarefa, representados no gráfico da Figura 43, pode-se observar que em ambos os padrões, a tendência de crescimento da variância do diâmetro da pupila está fortemente relacionada apenas com a quantidade, o que reforça a primeira hipótese, indicando a quantidade como fator de impacto de esforço mental.

Adicionalmente, após classificar os participantes por desempenho, a população foi dividida em quartis, sendo o 1º quartil o grupo de participantes com melhor desempenho e o 4º quartil o grupo de participantes com pior desempenho.

Em seguida, com o objetivo de prever o desempenho de futuros participantes do experimento, foram aplicadas técnicas de regressão polinomial para modelar as linhas de tendência de cada quartil e então estimar o desempenho de cada participante. A Figura 44 apresenta as linhas de tendência de cada quartil.

Figura 44 – Estimativa de desempenho por quartil.



Fonte: Autor

Legenda: O gráfico apresenta as linhas de tendência de cada quartil modeladas a partir de uma regressão polinomial ponderada localmente.

Inicialmente, não foi calculado um intervalo de confiança, pois era esperado que as linhas de tendência de cada quartil fossem linearmente separáveis, possibilitando criar níveis de desempenho, de forma que o limite superior de cada nível fosse consequentemente o limite inferior do nível seguinte. No entanto, após analisar as linhas de tendência, foi possível perceber

que em dado momento a linha de desempenho do 2º quartil superou as linhas de desempenho do 3º e 4º quartil, indicando uma dispersão distinta da esperada.

Ao observarmos as linhas de tendência do 1º, 3º e 4º quartil, é possível ver que existe uma coerência entre os níveis de desempenho de cada quartil e a estimativa modelada, inclusive indicando uma boa correlação com os estudos de Józsa (2010), que relaciona o grau de dilatação da pupila como o nível de dificuldade do indivíduo ao realizar uma tarefa cognitiva, indicando que quanto maior a facilidade em realizar a tarefa, menor é a dilatação da pupila e quanto maior a dificuldade, maior a dilatação da pupila.

No entanto, ao observarmos a estimativa do 2º quartil, pelo princípio de que quanto maior a variância pupilar, maior a dificuldade, a leitura que se faz é de que foi o grupo com pior desempenho, contradizendo o desempenho real. Desta forma, invalidando momentaneamente o modelo de predição proposto.

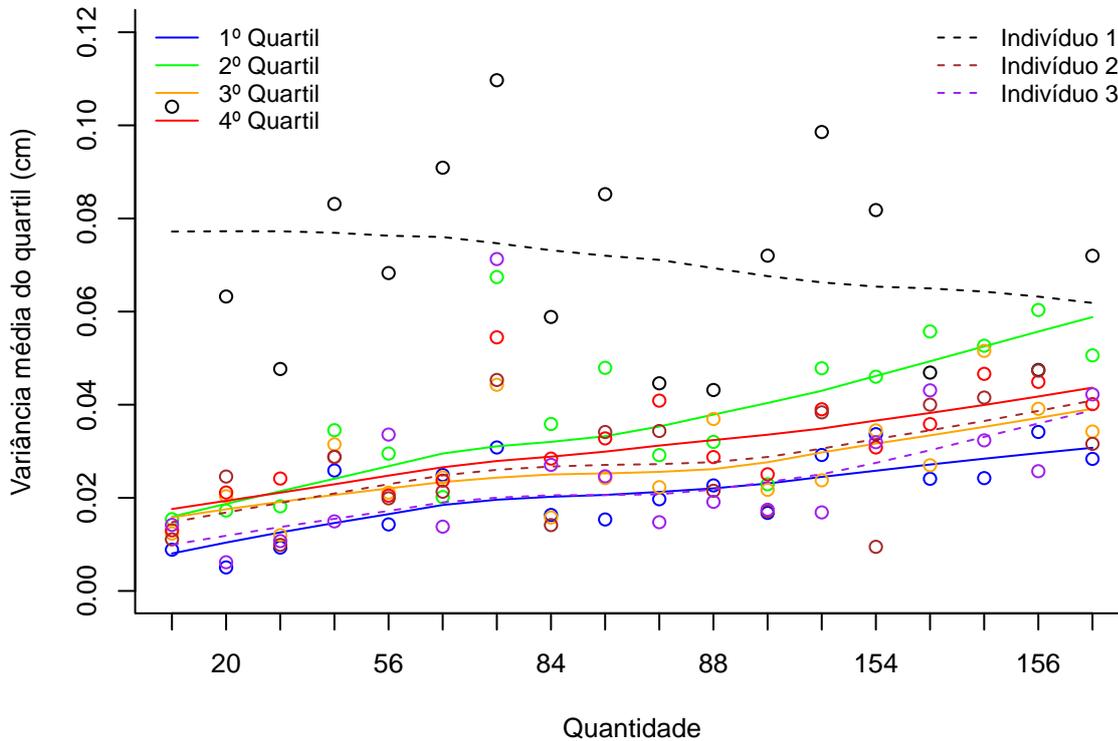
Contudo, o comportamento do 2º quartil levantou algumas suspeitas em relação aos pontos fracos do experimento, indicando algumas hipóteses que justifiquem as dificuldades encontradas.

a) A primeira hipótese é de que a quantidade de participantes, cerca de 8 indivíduos por quartil, foi muito pequena e não representativa para este estudo, impossibilitando a realização de inferências estatísticas.

b) A segunda e mais provável hipótese é de que o critério de **tempo livre** adotado na construção do experimento interferiu diretamente no índice de variância da pupila, pois mesmo com a instrução de que o teste deveria ser respondido o mais rápido possível, a diferença de tempo entre um indivíduo e outro foi consideravelmente grande, chegando a uma relação de tempo de até 8 vezes maior entre o indivíduo que fez em maior tempo (1458 seg) e o indivíduo que fez em menor tempo (170 seg). Desta forma, possibilitando que o indivíduo que fez em maior tempo tenha tido maior chance de apresentar alto índice de variação pupilar, mesmo que não fosse pelo estímulo do experimento, mas por qualquer outro evento externo.

Embora uma pré-análise das linhas de tendência ter apresentado algumas incoerências, afim de testar sua capacidade de inferência estatística, foi realizado a coleta de dados de mais 3 indivíduos, para fazer a prova real. Desta forma, para tentar prever o desempenho dos indivíduos, foram plotados seus respectivos índices de variação pupilar no mesmo gráfico das linhas de tendência, como podemos ver na Figura 45.

Figura 45 – Estimativa de desempenho por quartil (prova real).



Fonte: Autor

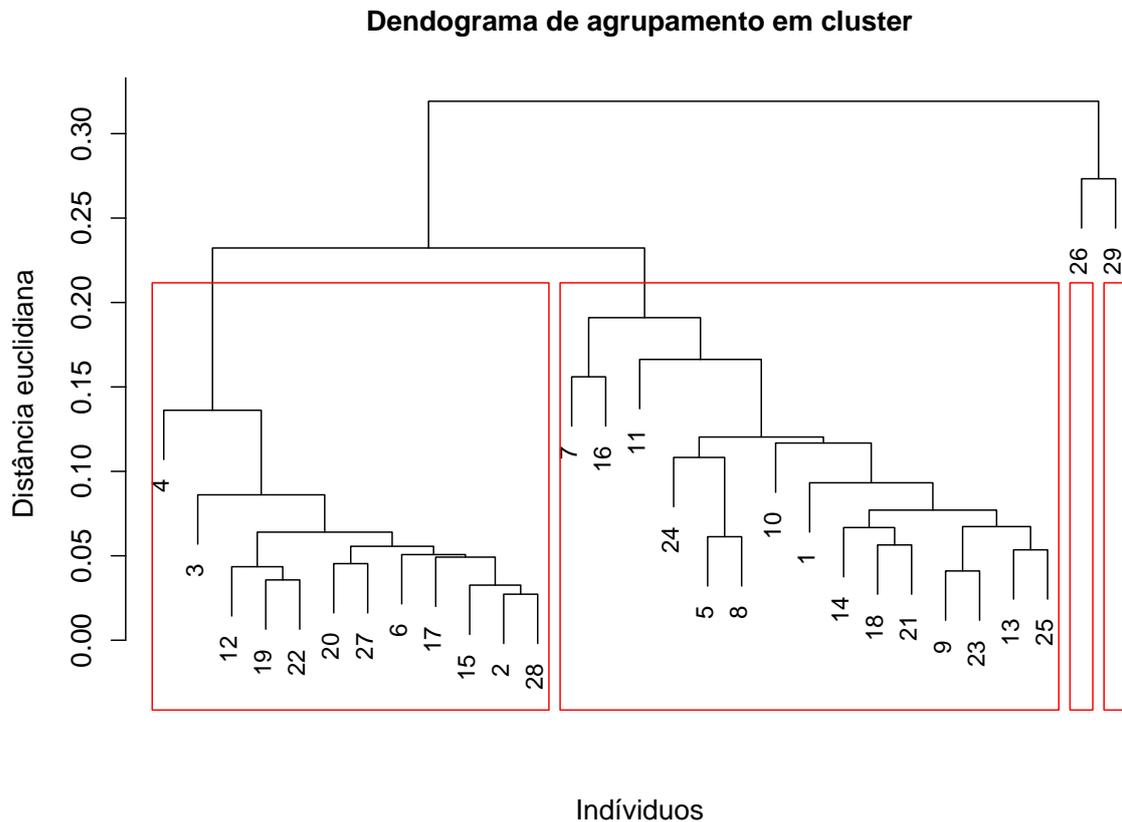
Legenda: As linhas tracejadas indicam o desempenho dos 3 indivíduos dentro do modelo de predição.

Ao inspecionar o resultado da prova real de forma visual, sem calcular o intervalo de confiança das linhas de desempenho, podemos perceber que o **indivíduo 1** apresentou variações muito acima de qualquer linha de desempenho, impossibilitando qualquer estimativa. Já o **indivíduo 2** e o **indivíduo 3** mostraram boa correlação com as linhas de desempenho do 3º e 1º quartil respectivamente indicando que boa parte dos dados, ou a maior parte dos dados, estariam dentro dos intervalos de confiança. No entanto, ao comparar esta avaliação visual com os resultados reais, o modelo proposto fracassou novamente, pois os indivíduos 1, 2 e 3 foram classificados no 1º, 2º e 4º quartis respectivamente e indicaram comportamento completamente contrários as linhas de tendência modelada.

Com o intuito de esgotar as possibilidades de separação e classificação dos indivíduos por similaridade, foi aplicado uma técnica de mineração de dados que realiza o agrupamento dos indivíduos em clusters. O método de clusterização utilizado foi o K-means de (HARTIGAN; WONG, 1979) e a ferramenta utilizada foi a plataforma R Statistics. Foram dimensionados quatro clusters, respectivos aos quatro quartis do classificador de desempenho e os dados de entrada foram os coeficientes de variância dos mesmos 30 indivíduos utilizados para gerar o modelo de predição anterior. O resultado da clusterização apresentou quatro grupos desproporcionais, que

embora divididos em quatro agrupamentos, indicaram que a maioria dos indivíduos estão próximos dos mesmos centroides, praticamente eliminando 2 grupos. A Figura 46 apresenta o dendograma da clusterização.

Figura 46 – Dendograma de agrupamento em cluster.



Fonte: Autor

Legenda: Os quadros em vermelhos mostram o agrupamento em cluster dos indivíduos por similaridade.

Como visto na Figura 46, a técnica de agrupamento em cluster não apresentou bons resultados, não permitindo uma separação clara entre os níveis de desempenho dos indivíduos.

4.3 DISCUSSÃO

Com base nos resultados adquiridos, a hipótese de que a quantidade de participantes foi muito pequena pode ser minimizada pelo fato de que também não foi possível separar os indivíduos com técnicas de agrupamento, o que indica que o fator que dificultou a predição de desempenho não foi necessariamente a pequena quantidade de indivíduos de cada quartil. Por outro lado, se avaliar de forma estatística a probabilidade de um indivíduo apresentar um grau maior de variação pupilar conforme o tempo de exposição a estímulos cognitivos, pode-se dizer que quanto maior o tempo de exposição, maiores as chances da pupila variar, o que reforça a

hipótese de que a limitação do tempo é um fator preponderante para obter êxito em pesquisas envolvendo sinais pupilares.

Embora não tenha obtido êxito na tentativa de prever desempenho através de sinais pupilares, este experimento mostrou através da análise de variância que o esforço mental empregado em atividades cognitivas está intrinsecamente relacionado com a variância pupilar, de modo que quanto mais complexas eram as tarefas cognitivas, maiores eram as variações pupilares observadas.

5 EXPERIMENTO SUBSEQUENTE (MÉMORIA E ADIÇÃO)

A partir dos resultados alcançados no experimento preliminar, foi elaborado um novo experimento, com uma abordagem diferente, mas que leva em consideração as experiências adquiridas para formatar um novo protocolo experimental.

O experimento descrito neste capítulo, além de basear-se no experimento preliminar, também baseou-se em um teste cognitivo previamente testado, conhecido como **adicone 1**, proposto por (KAHNEMAN; BEATTY, 1966). O teste **adicone 1** é composto por tarefas de memorização e operações aritméticas, que supostamente podem estimular a dilatação pupilar em cerca de 50% do seu tamanho original em apenas 5 segundos.

Para efeito de comparação, a Tabela 2 apresenta um resumo com as principais características de cada experimento.

Tabela 2 – Características dos experimentos

| | Experimento preliminar | Experimento subsequente |
|---------------------------------|--|---|
| Tarefa cognitiva | Contagem de pontos | Memorização e reprodução de sequências numéricas condicionadas a critério de transformação |
| Operações avaliadas | Padrões de contagem e subsequentes operações aritméticas (multiplicação, adição e subtração) | Capacidade de memorização e subsequentes operações aritmética (adição e subtração) |
| Participantes | Total: 33 participantes <i>30 + 10% para teste de predição</i> | Total: <i>55 participantes 50 + 10% para teste de predição</i> |
| Perfil dos participantes | Não há critérios | Possuir conhecimentos básicos em aritmética e não apresentar deficiência visual não corrigida |
| Tempo do teste | Livre | 22 segundos por tarefa |
| Equipamento utilizado | Tobii Pro TX300 | Tobii Pro TX300 |
| Softwares utilizados | Tobii Studio e R Statistics | Tobii Studio, R Statistics e Matlab |
| Etapas do experimento | Aquisição do sinal | Aquisição do sinal |
| | Pré-processamento | Pré-processamento |
| | Processamento | Processamento |
| | Classificação | Classificação |

Fonte: Autor

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o conjunto de materiais e métodos utilizados na realização do experimento (subsequente) **adicione 1** e esta dividido em cinco subseções: protocolo experimental; participantes; tarefa e estímulos; pré-processamento; e extração de característica e classificação.

5.1.1 Protocolo experimental

Nesta dissertação, as principais características do teste **adicione 1** foram mantidas, mas no planejamento do experimento foi levado em consideração a evolução e robustez dos atuais equipamentos para aquisição de sinal pupilar, que especificamente neste experimento projetou a possibilidade de explorar outros aspectos, como a mensuração da capacidade cognitiva relativa a variação do sinal pupilar e a classificação de desempenho de indivíduos em tarefas cognitivas.

5.1.1.1 *Experimento original*

No experimento proposto por (KAHNEMAN; BEATTY, 1966), os participantes recebiam uma pilha de cartões com sequências numéricas, cujo objetivo era memorizar as sequências e em seguida reproduzir novas sequências adicionando 1 a cada algarismo da sequência.

Os participantes eram orientados a realizar as tarefas em 3 etapas consecutivas: 1) memorizar a sequência numérica; 2) reproduzir em voz alta a sequência memorizada; e 3) reproduzir em voz alta uma nova sequência adicionando 1 a cada algarismo da sequência original.

A etapa 1 compreende a fase de codificação, onde o participante recebe o estímulo visual e memoriza os números. As etapas 2 e 3 compreendem a fase de decodificação, onde o participante precisa verbalizar a sequência numérica memorizada e em seguida verbalizar uma nova sequência.

Kahneman e Beatty (KAHNEMAN; BEATTY, 1966) também testaram outras variações da tarefa **adicione 1**, aumentando o valor das adições e a quantidade de números em cada sequência, variando a quantidade na fase de codificação entre 2 e 7 algarismos. Os melhores resultados foram obtidos com sequências de 4 dígitos, pois sequências menores eram muito fáceis de serem memorizadas e sequências maiores muito difíceis, fazendo com que os participantes desistissem da tarefa sem contribuir com o objetivo do experimento. Então, a partir das sequências de 4 dígitos, também foram testados os valores de adição, formulando o teste **adicione 1** como a tarefa mais fácil e o teste **adicione 3** como a tarefa mais difícil.

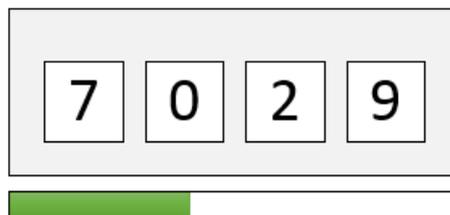
O teste **adicione 3** é uma variação do teste **adicione 1** e possui as mesmas regras, mas como o próprio nome diz, deve ser adicionado 3 em cada algarismo da sequência original.

5.1.1.2 *Modelo adaptado*

No modelo aplicado nesta dissertação cada participante recebe uma série de cartões com sequencias numéricas que são apresentadas na tela do equipamento de captura de sinal pupilar, permitindo que os participantes realizem as mesmas 3 etapas descritas no experimento original, mas dividindo as tarefas em 2 grupos, um grupo com 5 cartões destinados a tarefa de **adicione 1** e outro grupo com 5 cartões destinados a tarefa de **adicione 3**.

Cada cartão representa uma tarefa e cada tarefa tem um tempo fixo de 22 segundos, sendo 2 segundos para a codificação (etapa 1) e 20 segundos para decodificação (etapas 2 e 3), totalizando 3 minutos e 40 segundos de teste. Caso o participante exceda os 20 segundos da fase de decodificação para verbalizar a resposta, a pontuação da tarefa será zerada e a aplicação dará continuidade no experimento, seguindo para a próxima tarefa. A Figura 47 mostra um exemplo de cartão apresentado na tela do equipamento.

Figura 47 – Exemplo de cartão com sequência numérica.



Fonte: Autor

Legenda: Logo abaixo da sequência numérica, uma barra de progresso indica o curso do tempo de 2 segundos.

Além das 10 tarefas, também tem as etapas anteriores de: calibração do equipamento que leva cerca de 2 minutos para ser realizada; instruções exibidas na tela que leva cerca de 1 minuto para ser lida; teste que simula a tarefa em 22 segundos; e os intervalos entre tarefas que variam entre 2 e 5 segundos. Totalizando um experimento com cerca de 8 minutos de duração.

5.1.1.3 *Organização dos processos*

A partir da análise dos resultados obtidos no experimento preliminar, foi possível perceber pontos de melhoria em alguns processos, que através de readequações podem supostamente gerar resultados mais eficientes.

Deste modo, a formatação deste experimento compreende: a manutenção dos processos que apresentaram bom desenvolvimento; a readequação dos processos que precisam de melhorias e a inclusão de processos que podem contribuir para a qualidade do experimento.

Entre os processos mantidos do experimento preliminar, temos:

- a) Aquisição do sinal;
- b) Pré-processamento do sinal.

Entre os processos readequados, temos:

- a) Ampliação da quantidade de participantes, aumentando de 33 para 55;
- b) Reformulação dos critérios de aplicação do teste, desta vez limitando o tempo do teste, estabelecendo um limite igual para todos os participantes;
- c) Substituição do modelo de predição por regressão polinomial por um modelo de análise estatística multivariada (THOMAZ et al., 2007).

Entre os processos incluídos, temos:

- a) Análise do perfil do voluntário;
- b) Análise da qualidade do sinal.

5.1.1.4 Roteiro de aplicação do experimento

Para assegurar um padrão de aplicação do experimento, bem como evitar a perda de observações (testes com voluntários) devido interferência de variáveis alheias ao experimento e ou falha do aplicador, foi elaborado um roteiro de aplicação com 4 fases.

Fase 1: Instruções e coleta de informações pré-experimento.

- a) **Apresentação do projeto de pesquisa e do experimento proposto:** Nesta etapa é apresentado ao voluntário uma síntese sobre o projeto de pesquisa, apresentando os objetivos da pesquisa, os métodos utilizados, como funciona o equipamento, como será realizado o experimento, a importância do voluntário para a pesquisa e as instruções para realização do experimento;

b) **Coleta do termo de consentimento:** Nesta etapa é coletado o consentimento livre e esclarecido da participação voluntária dos indivíduos em um termo impresso em duas vias, onde uma via é fornecida ao voluntário e a outra é arquivada pelo pesquisador responsável, no laboratório de processamento de imagens do departamento de engenharia elétrica após a finalização do projeto;

c) **Entrevista e aplicação do questionário pré-experimento:** Nesta etapa o aplicador do teste preenche um formulário com informações referentes ao perfil do voluntário.

Fase 2: Preparativos para a coleta de sinal.

a) **Posicionamento do voluntário:** Nesta etapa o voluntário é posicionado em frente ao equipamento para captura de movimentos oculares (Tobii Pro TX300) e com o auxílio do software de apoio **Tobii Studio** é ajustada a sua posição de modo que atenda as necessidades ideais para uma boa coleta de dados, conforme ilustra a Figura 36 apresentada anteriormente na etapa de aquisição de sinal do experimento preliminar. O voluntário é orientado a manter um dedo sobre a tecla que possui função de iniciar as tarefas (tecla espaço) de modo que sua atenção não seja desviada da tela do equipamento;

b) **Calibração:** A calibração do equipamento é realizada com o auxílio do software de apoio **Tobii Studio**, que conduz o indivíduo a realizar uma sequência de movimentos oculares para ajustar os parâmetros de captura de sinal relativo ao sujeito;

c) **Orientações:** Após a calibração, o voluntário é orientado a manter sua atenção apenas para a tela do equipamento e evitar ações que possam gerar perda de sinal ou que interfiram de algum modo na qualidade do sinal coletado, como movimentos bruscos com a cabeça, fechar os olhos, colocar as mãos no rosto e olhar para fora das extremidades da tela.

Fase 3: Aplicação do teste.

a) **Instruções:** O experimento inicia com uma tela de instruções, onde são descritas todas as tarefas do sujeito e como o teste deve ser realizado. Esta etapa tem tempo livre e se necessário o participante pode tirar suas dúvidas com o aplicador;

b) **Avaliação de compreensão:** Após a leitura das instruções, o voluntário é conduzido a um teste de compreensão, onde lhe é exibido uma tarefa prévia com um exemplo aleató-

rio. Nesta etapa ainda não é feita nenhuma medição, permitindo intervenções do aplicador do teste, se necessário.

c) **Início do teste:** O teste foi elaborado de forma sequencial com *slides* de instruções que conduzem o participante durante todo o teste sem a interferência do aplicador. Após iniciada esta etapa a função do aplicador é acompanhar e registrar todas as respostas dos participantes.

Fase 4: Coleta de informações pós-experimento.

a) **Questionário pós-experimento:** Nesta etapa é dada a oportunidade para que o indivíduo fale como se sentiu durante o teste e expresse sua opinião sobre as tarefas propostas. O aplicador do teste registra os relatos de cada participante e finaliza o experimento preenchendo um formulário com informações que descrevem como foi o desenvolvimento do teste.

5.1.2 Participantes

O experimento contou com 59 participantes voluntários, sendo 40 homens e 19 mulheres, com idades entre 16 e 58 anos e idade média de 28 anos. O grupo de participantes foi constituído em maior parte por estudantes da graduação e pós-graduação das áreas de Engenharia, Ciências da Computação, Química e Pedagogia. Todos saudáveis e cognitivamente capazes, não apresentando problemas de visão não corrigido e demonstrando conhecimentos básicos em aritmética.

5.1.2.1 Perfil do participante

Foi incluído neste experimento um instrumento para análise do perfil do participante, que foi realizado por meio de uma entrevista de 3 etapas: sendo a primeira etapa composta por um **questionário pré-experimento** com perguntas sobre o perfil do participante; a segunda etapa composta por uma **avaliação do aplicador do experimento** acerca da validade das respostas e comprometimento do voluntário com o teste; e a terceira etapa composta por um **questionário pós-experimento**, onde o participante relata suas impressões pessoais sobre as tarefas e como se sentiu durante o teste.

Questionário pré-experimento:

- a) Sexo (M) / (F);
- b) Idade _____;
- c) Formação acadêmica _____;
- d) Usa óculos? (SIM) / (NÃO) - Caso sim. Esta usando óculos? (SIM) / (NÃO);
- e) Em quanto tempo fez sua última refeição? _____H_____MIN;
- f) Se sente cansado fisicamente? (SIM) / (NÃO);
- g) Se sente cansado mentalmente? (SIM) / (NÃO);
- h) Fez uso de algum medicamento hoje? (SIM) / (NÃO) - Caso sim. Qual: _____;
- i) É fumante? (SIM) / (NÃO) - Caso sim. Fumou hoje? (SIM) / (NÃO) - Caso sim.
Há quanto tempo? _____H_____MIN.

Observação do aplicador do experimento:

- a) Participante possui conhecimentos básicos em aritmética? (SIM) / (NÃO).

Questionário pós-experimento:

- a) Você classifica a dificuldade do teste como: (FÁCIL), (RAZOÁVEL) ou (DIFÍCIL);
- b) O tempo do teste foi adequado? (SIM) / (NÃO);
- c) Você se sentiu cansado durante o teste? (SIM) / (NÃO);
- d) Comentários e observações do voluntário: _____;
- e) Observações do aplicador: _____;

A análise dos perfis dos participantes é apresentada na seção RESULTADOS.

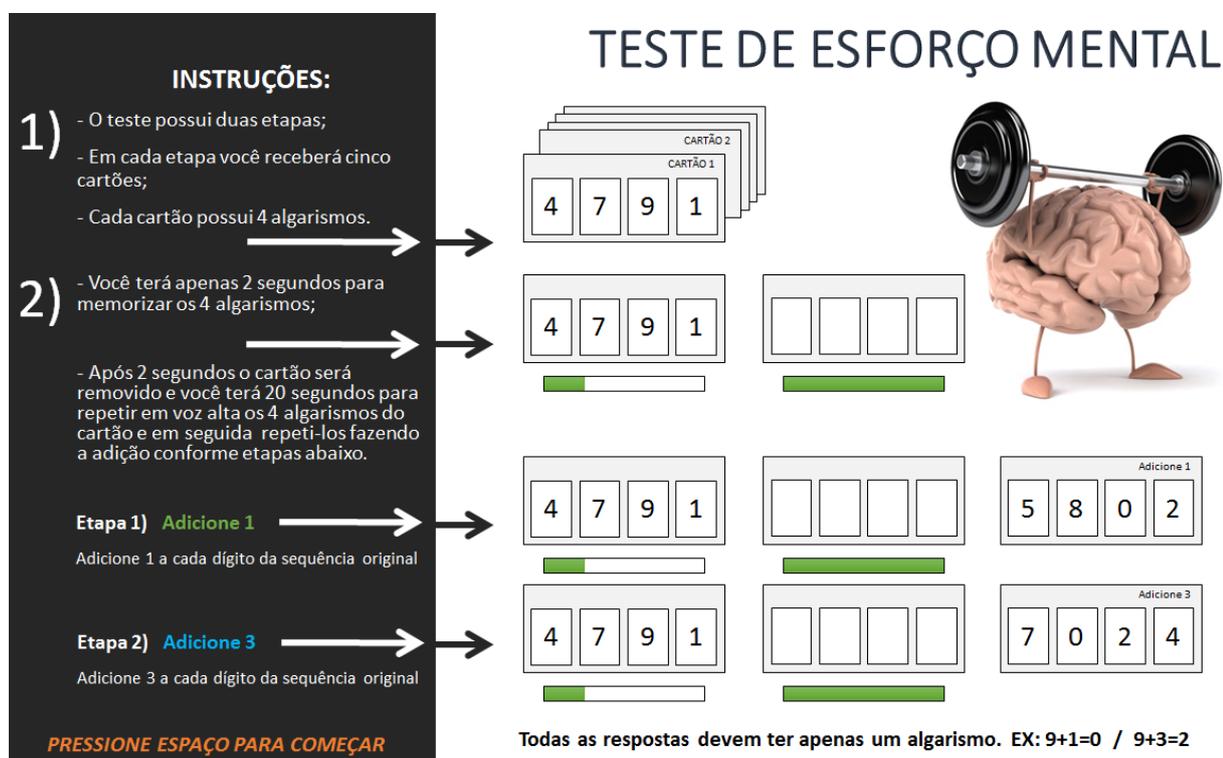
5.1.3 Tarefas e estímulos

As tarefas deste experimento foram organizadas de modo que o estímulo ao sujeito fosse feito 100% de forma visual, com todas as tarefas apresentadas no monitor do equipamento. A

interação do indivíduo com a máquina foi pensada de forma que houvesse a menor complexidade possível, colocando sob a responsabilidade do indivíduo apenas o controle de inicialização de cada tarefa, que deve ser feita pressionando a tecla espaço do teclado. Da mesma forma foi pensada a sistemática para registro das respostas, que foi feita por intermédio do aplicador do teste após expressão verbal do indivíduo, permitindo que sua atenção ficasse totalmente voltada para o experimento.

A organização destas regras pode ser observada na Figura 48, que mostra a tela de instruções iniciais apresentadas aos participantes do experimento.

Figura 48 – Tela de instruções.



Fonte: Autor

5.1.4 Pré-processamento

Após aplicar o teste aos 59 voluntários foi obtido uma matriz de dados de 59 colunas por 97.200 linhas, onde cada coluna representa um participante do experimento e cada linha representa o sinal de variação da pupila durante todo o experimento. A partir desta matriz de dados iniciam-se as etapas de pré-processamento do sinal.

Na primeira etapa do pré-processamento do sinal é aplicado um filtro para eliminar os trechos do sinal que não possuem relevância para o experimento, como os trechos que contém

as telas de instruções e as telas de transição entre tarefas, que somadas acumulam cerca de 31.200 amostras. Com isso, após remover estas amostras a matriz de dados é reduzida para 66.000 linhas, que representam as amostras de interesse conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Amostras de interesse.

| Tarefa | Fase | Duração em segundos | Quantidade de amostras |
|---------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tarefa 1 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 2 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 3 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 4 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 5 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 6 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 7 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 8 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 9 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Tarefa 10 | Fase de memorização | 2 | 600 |
| | Fase de reprodução e transformação | 20 | 6.000 |
| Total | | 220 | 66.000 |

Fonte: Autor

Na segunda etapa do pré-processamento é verificado a qualidade do sinal coletado, analisando quantas amostras deixaram de ser capturadas dentro das 66.000 previstas.

5.1.4.1 Qualidade do sinal

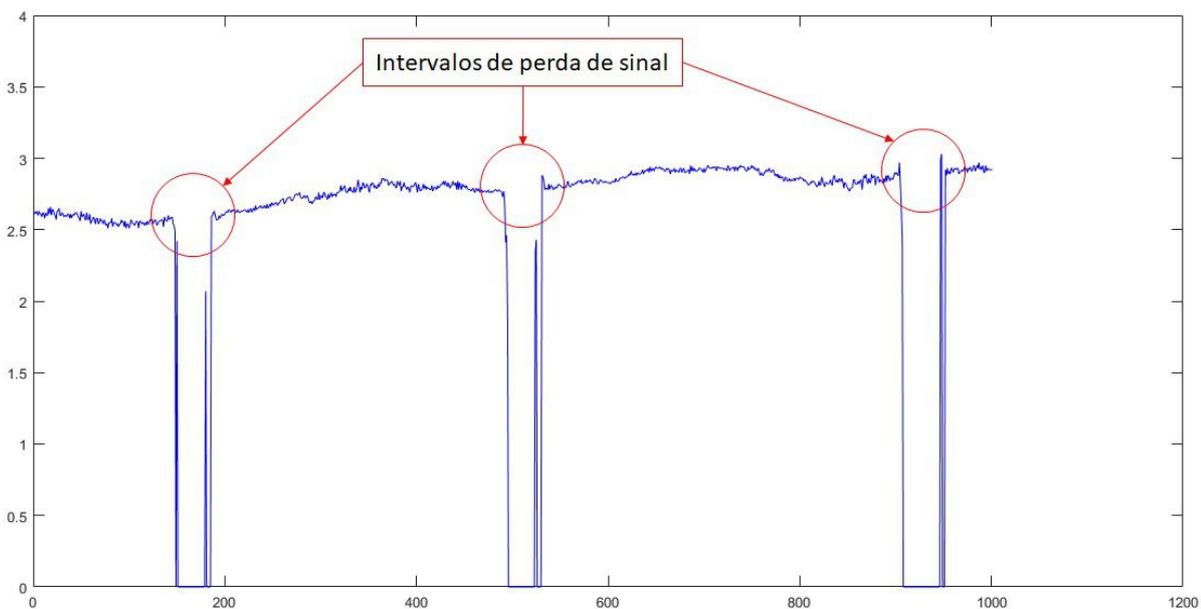
A análise da qualidade do sinal foi feita em duas etapas: primeiro foi feita uma comparação da perda de sinal entre olho esquerdo e olho direito; e depois foi feita uma análise do sinal perdido por cada participante.

Na comparação da perda de sinal por olho, foi observado especificamente neste experimento, que a perda de sinal do olho direito foi maior que a perda de sinal do olho esquerdo em **2,9%**. O que significa que em determinados momentos houve a gravação de sinal do olho

esquerdo e não houve a gravação do olho direito. Essa diferença de sinal mostra que não é uma boa prática utilizar a média aritmética entre os olhos para estabelecer a variável de medida do diâmetro pupilar, pois para isso seria necessário descartar algumas amostras do olho esquerdo para que a média das pupilas não fosse influenciada por uma variável de valor zero do olho direito (que não gravou o sinal), reduzindo pela metade o valor real do diâmetro da pupila. Então, para melhor aproveitamento do sinal, neste experimento foi utilizado apenas o sinal do olho esquerdo.

A partir dos dados do olho esquerdo foi feito um levantamento de quantas amostras foram perdidas por participante. Essa análise leva em consideração a quantidade de amostras perdidas e o intervalo de perda de sinal. A Figura 49 mostra um exemplo de perda de sinal em um intervalos de 1.000 amostras com taxa de captura de 300 Hz.

Figura 49 – Exemplo de perda de sinal.



Fonte: Autor

Legenda: Os círculos em vermelho destacam os intervalos de perda de sinal. Note que estes intervalos possuem tamanhos semelhantes, cerca de 30 amostras cada, o que é bem característico do piscar de olhos que possui duração média de 100 milissegundos.

Durante qualquer experimento com rastreamento ocular é normal perder alguns dados, pois existem alguns fatores inerentes a cada indivíduo que fazem com que o sinal seja perdido momentaneamente. Estes fatores normalmente são ações involuntárias, como: piscadelas ou piscar de olhos; posicionamento do foco ocular fora dos limites do equipamento (quando o participante involuntariamente olha para cima); obstrução da câmera com cabelos ou as mãos

(quando o participante involuntariamente leva as mãos ao rosto); e dificuldade no reconhecimento pupilar que pode ser causado pelo uso de óculos ou lentes de contato.

Dentre estes fatores, existe uma perda esperada que é proveniente do piscar de olhos. Segundo Rogers (2010), piscar é uma ação involuntária do ser humano e é classificada em dois reflexos funcionais: o primeiro reflexo funcional resulta da estimulação das terminações do quinto e do sétimo nervo craniano da córnea e acontece com regularidade em intervalos de tempo (cerca de 24 vezes por minuto) quando se está em estado de vigília; e o segundo reflexo funcional resulta apenas das terminações do quinto nervo craniano da córnea e pode ser provocado por diversos estímulos periféricos, como luz brilhante e micro partículas suspensas no ar. Ambos reflexos são rápidos, com duração média de 100 milissegundos. Com isso, pode-se estimar a quantidade mínima esperada de perda de sinal (PS) calculando o tempo acumulado de piscadas durante todo o experimento, como mostra a equação abaixo:

$$PS = Qmps \cdot Tte \cdot Dmp \cdot Qas, \quad (6)$$

onde:

- a) $Qmps$ é a quantidade média de piscadas por segundo;
- b) Tte é o tempo total do experimento em segundos;
- c) Dmp é a duração média de cada piscada em segundos;
- d) Qas a quantidade de amostras por segundo.

Aplicando a este experimento, temos:

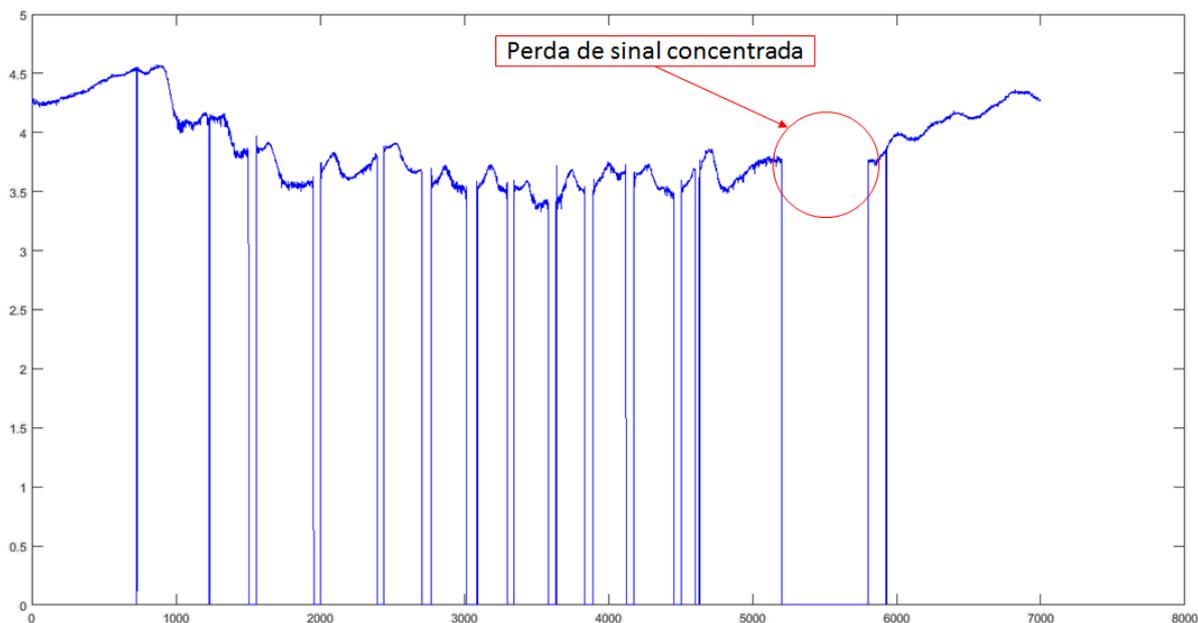
$$PS = \frac{24}{60} \cdot 220 \cdot 0,1 \cdot 300 = 2.640. \quad (7)$$

Subtraindo as 2.640 amostras perdidas das 66.000 amostras coletadas, pode-se dizer que é esperado no mínimo uma perda de 4% do sinal.

Além da perda esperada, existem as perdas pelos fatores eventuais normalmente associadas aos hábitos de cada indivíduo, que não possuem ritmo regular e podem acontecer ou não. Estas perdas são difíceis de serem estimadas, mas em um cálculo reverso, pode-se observar que a perda de sinal acumulada por estes fatores é a quantidade de amostras previstas menos a quantidade de amostras válidas após descontadas as perdas previstas. Por exemplo, na Tabela 4 o participante 01 apresentou 87,77% de amostras válidas, então além da perda prevista de 4%, estimasse que mais 8,23% do sinal foi perdido pelos fatores associados aos hábitos deste participante.

Estas amostras perdidas podem ser reconstruídas através de interpolação linear conforme descrito adiante na subseção “Tratamento do sinal”, mas para manter a identidade do sinal é necessário avaliar se houve concentração de perda de sinal em um único intervalo, pois a reconstrução de amostras em intervalos grandes podem gerar amostras artificiais. A Figura 50 mostra um exemplo de perda de sinal concentrada em um intervalo com 7.000 amostras.

Figura 50 – Perda de sinal concentrada.



Fonte: Autor

Legenda: Nesta imagem pode-se observar pequenas perdas de sinais seguidas por uma perda concentrada, indicada pelo círculo vermelho.

Durante os testes para reconstrução do sinal, foi observado que reconstruções de intervalos com perdas superiores a 60 amostras apresentavam pequenas alterações na identidade do sinal. Foi observado também que perdas de sinal menores que 60 amostras, seguidas umas das outras sem um espaço amostral mínimo de 90 amostras válidas, também apresentavam pequenas alterações na identidade do sinal. Então, para determinar um limite mínimo de amostras a serem coletadas, foi concebido um cenário onde todas as perdas de sinal de até 60 amostras fossem precedidas de um intervalo com no mínimo 90 amostras válidas.

Considerando este cenário (pior cenário aceitável), dentro das 66.000 amostras coletadas obtém-se 440 intervalos com 60 amostras perdidas e 440 intervalos com 90 amostras válidas, totalizando 39.600 amostras válidas, que representam 60% do total coletado e consequentemente estabelece o limite mínimo para descrever a qualidade do sinal.

A Tabela 4 apresenta a qualidade do sinal observada nos 59 participantes do experimento.

Tabela 4 – Qualidade do sinal observada na pupila esquerda.

| Participante | Qualidade do sinal | Participante | Qualidade do sinal | Participante | Qualidade do sinal |
|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 1 | 87,77% | 21 | 84,76% | 41 | 66,10% |
| 2 | 87,78% | 22 | 78,03% | 42 | 78,83% |
| 3 | 82,01% | 23 | 83,93% | 43 | 75,66% |
| 4 | 81,59% | 24 | 86,81% | 44 | 74,37% |
| 5 | 83,31% | 25 | 78,43% | 45 | 89,15% |
| 6 | 81,81% | 26 | 83,47% | 46 | 68,30% |
| 7 | 76,90% | 27 | 88,08% | 47 | 86,10% |
| 8 | 88,50% | 28 | 86,77% | 48 | 84,57% |
| 9 | 88,75% | 29 | 83,79% | 49 | 52,05% |
| 10 | 17,48% | 30 | 79,73% | 50 | 83,73% |
| 11 | 87,36% | 31 | 28,56% | 51 | 84,81% |
| 12 | 78,22% | 32 | 82,84% | 52 | 60,24% |
| 13 | 88,30% | 33 | 84,87% | 53 | 88,95% |
| 14 | 88,50% | 34 | 87,65% | 54 | 86,26% |
| 15 | 79,77% | 35 | 80,42% | 55 | 86,95% |
| 16 | 66,28% | 36 | 84,68% | 56 | 89,49% |
| 17 | 78,36% | 37 | 87,17% | 57 | 80,02% |
| 18 | 80,49% | 38 | 82,27% | 58 | 78,01% |
| 19 | 53,54% | 39 | 90,42% | 59 | 84,67% |
| 20 | 87,10% | 40 | 69,71% | | |

Fonte: Autor

Nota: Os participantes destacados na cor vermelha foram descartados do experimento por apresentarem a qualidade do sinal abaixo do limite mínimo de 60%.

Com o objetivo de conhecer as variáveis que causaram maior perda de sinal, foi feita uma análise dos participantes descartados utilizando as informações coletadas na etapa de entrevista e o relatório do aplicador do teste, mas não foi possível identificar um fator em comum que justificasse a perda do sinal.

Principais informações levantadas acerca de cada participante descartado:

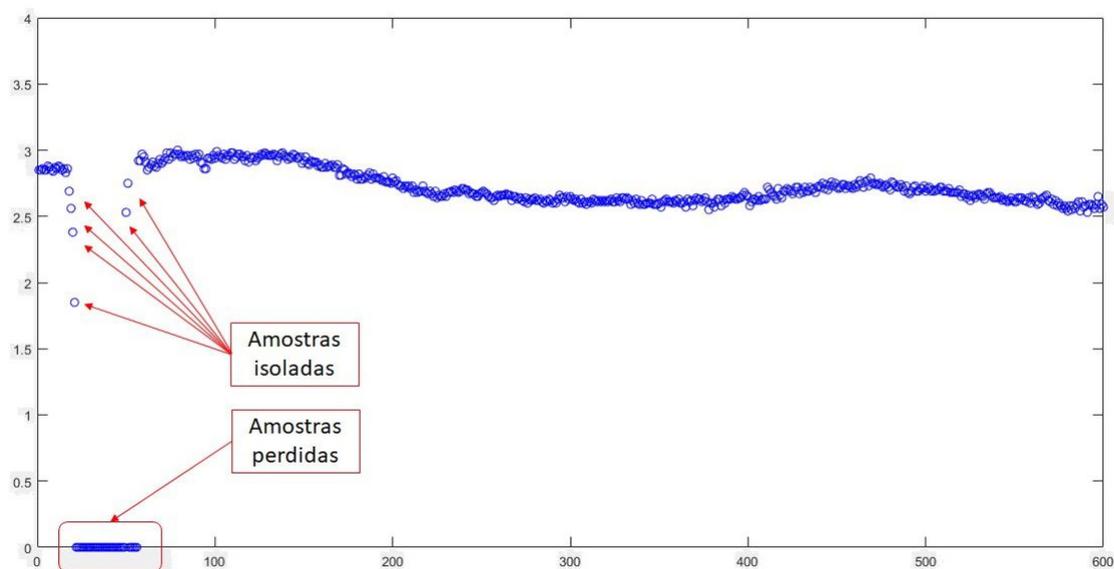
- a) Participante nº10 usava um óculos com armação esportiva e lente curvada;
- b) Participante nº19 usava um óculos comum;
- c) Participante nº31 não usava óculos e não apresentou qualquer informação que pudesse diferenciá-lo dos demais participantes;
- d) Participante nº49 informou possuir déficit de atenção.

5.1.4.2 Tratamento do sinal

Após a seleção dos participantes considerados válidos, inicia-se a terceira etapa do processamento do sinal. Esta etapa é compreendida por 3 fases: 1º fase, remoção de amostras isoladas; 2º fase, interpolação de dados; e 3º fase, remoção de ruídos.

Na fase de remoção de amostras isoladas (*outliers*), foi feito um filtro com fator de corte baseado no desvio padrão das amostras vizinhas. Este filtro é necessário, pois quando há a ocorrência de perda de sinal é comum que algumas amostras acompanhem o decaimento da medida real até o valor zero, como mostra a Figura 51.

Figura 51 – Amostras isoladas.



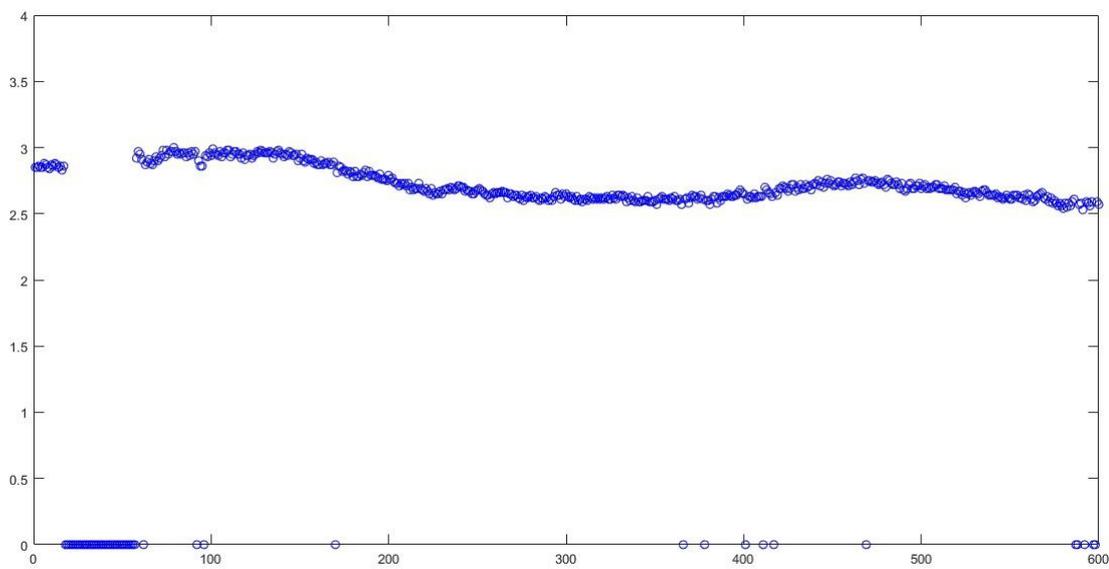
Fonte: Autor

A remoção destas amostras foi feita através de um algoritmo desenvolvido no software **Matlab**. A primeira parte do algoritmo identifica as amostras isoladas e atribui valor zero a cada uma delas, como mostra a Figura 52.

A segunda parte do algoritmo elimina todas as amostras de valor zero e preserva as posições vazias para a fase de interpolação de dados. A Figura 53 mostra o resultado final desta fase.

Na fase de interpolação de dados foi utilizada a função **fillmissing** do software **Matlab**. Esta função oferece 6 métodos para preenchimento dos valores faltantes de matrizes ou tabelas de dados. Neste experimento foi utilizado o método **Linear**, que realiza o preenchimento de dados faltantes através de interpolação linear de valores vizinhos não faltantes. Esta função

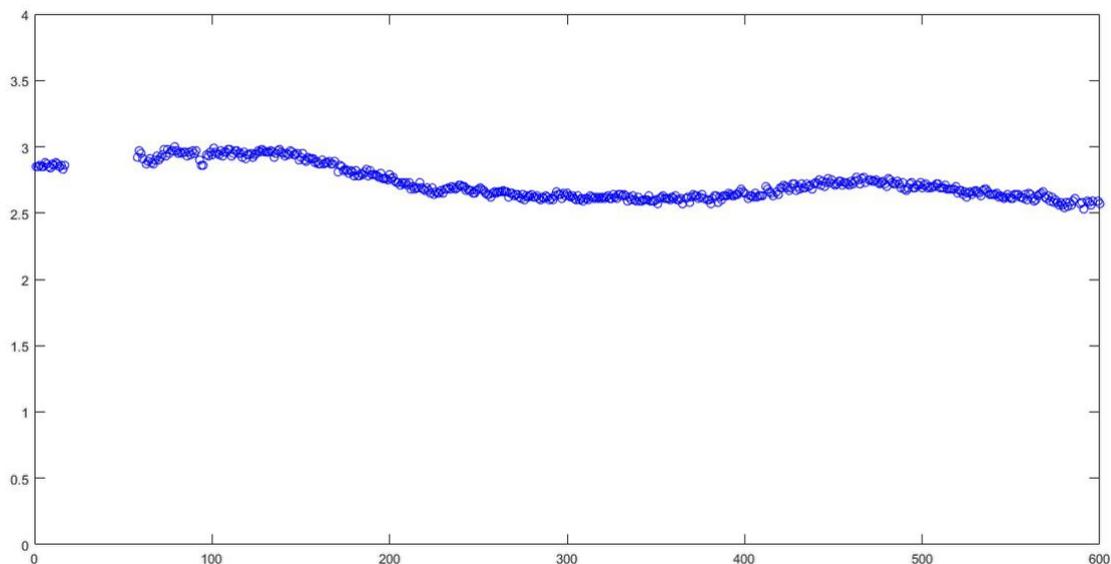
Figura 52 – Identificação de amostras isoladas.



Fonte: Autor

Legenda: As amostras isoladas podem ser observadas como marcadores de posição no eixo zero.

Figura 53 – Remoção de amostras isoladas.

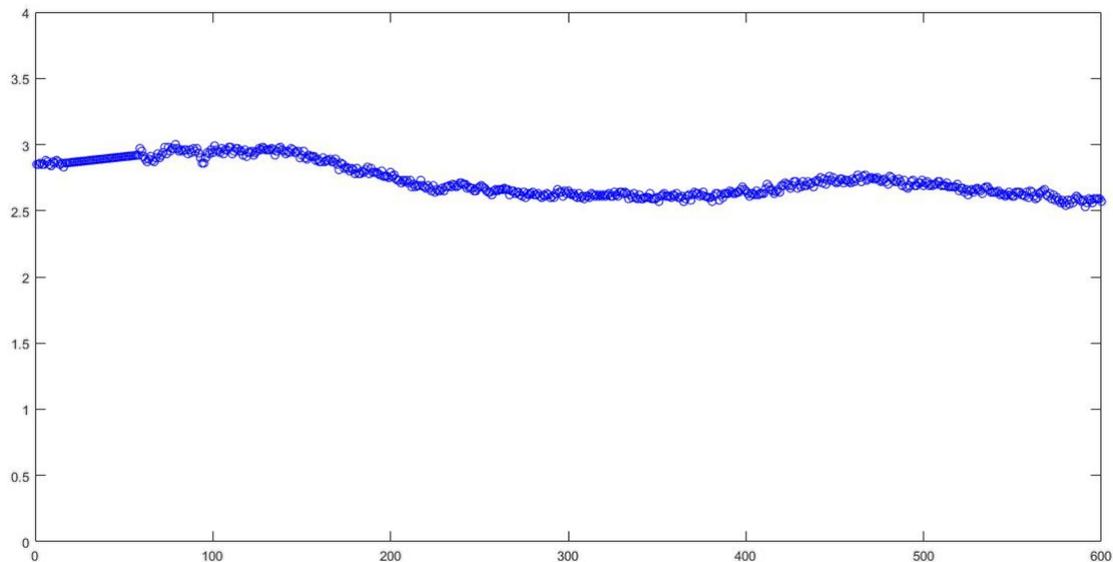


Fonte: Autor

também utiliza a Equação (1), descrita anteriormente na etapa de processamento de sinais do experimento preliminar. A Figura 54 mostra o resultado obtido com a interpolação de dados.

Na fase de remoção de ruído os dados foram suavizados através da função **filtfilt** do software **Matlab**. Esta função utiliza filtragem de fase zero para reduzir o ruído e preservar a identidade do sinal. Neste experimento os dados foram processados por janelamento a cada 5 amostras, na direção direta e reversa. Os resultados desta fase são apresentados na Figura 55.

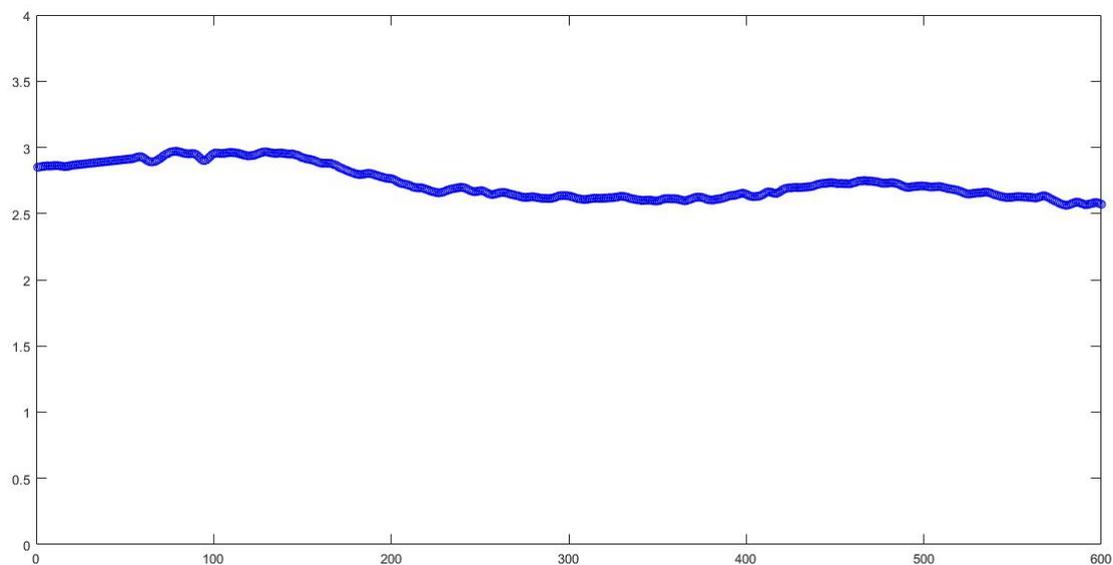
Figura 54 – Interpolação de dados.



Fonte: Autor

Legenda: Nesta etapa o algoritmo identifica todos os intervalos onde as amostras foram removidas e realiza a interpolação de dados entre os dados vizinhos.

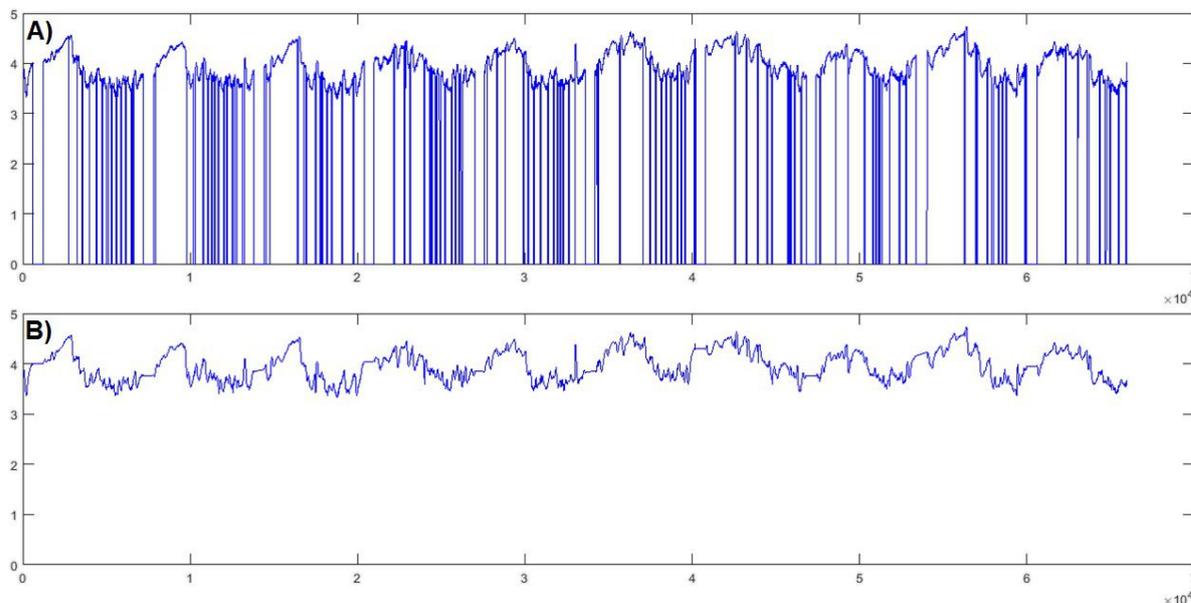
Figura 55 – Suavização dos dados.



Fonte: Autor

Após aplicadas as 3 fases da etapa de tratamento do sinal, obtém-se uma matriz de dados pronta para as próximas etapas do processamento de sinais. A Figura 56 apresenta um comparativo entre o sinal original e o sinal tratado em uma gravação completa com 66.000 amostras.

Figura 56 – Antes e depois do tratamento do sinal.



Fonte: Autor

Legenda: A) apresenta o sinal original e B) apresenta o sinal tratado com as perdas de sinais reconstruídas.

5.1.5 Extração de característica e classificação

Neste experimento foram mantidos os processos de análise da variância do experimento preliminar, mas foi observado que o método de regressão polinomial baseado no coeficiente de variância que foi utilizado na classificação dos participantes continuou não apresentando bons resultados, impossibilitando análises conclusivas acerca do desempenho dos indivíduos.

Como descrito, o grau de variância pupilar está relacionado com o esforço cognitivo, mas foi detectado que participantes com coeficientes de variância semelhantes possuíam descrições do sinal bastante distintas se observadas no domínio do tempo, o que indica que analisar o desempenho unicamente através do índice de variância pupilar pode induzir ao erro.

Observada a necessidade de analisar a descrição do sinal, foi implementada uma técnica de análise estatística multivariada como proposta por (THOMAZ et al., 2007), que utiliza Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA).

5.1.5.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

PCA é uma técnica de extração de características comumente utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e explicar a estrutura de covariância de um conjunto de variáveis

por meio de combinações lineares. Esta técnica 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 os recursos mais expressivos e a última componente principal com autovalor não-nulo represente os recursos menos expressivos (ABDI; WILLIAMS, 2010; FUKUNAGA, 2013; TENORIO; THOMAZ, 2011).

Em uma matriz de dados de treinamento, contendo N observações representadas por vetores n -dimensionais, pode-se obter a matriz de covariância através da Equação (8),

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{N-1} (X - \bar{X})(X - \bar{X})^T \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})(x_j - \bar{x})^T, \end{aligned} \quad (8)$$

onde 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 (9):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j. \quad (9)$$

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.

5.1.5.2 *Análise de Discriminantes Lineares (LDA)*

A LDA é uma técnica de extração de características originalmente proposta por Fisher, que separa os dados originais em duas ou mais classes de interesse (FISHER, 1936). 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

$$S_b = \sum_{i=1}^g N_i (\bar{x}_i - \bar{x})(\bar{x}_i - \bar{x})^T, \quad (10)$$

e a matriz de dispersão dentro da classe S_w definida como

$$S_w = \sum_{i=1}^g (N_i - 1) S_i = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{N_i} N_i (x_{i,j} - \bar{x}_i)(x_{i,j} - \bar{x}_i)^T, \quad (11)$$

onde $x_{i,j}$ é a forma n -dimensional da amostra j da classe π_i , N_i é o número de modelos de treinamento da classe π_i , g representa o número total de classes e \bar{x} é o vetor médio definido na Equação (9). 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

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g N_i \bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{N_i} x_{i,j}, \quad (12)$$

onde 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 uma matriz de projeção P_{lda} 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 et al., 2007). Esta razão denominada de Critério de Fisher, pode ser descrita pela Equação (13):

$$P_{lda} = \arg \max_p \frac{|P^T S_b P|}{|P^T S_w P|}. \quad (13)$$

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

A partir deste ponto é importante ressaltar que o desempenho da LDA pode ser comprometido quando o número total de observações de treinamento N é limitado em comparação com a dimensão do espaço de recurso m (THOMAZ et al., 2007; TENORIO; THOMAZ, 2011). Desta forma, para contornar os problemas de instabilidade do procedimento padrão da LDA e calcular a matriz de projeção P_{lda} , neste experimento, foi utilizada uma técnica proposta por (THOMAZ et al., 2007), denominada MLDA (*Maximum uncertainty LDA*).

5.1.5.3 Análise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA)

A técnica de MLDA utiliza covariância de dados baseado em LDA, substituindo a matriz de dispersão S_w na Equação (13), 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

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{Trace(S_p)}{n}; \quad (14)$$

- 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

$$\Lambda^* = diag[max(\lambda_1, \bar{\lambda}), max(\lambda_2, \bar{\lambda}), \dots, max(\lambda_m, \bar{\lambda})]; \quad (15)$$

- d) Calcula-se a matriz de dispersão intra-classes modificada

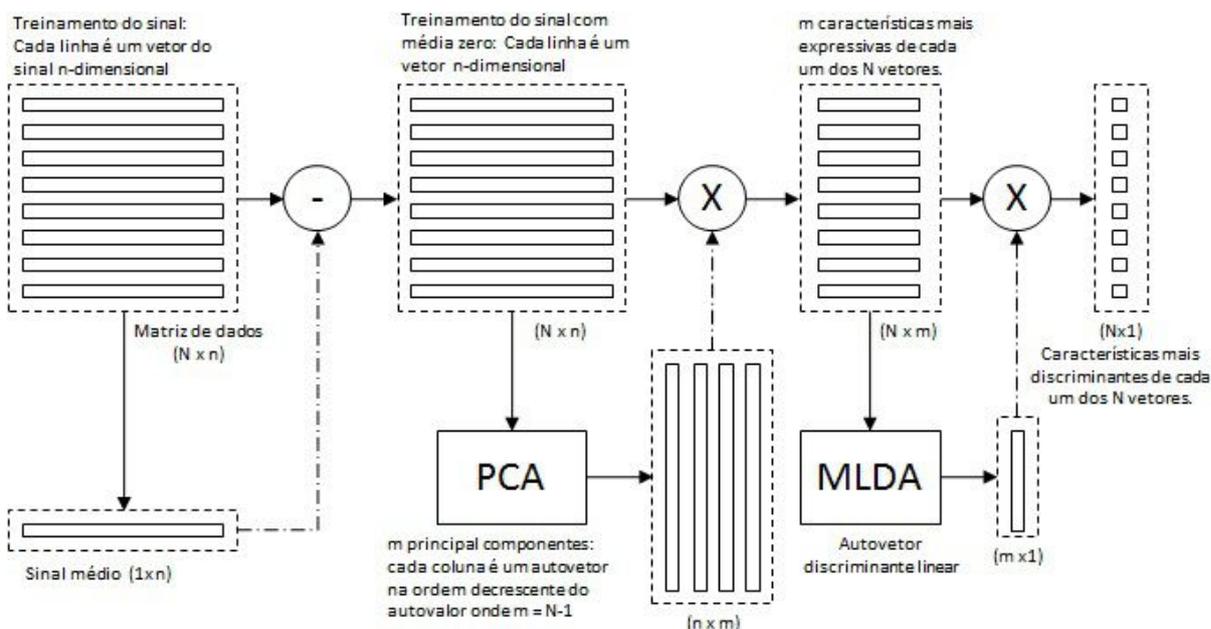
$$S_w^* = S_p^*(N - g) = (\Phi \Lambda^* \Phi^T)(N - g). \quad (16)$$

Após calculadas estas etapas, o método MLDA é construído substituindo a matriz de dispersão S_w na Equação (13), 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 57. Conforme o diagrama, primeiro é selecionado o conjunto de treinamento de dimensão $N \times n$, que neste experimento é a matriz de saída da etapa de pré-processamento, com dimensão 55×66.000 . A partir desta matriz, é calculado o vetor de sinal médio de todas as observações e subtraído de cada vetor do sinal pré-processado. Em seguida, a matriz de treinamento composta por vetores do sinal com média zero é usada como entrada para calcular a matriz de transformação linear PCA. Esta etapa reduz a dimensionalidade do sinal, resultando em uma matriz de componentes principais $n \times m$, tal que $m = N - 1$ armazena todos os autovetores não nulos. A matriz resultante desta operação (agora com dimensão 55×54) é utilizada como entrada para calcular o autovalor discriminante MLDA. Como neste experimento existem apenas duas classes para separar, existe apenas um autovetor discriminante MLDA.

Então, a característica mais discriminante de cada um dos vetores m -dimensional é obtida através da multiplicação da matriz de características mais expressivas de $N \times m$ pelo autovetor de MLDA. Ao fim deste processo obtém-se uma matriz de projeção $(N \times 1)$ com as características mais discriminantes de cada um dos N vetores originais.

Figura 57 – Diagrama da aplicação experimental do método PCA + MLDA.



Fonte: Adaptado de Thomaz, 2007, p. 987

5.1.5.4 Desempenho da classificação

Neste experimento foram adotados dois métodos para classificar os indivíduos:

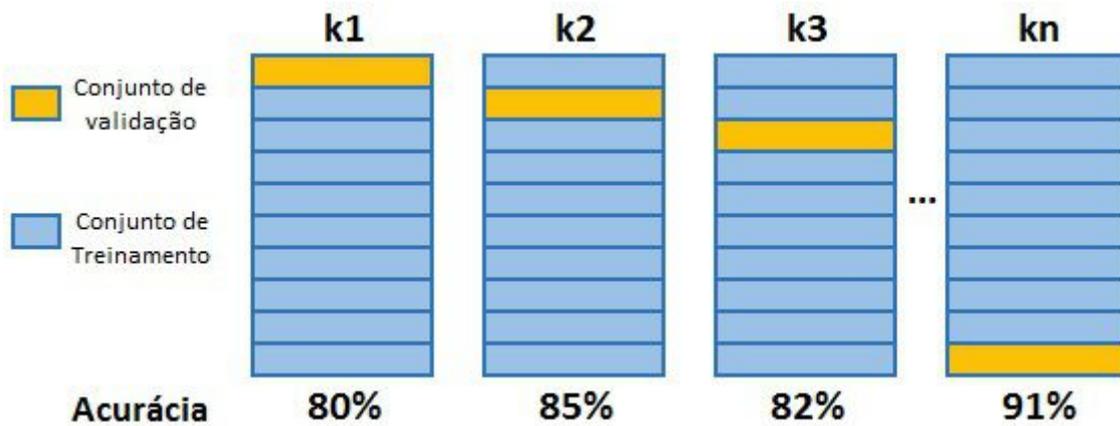
a) **Classificação por meio da distância Euclidiana da média.** Neste método são calculados os valores médios de cada classe e a respectiva distância Euclidiana entre cada indivíduo de validação, classificando-os pelo critério da menor distância da média.

b) **Classificação por limiar de separação.** Neste método as variáveis de cada classe são ordenadas e são selecionados os indivíduos mais próximos da fronteira entre as classes, em seguida é calculado o limiar de separação das classes dado pela média aritmética dos indivíduos limitadores. Então os indivíduos de validação são projetados no mesmo hiperplano onde foi projetado a matriz de treinamento e são classificados pelo limiar que separa cada classe.

Para testar a performance de classificação linear PCA + MLDA em ambos os métodos descritos acima, foi adotado o método k -fold (BENGIO; GRANDVALET, 2004). Este método

consiste em dividir um conjunto de dados em k subconjuntos exclusivos e de mesmo tamanho. A partir desta divisão é inicializado um teste de validação cruzada, onde um subconjunto é separado para a 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 58.

Figura 58 – Validação cruzada com método k -fold.



Fonte: Autor

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

$$A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A_k. \quad (17)$$

5.2 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no experimento subsequente, divididos em 4 etapas:

- Desempenho apurado de cada participante;
- Análise do perfil dos participantes;
- Análise da variância pupilar;
- Análise estatística multivariada.

Baseado neste critério, os participantes foram ordenados e classificados como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de desempenho.

| Participante | Acertos | Participante | Acertos | Participante | Acertos |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| P03 | 80 | P39 | 80 | P53 | 79 |
| P04 | 80 | P40 | 80 | P27 | 78 |
| P06 | 80 | P41 | 80 | P48 | 78 |
| P11 | 80 | P42 | 80 | P09 | 76 |
| P13 | 80 | P43 | 80 | P14 | 76 |
| P15 | 80 | P44 | 80 | P33 | 76 |
| P17 | 80 | P45 | 80 | P47 | 76 |
| P18 | 80 | P46 | 80 | P01 | 75 |
| P20 | 80 | P50 | 80 | P30 | 75 |
| P22 | 80 | P51 | 80 | P52 | 75 |
| P24 | 80 | P54 | 80 | P56 | 75 |
| P25 | 80 | P55 | 80 | P12 | 73 |
| P26 | 80 | P57 | 80 | P02 | 72 |
| P28 | 80 | P58 | 80 | P16 | 71 |
| P32 | 80 | P59 | 80 | P05 | 68 |
| P35 | 80 | P07 | 79 | P21 | 68 |
| P36 | 80 | P08 | 79 | P23 | 62 |
| P37 | 80 | P29 | 79 | | |
| P38 | 80 | P34 | 79 | | |

Fonte: Autor

Nota: Os participantes que erraram pelo menos uma resposta foram classificados como não-proficientes e estão destacados na cor vermelha; os participantes que acertaram 100% das respostas foram classificados como proficientes e estão destacados na cor verde.

5.2.2 Análise do perfil dos participantes

Através da entrevista realizada no início do experimento (questionário pré-experimento), foi possível obter informações sobre o perfil do participante que permitem diversas análises relacionadas ao desempenho mensurado e aos métodos para aquisição de sinal pupilar.

Iniciando por uma questão técnica, envolvendo a capacidade do voluntário de perceber o estímulo visual com clareza, foi verificado quais participantes possuíam problemas de visão que necessitava de correção. Esta questão foi avaliada, pois por se tratar de um estímulo visual, é fundamental que nenhum dos participantes possua problemas de visão não corrigido. No entanto, a utilização de alguns modelos de óculos ou lentes de contato podem dificultar a aquisição do sinal. Então, a partir desta avaliação, foi feito um levantamento de quantos partici-

pantes precisavam usar óculos e quantos efetivamente utilizaram óculos durante o teste, como mostra a Figura 60.

Figura 60 – Participantes que usam óculos.



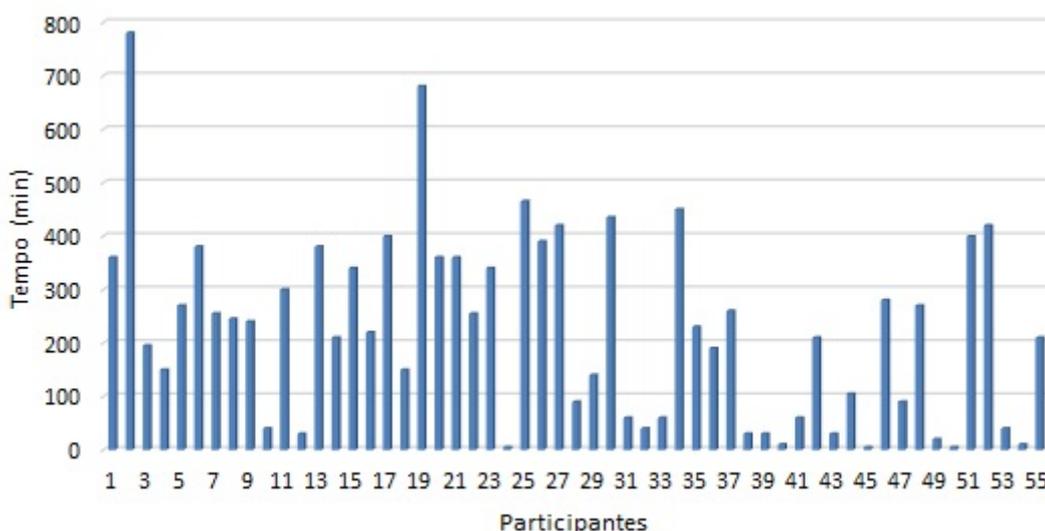
Fonte: Autor

Legenda: A primeira barra indica a quantidade de participantes que precisam usar óculos para enxergar corretamente e a segunda barra indica a quantidade de participantes que efetivamente usaram óculos durante o experimento.

Como visto, 35 participantes precisavam de óculos, mas 17 participantes não utilizaram óculos, pois possuíam pequeno grau de correção e conseguiram ler todo o texto da tela de instruções (o tamanho da fonte do texto de instrução é 3 vezes menor que o tamanho da fonte do texto utilizada no estímulo). Quanto aos participantes que utilizaram óculos, apenas 2 deles foram eliminados na etapa da qualidade do sinal (P10 e P19), mas não é conclusivo que o fator que os eliminou foi o uso do óculos, pois outros 18 participantes indicados na Figura 60 utilizaram óculos e apresentaram boa aquisição do sinal.

A segunda questão levantada foi o tempo sem se alimentar, apresentado na Figura 61.

Figura 61 – Tempo sem se alimentar.



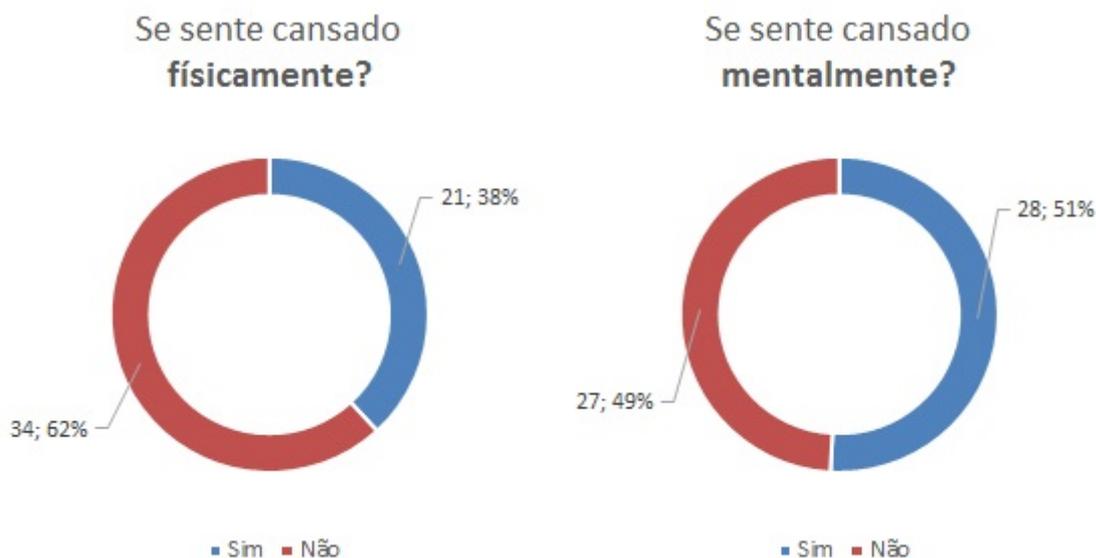
Fonte: Autor

Foi observado que o tempo médio sem se alimentar dos participantes considerados proficientes (que acertaram 100% do teste) foi de 173 minutos, contra 309 minutos do grupo dos participantes não-proficientes, o que indica que o tempo sem se alimentar pode ser um fator de impacto negativo sobre o desempenho cognitivo em tarefas de memorização e operações aritméticas.

Foi observado também que a variância média do grupo proficiente foi menor que a variância média do grupo não-proficiente (0,69 mm contra 0.81mm), o que corrobora com a ideia discutida por (HESS, 1965), onde a fome é evidenciada como um fator de estímulo à dilatação pupilar.

A terceira questão levantada foi o efeito do cansaço físico e mental, apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Cansaço físico e mental.



Fonte: Autor

O cansaço físico e mental não foi um fator relevante que discriminasse o desempenho dos participantes. Era de se esperar que os indivíduos que indicaram estar cansados fisicamente e/ou mentalmente tivessem um desempenho inferior aos indivíduos não cansados, mas foi observado um equilíbrio relativo ao cansaço físico e um resultado contrário relativo ao cansaço mental.

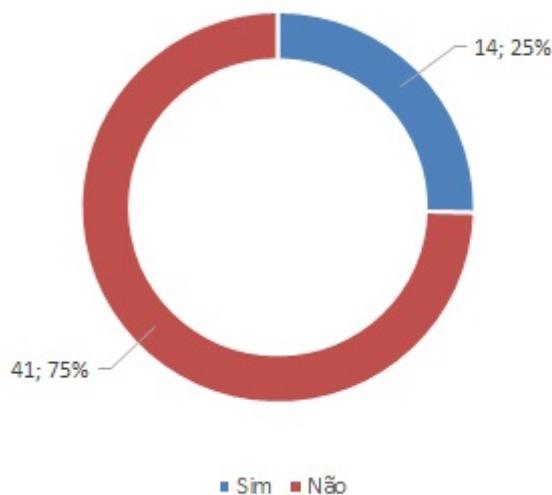
Dos indivíduos cansados fisicamente, 43% (9 de 21) pertencem ao grupo não-proficiente e dos indivíduos não cansados fisicamente, 47% (16 de 34) pertencem ao grupo não-proficiente, o que indica que o cansaço físico não foi um fator relevante para o desempenho neste experimento. No entanto, dos indivíduos cansados mentalmente, 32% (9 de 28) pertencem ao grupo

não-proficiente e dos indivíduos não cansados mentalmente, 56% (15 de 27) pertencem ao grupo não-proficiente, indicando uma certa incoerência, pois os resultados apontam que os indivíduos cansados mentalmente tiveram desempenho melhor do que os indivíduos não cansados mentalmente.

Por outro lado, a comparação da variância média pupilar de cada grupo (cansados e não cansados) indica outro cenário. Independentemente do desempenho, foi observado que os indivíduos cansados fisicamente apresentaram uma taxa de variância média de 0,81mm, enquanto os indivíduos não cansados fisicamente apresentaram uma taxa 0,82mm, o que mantém o equilíbrio observado anteriormente, mas a comparação entre indivíduos cansados e não cansados mentalmente mostrou uma diferença de 27% na taxa de variância média (0.90mm contra 0.71mm), o que indica que o cansaço mental pode ser um fator de estímulo à dilatação pupilar.

A quarta questão levantada foi o efeito do uso de medicamentos, apresentado na Figura 63 e detalhada na Tabela 6.

Figura 63 – Participantes que fizeram uso de medicamento.



Fonte: Autor

Os dados apresentados mostram que 3 dos 4 indivíduos que apresentaram a maior variância pupilar tinham em comum o tratamento da tireoide, o que pode supostamente indicar que remédios para este tipo de tratamento possa influenciar à dilatação pupilar. Contudo, estes dados não são conclusivos e a análise das reações pupilares a medicamentos não fazem parte do escopo deste trabalho. Estes dados servem apenas como um ponto de partida para possíveis investigações futuras sobre as variáveis que podem influenciar o sinal pupilar.

Tabela 6 – Tabela de medicamentos

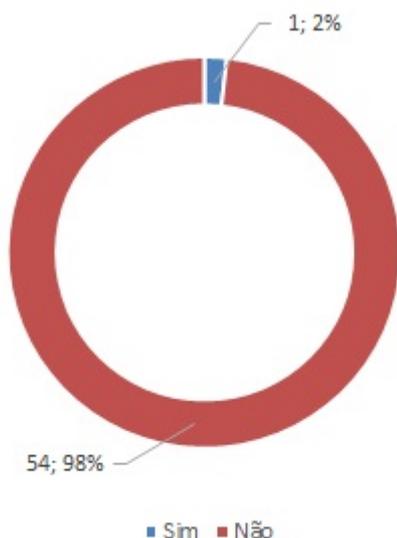
| Participante | Variância | Tipo de tratamento | Nome do medicamento |
|--------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| P48 | 1.50 mm | Tireoide | Synthroid |
| P36 | 1.45 mm | Dor | Lisador para dor de cabeça |
| P54 | 1.11 mm | Tireoide | Não sabe ou não informado |
| P21 | 1.09 mm | Dor e Tireoide | Paracetamol e Eutirox |
| P34 | 1.01 mm | Inflamação | Nimesulida |
| P30 | 0.92 mm | Asma | Bomba para asma |
| P07 | 0.87 mm | Acne | Roacutan |
| P43 | 0.83 mm | Gastrite | Omeprazol |
| P53 | 0.79 mm | Hipotiroidismo | Não sabe ou não informado |
| P12 | 0.63 mm | Reposição vitamínica | Vitamina C |
| P22 | 0.53 mm | Epilepsia | Cargamazepina |
| P57 | 0.51 mm | Dor | Não sabe ou não informado |
| P17 | 0.51 mm | Tireoide | Não sabe ou não informado |
| P42 | 0.50 mm | Reposição vitamínica | Centrum |

Fonte: Autor

Nota: A tabela apresenta a variância pupilar dos 14 participantes que informaram ter feito uso de algum medicamento. Para efeito de comparação, a variância média global de todos os participantes foi de 0,82mm.

A quinta e última questão levantada no questionário pré-experimento foi o efeito do cigarro, mas neste experimento apenas 1 participante era fumante, o que inviabiliza qualquer tipo de análise estatística pela falta de representatividade, como apresentado na Figura 63.

Figura 64 – Participantes fumantes.



Fonte: Autor

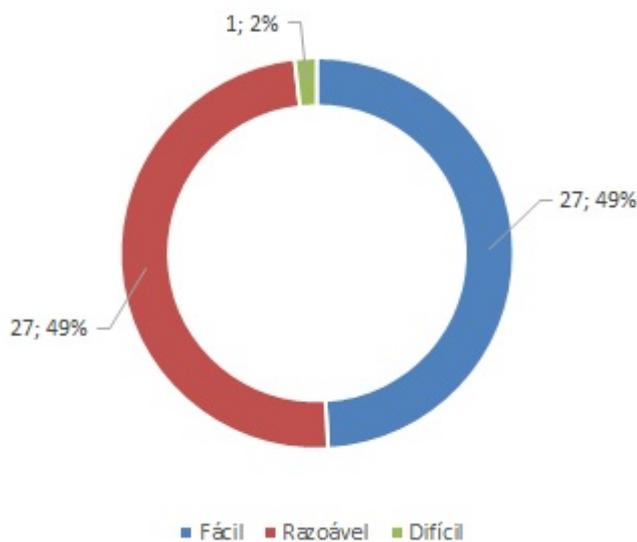
A segunda etapa do questionário foi preenchida pelo aplicador do experimento levando em consideração o diagnóstico realizado na tarefa de teste, que visa identificar se os participan-

tes possuíam conhecimentos básicos em aritmética para realizar o experimento. Nesta etapa foi observado que 100% dos participantes possuíam conhecimentos básicos em aritmética.

E a terceira etapa do questionário (pós-experimento), apresenta uma avaliação geral do experimento feita a partir dos apontamentos dos participantes.

Nesta etapa foi avaliada a dificuldade do teste, que mesmo com desempenho geral muito alto, ficou dividida entre fácil e razoável, como mostra a Figura 65.

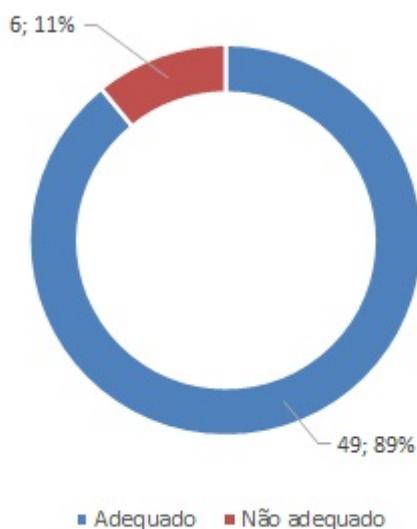
Figura 65 – Como os participantes classificaram a dificuldade do teste.



Fonte: Autor

Em seguida foi avaliado o tempo do teste, como mostra a Figura 66.

Figura 66 – Como os participantes classificaram o tempo do teste.

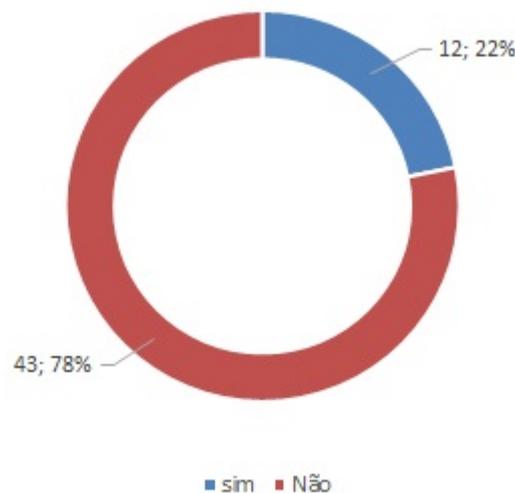


Fonte: Autor

Os participantes que classificaram o tempo como inadequado informaram que sobrou tempo para realizar a fase 2 do teste, indicando que esta fase poderia ter duração menor que 20 segundos.

Em seguida e finalizando o questionário pós-experimento, foi avaliado o cansaço do participante proveniente da participação no experimento, como mostra a Figura 67.

Figura 67 – Participantes que se sentiram cansados durante o teste.



Fonte: Autor

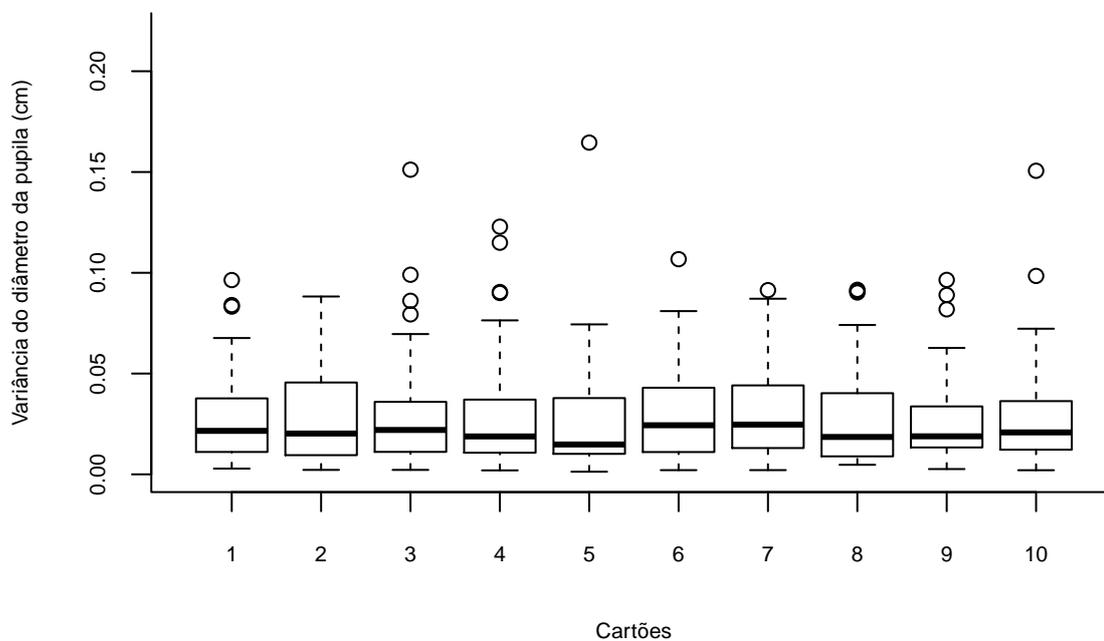
Dos 12 participantes que se sentiram cansados durante o teste, 1 informou sentir desconforto nas costas e 11 informaram sentir leve desconforto nos olhos. O participante que sentiu desconforto nas costas informou que a instrução de evitar movimentos bruscos com a cabeça o fez enrijecer o corpo durante o teste, gerando o pequeno desconforto relatado. Já os participantes que sentiram desconforto no olho, em grande maioria, informaram que a instrução para evitar fechar os olhos fez com que evitassem até de piscar, gerando uma pequena fadiga ocular.

5.2.3 Análise da variância pupilar

A análise da variância pupilar baseia-se na ideia de que as reações percebidas do diâmetro pupilar estejam fortemente relacionadas com o nível de esforço mental (KAHNEMAN, 2011). Então, neste experimento, foi observada a variância pupilar sob três perspectivas: 1º) se existe diferença entre as fases de codificação (memorização) e decodificação (verbalização da resposta); 2º) se existe diferença entre a complexidade das tarefas (adicione 1 e adicione 3); e 3º) se existe diferença entre as classes de desempenho (proficientes e não-proficientes).

A primeira perspectiva pode ser observada nas Figuras 68 e 69, que apresentam a variância pupilar por fase.

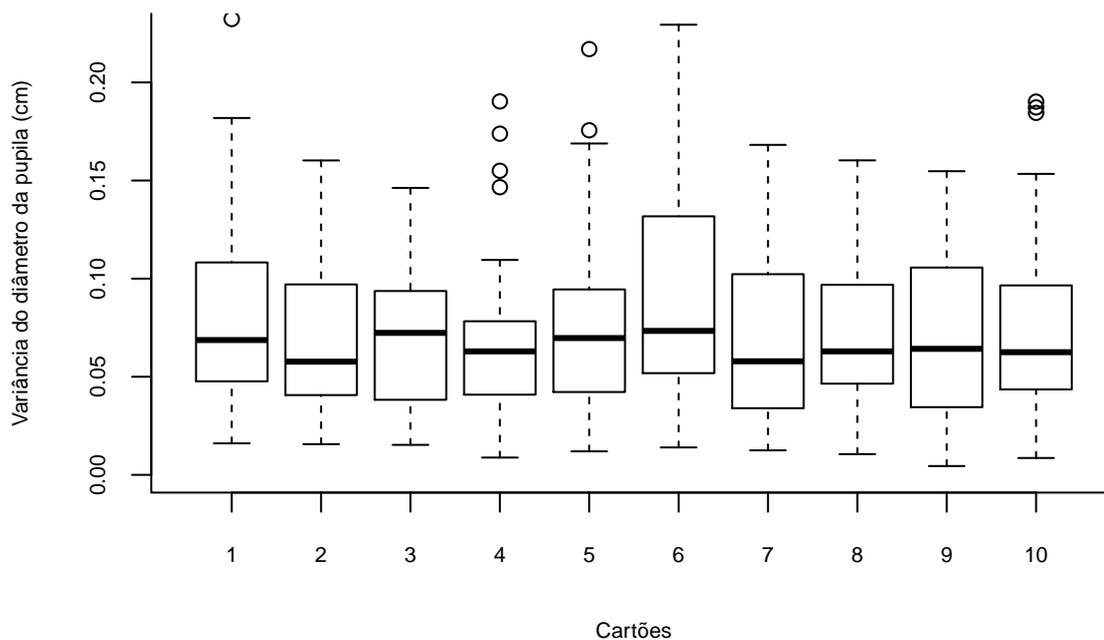
Figura 68 – Variância por cartão - Fase A: Memorização.



Fonte: Autor

Nota: Cada caixa "boxplot" do gráfico representa a variância dos dados observada em cada cartão.

Figura 69 – Variância por cartão - Fase B: Reprodução e Transformação.

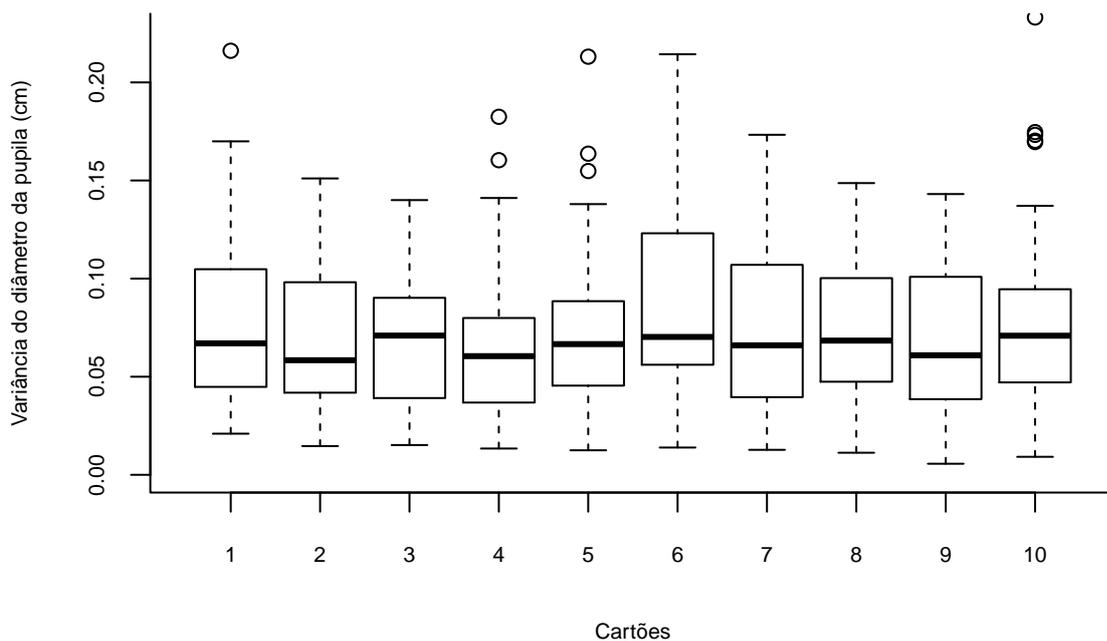


Fonte: Autor

Entre a Fase A e a Fase B, é possível perceber uma grande diferença na variação dos dados, com coeficientes de variância consideravelmente maiores na Fase B. No entanto, para observar se existe diferença entre as fases de codificação e decodificação, foi realizado uma avaliação da variação dos dados por meio do "teste T" de significância estatística (SPRINTHALL, 2003). Neste teste, adotou-se a hipótese nula (H_0) como fator de semelhança de variação pupilar entre as fases e obteve-se o valor $p = 2.2e^{-16}$, o que consequentemente rejeita H_0 . Então, a partir da primeira perspectiva, infere-se que existe diferença significativa entre as fases A e B, indicando a fase de decodificação (B) exigiu maior esforço mental dos indivíduos do que a fase de codificação (A).

A diferença entre as fases torna-se ainda mais evidente ao uni-las em um único conjunto, como apresentado na Figura 70, que assemelha-se muito com a variância da Fase B (Figura 69) pela falta de representatividade da Fase A.

Figura 70 – Variância por tarefa - Fase A + B.

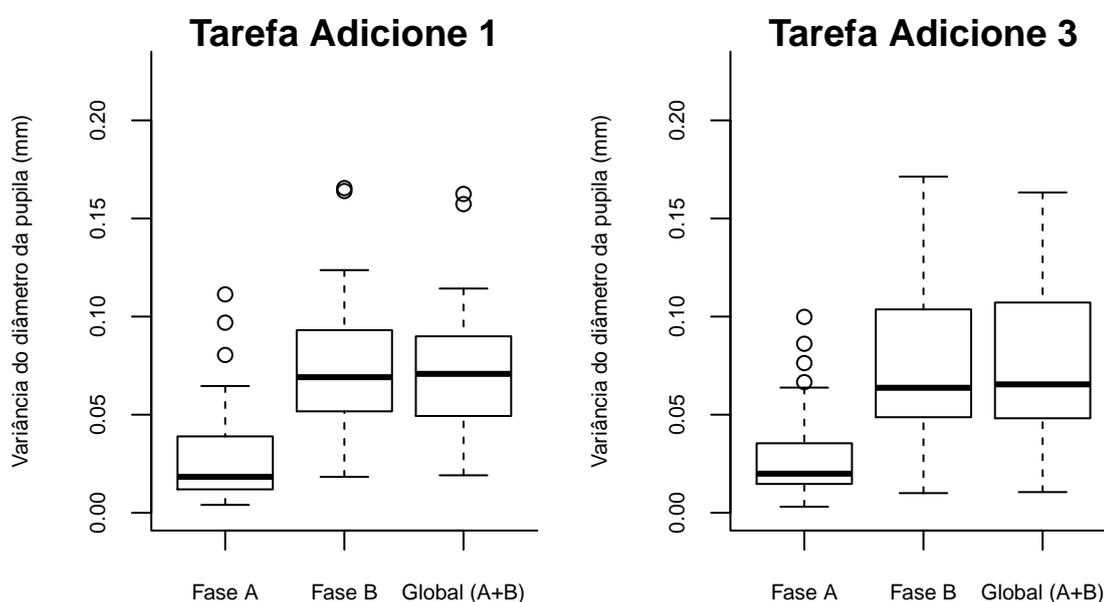


Fonte: Autor

A partir da segunda perspectiva, ao avaliar a variância pupilar por tarefa, esperava-se que os 5 cartões da tarefa adicione 3 (cartões do 6 ao 10), apresentassem maior variância nos dados. Esta expectativa se deu pela descrição do experimento original publicada por (KAHNEMAN; BEATTY, 1966), em que a tarefa adicione 3 era destacada como a tarefa mais difícil e que consequentemente proporcionava dilatações pupilares maiores, chegando a apresentar um aumento no diâmetro da pupila de até 50%. No entanto, neste experimento, o aumento do diâmetro da pupila não chegou nesses patamares.

Ao agrupar os dados (Figura 71), pode-se visualmente evidenciar que a tarefa adicione 3 apresentou maior variância pupilar, mas neste experimento, foi menor do que 50% como relatado no experimento original. Além disso, os p-valores obtidos na comparação entre as tarefas "Adicione 1" e "Adicione 3", agrupados nas fases, A, B e A+B, respectivamente foram, 0,765, 0,639 e 0,561. O que converge a análise estatística a aceitar H_0 pois todos os p-valores estão acima do nível de significância de 5% e consequentemente infere-se que não é possível perceber diferença significativa no sinal pupilar ao comparar os níveis de dificuldade do teste.

Figura 71 – Variância por tarefa agrupada.



Fonte: Autor

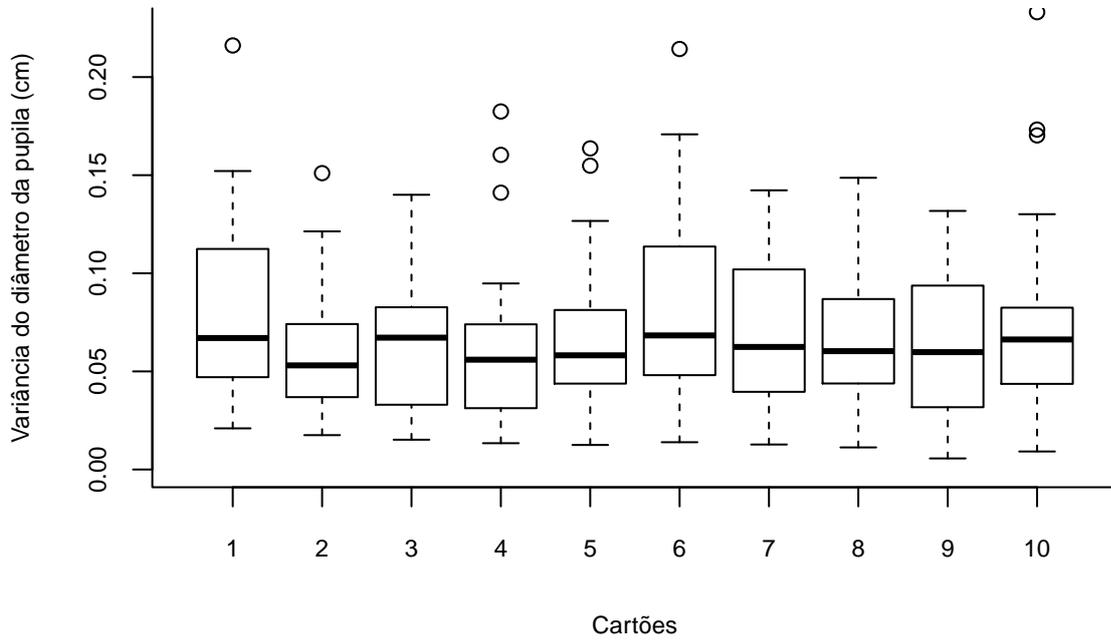
Nota: A variância agrupada apresenta os coeficientes de variância das 10 tarefas em uma única caixa "boxplot".

Para completar a análise da variância pupilar, foi avaliado se existe diferença entre as classes de desempenho. Nesta etapa os dados foram separados de acordo com a classe dos indivíduos, de modo que fosse possível perceber as diferenças de variância pupilar entre indivíduos proficientes e não-proficientes. As Figuras 72, 73, 74, mostram esta comparação.

Os p-valores obtidos na comparação entre proficientes e não-proficientes, foi de 0,304 na fase A e de 0,263 na fase B, ambos acima do nível de significância de 5%.

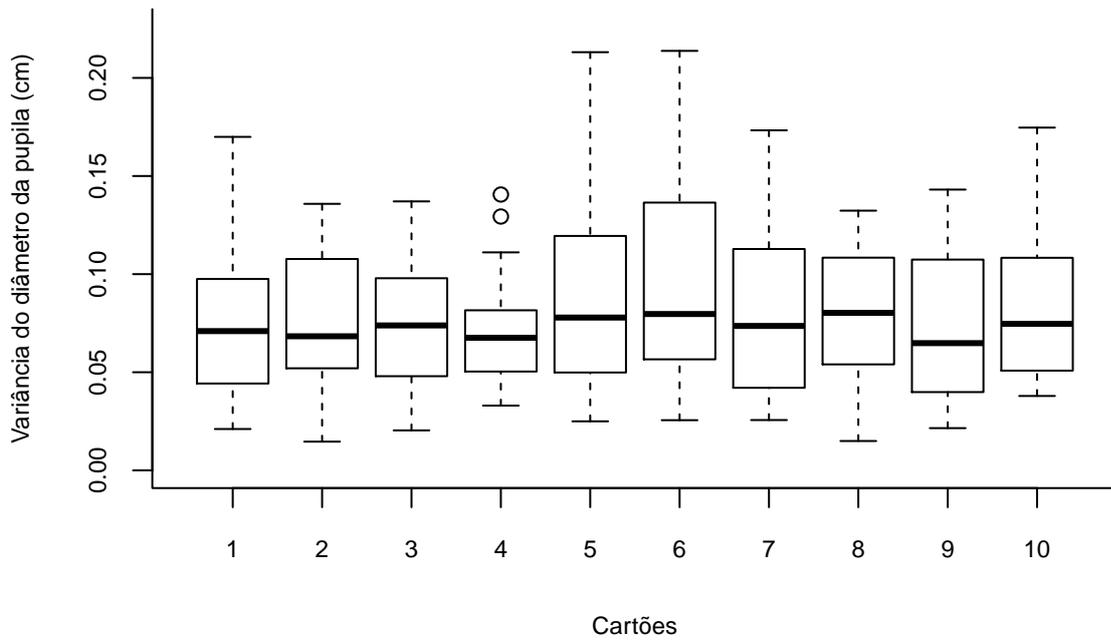
Na Figura 74 é possível perceber (visualmente) que o grupo não-proficiente apresentou variância pupilar ligeiramente maior que o grupo proficiente, o que apoia a ideia de que altos índices de variância pupilar possa indicar a dificuldade do indivíduo em realizar as tarefas propostas (BEATTY, 1982b; JÓZSA, 2010).

Figura 72 – Variância por tarefa - classe proficiente.



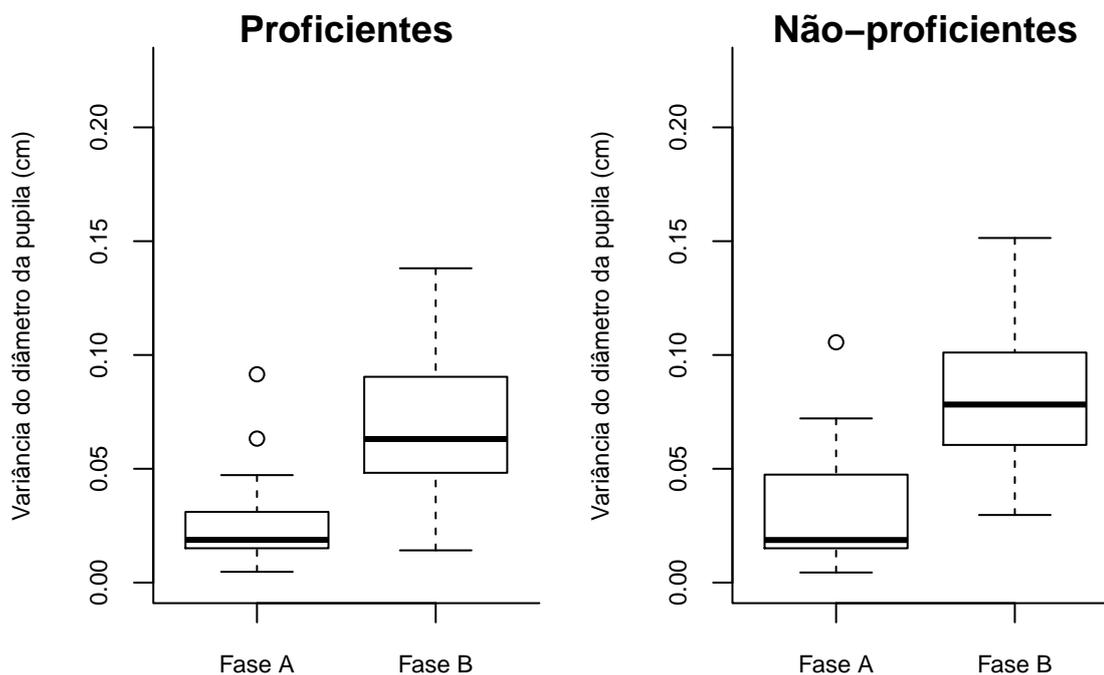
Fonte: Autor

Figura 73 – Variância por tarefa - classe não-proficiente.



Fonte: Autor

Figura 74 – Comparação das classes por fase.

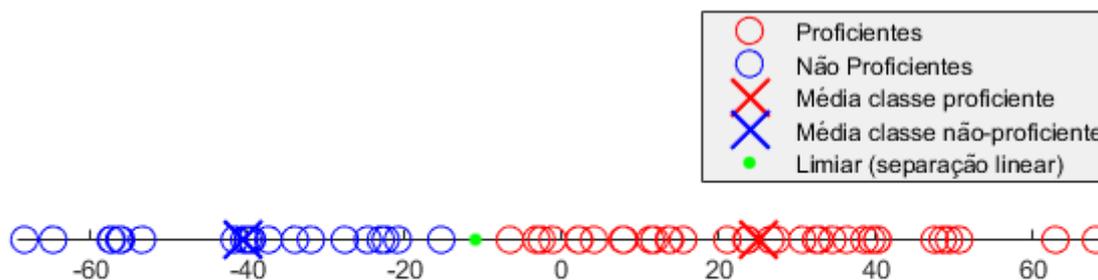


Fonte: Autor

5.2.4 Análise estatística multivariada

Com o objetivo de prever o desempenho cognitivo dos indivíduos, foi utilizada uma técnica de análise estatística multivariada para extrair características do sinal e classificar o desempenho de cada indivíduo. Como descrito na seção 5.5 deste trabalho, a partir dos dados do diâmetro pupilar coletados durante o experimento, foi iniciada a fase de extração de características e treinamento do classificador. O resultado obtido nesta etapa pode ser observado na Figura 75.

Figura 75 – Projeção dos dados de treinamento.



Taxa de Classificação:

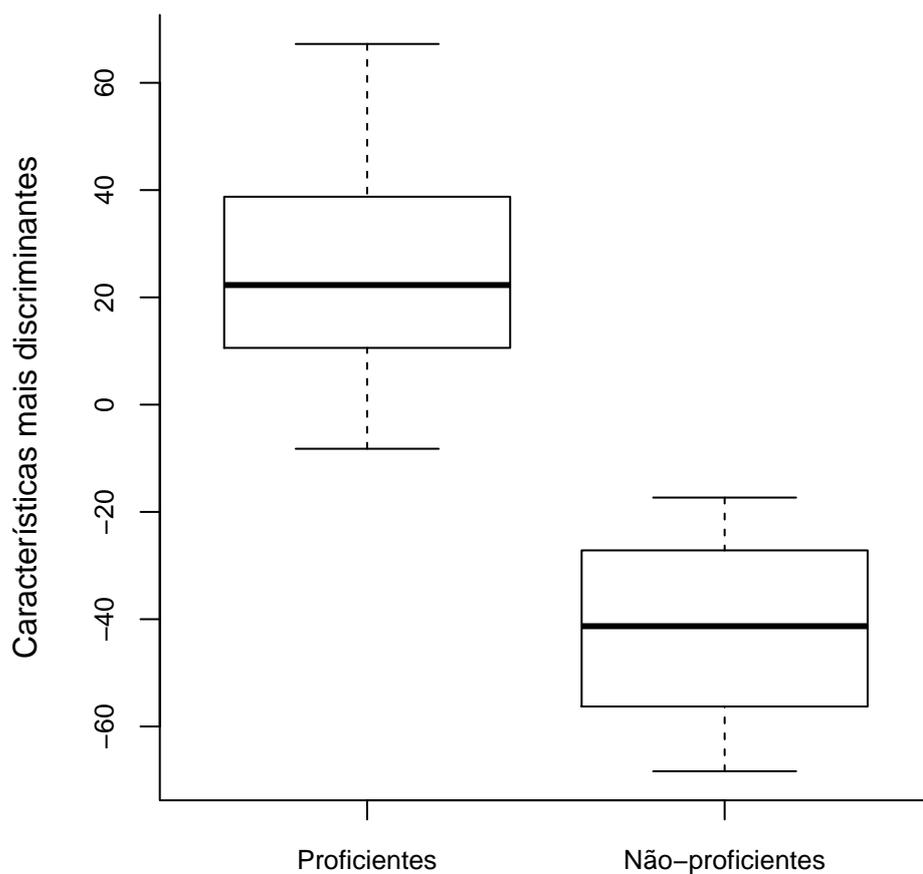
1) Distância Euclidiana da média = 100%

2) Linear = 100%

Fonte: Autor

Uma outra maneira de analisar os dados de treinamento pode ser feita pela dispersão dos dados, como mostra a Figura 76 em analogia aos demais resultados das figuras anteriores. Desta maneira não é possível ver a posição de cada variável, mas facilita a análise quando existem muitas variáveis, deixando mais evidente quais as regiões de maior agrupamento sem poluir o gráfico com sobreposição dos dados.

Figura 76 – Dispersão dos dados de treinamento.



Fonte: Autor

Para testar o classificador, foi realizada uma validação cruzada utilizando o método *k*-fold (BENGIO; GRANDVALET, 2004), onde é reservado um subconjunto de dados para testar a acurácia do classificador após a fase de treinamento.

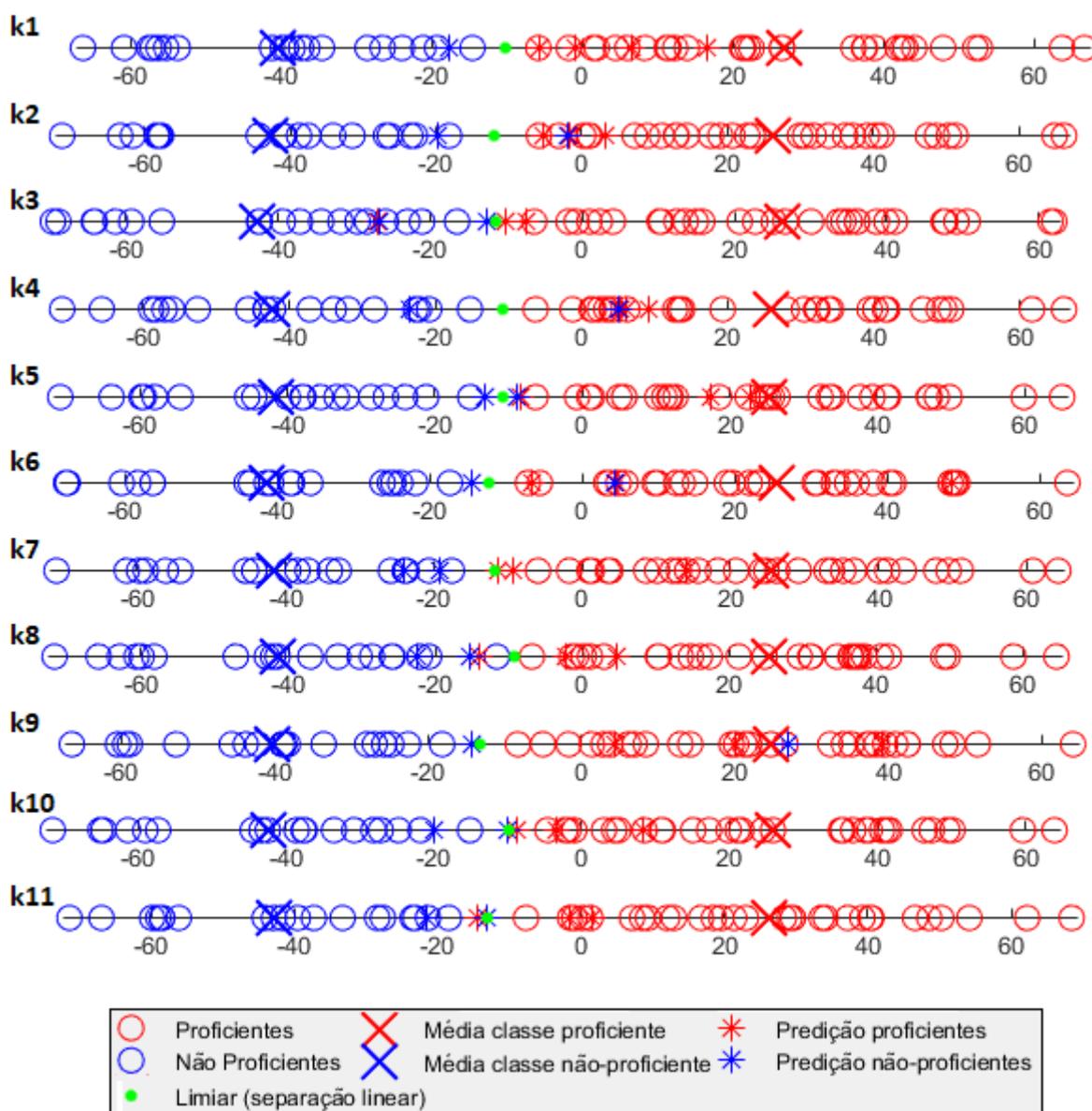
O número de subconjuntos utilizados para a etapa de validação foi calculado encontrando os denominadores que dividem o número de participantes, de modo que se possa criar subconjuntos iguais e exclusivos. Neste caso, 5 e 11. Então para gerar um número maior de testes, foi utilizado a opção de criar 11 subconjuntos com 5 indivíduos cada.

Os indivíduos de cada subconjunto foram selecionados aleatoriamente de acordo com coeficiente de dimensão de cada classe, ou seja, como a base de dados possui 34 indivíduos proficientes e 21 não-proficientes, cada subconjunto foi projetado para ter 3 indivíduos profici-

entes e 2 não-proficientes (34/11 e 21/11), com exceção do 11º subconjunto que foi composto pela sobra desta distribuição, com 4 indivíduos proficientes e 1 não-proficiente.

Cada um dos 11 subconjuntos de validação foi testado e o resultado obtido pode ser observado na projeção da validação cruzada e na mensuração dos classificadores, apresentados respectivamente na Figura 77 e na Tabela 7.

Figura 77 – Projeção da validação cruzada.



Fonte: Autor

Nota: Cada linha, expressa pelos subconjuntos k1, k2, k3, ..., k11, apresenta um teste de validação cruzada.

Tabela 7 – Tabela de acurácia da validação cruzada por método.

| Subconjunto | Distância Euclidiana da Média | Separação Linear |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| k1 | 100% | 100% |
| k2 | 60% | 80% |
| k3 | 80% | 80% |
| k4 | 80% | 80% |
| k5 | 80% | 80% |
| k6 | 60% | 80% |
| k7 | 80% | 100% |
| k8 | 80% | 80% |
| k9 | 80% | 80% |
| k10 | 80% | 100% |
| k11 | 80% | 80% |
| Acurácia total | 78,18% | 85,45% |
| Desvio padrão | 10,79% | 09,34% |

Fonte: Autor

Nota: Os dados apresentados nesta tabela indicam as taxas de acertos de cada classificador observadas em cada um dos testes da etapa de validação cruzada.

A classificação dos indivíduos também foi realizada separando os dados da fase de memorização, dos dados da fase de verbalização da resposta. A Tabela 8 apresenta a acurácia de classificação em cada fase.

Tabela 8 – Acurácia de classificação por fase.

| Fase | Distância Euclidiana da Média | Separação Linear |
|-------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Fase A | 64% | 54% |
| Fase B | 74,55% | 80% |

Fonte: Autor

Nota: A fase A apresenta o resultado da classificação utilizando apenas os dados da fase de memorização e a fase B apresenta o resultado da classificação utilizando os dados da fase de verbalização da resposta.

A medição da acurácia na classificação por fase foi realizada para verificar se existe algum fator na fase de memorização que indique o erro do indivíduo antes mesmo da verbalização da resposta. Nesta etapa levantou-se a hipótese de que o indivíduo pudesse apresentar uma determinada reação pupilar que indicasse seu erro ainda na fase de memorização. No entanto, a classificação utilizando apenas os dados da fase de memorização apresentou acurácia muito baixa, o que indica que essa fase não apresenta variações pupilares relevantes para a identificação de indivíduos proficientes e não-proficientes.

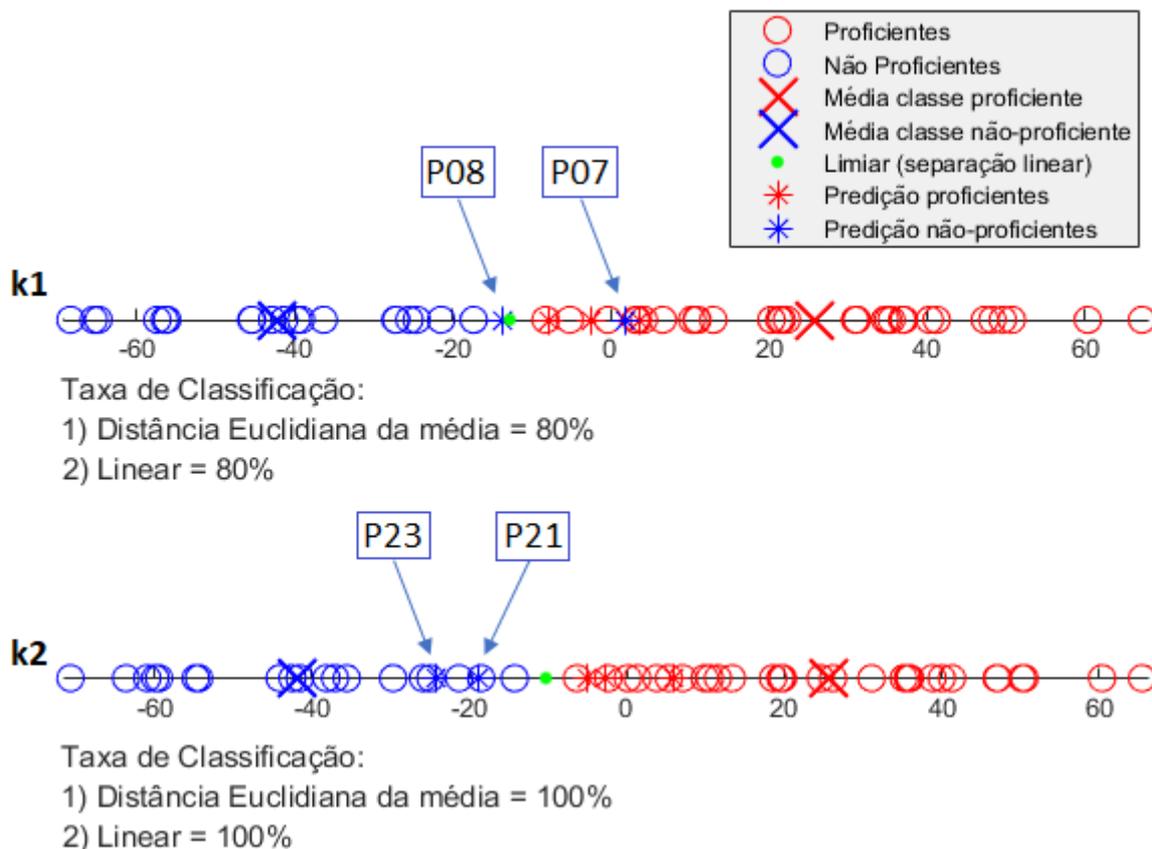
Além da avaliação por fase, foi feita uma análise na projeção dos dados para identificar os erros do classificador. Nesta etapa foi observado que em alguns erros o indivíduo projetado na classe errada estava bastante próximo da fronteira da classe certa.

Como o critério para definir se um participante é proficiente foi determinado pela quantidade de acertos de cada participante, fixado em acertar 100% das 80 respostas, alguns participantes que também tiveram um bom desempenho, acertando 79 das 80 respostas, foram classificados como não-proficientes. Com isso, levantou-se a hipótese de que esses participantes pudessem estar dificultando o processo de classificação pela semelhança de desempenho. Então foram selecionados 2 novos conjuntos de validação para observar se existe alguma diferença.

Nestes 2 novos conjuntos foram selecionados 3 participantes proficientes aleatoriamente (22, 44, 50) e propositalmente os 2 melhores e os 2 piores participantes classificados como não-proficientes (P07, P08) e (P21 e P23) respectivamente, gerando o conjunto $k1 = (22, 44, 50, 07, 08)$ e o conjunto $k2 = (22, 44, 50, 21, 23)$.

Estes novos conjuntos foram processados com o mesmo método utilizado para fazer a validação cruzada. E o resultado obtido pode ser visto na Figura 78.

Figura 78 – Comparação de não-proficientes com desempenho distinto.



Fonte: Autor

Como pode-se observar na Figura 78, o classificador acertou 100% dos indivíduos selecionados no conjunto $k2$, mas teve dificuldade para classificar os indivíduos com desempenho

semelhante, selecionados no conjunto $k1$. Observe que o participante P08 foi classificado como não-proficiente, mas a sua projeção ficou muito próxima da fronteira que divide as classes. Já o participante P07 foi classificado como proficiente (classificador errado), com sua projeção levemente dentro da fronteira que separa as classes.

Este teste confirma a suspeita de que os participantes P07 e P08 estivessem próximos da fronteira de separação de classes. E isso mostra que o método de análise estatística multivariada utilizado para classificar o desempenho dos indivíduos é eficiente e que a taxa de acerto observada na validação global só não é maior porque o desempenho de alguns participantes não-proficientes é muito próximo do desempenho dos participantes proficientes.

5.3 DISCUSSÃO

A análise da variância pupilar apresentou pequenas diferenças entre as classes, fornecendo alguns indícios que pudessem indicar o desempenho do indivíduo. No entanto, descobriu-se neste trabalho que não é possível determinar o desempenho diretamente pelo índice de variância pupilar, pois existem diversos fatores que podem contribuir para o aumento da dilatação pupilar.

Um destes fatores é o cansaço mental, que conforme análise do perfil dos participantes, mostra que os participantes cansados apresentaram variância média 27% maior do que os participantes não cansados, mas em contrapartida, obtiveram melhor desempenho no teste, contrariando a ideia de que quanto maior a variância pupilar, maior foi a dificuldade do participante.

Os problemas enfrentados no experimento preliminar para classificar o desempenho foram superados com a utilização da análise estatística multivariada. O método de extração de características e classificação com PCA + MLDA apresentou bons resultados.

Embora o classificador projetado tenha encontrado algumas dificuldades devido à proximidade de desempenho de alguns indivíduos, foi possível perceber que este método funcionaria bem em testes cognitivos mais complexos, onde a diferença de desempenho fosse mais evidente entre os participantes.

A utilização e comparação de dois critérios de classificação também trouxeram bons resultados. Como visto nos dados apresentados, o classificador Linear apresentou melhor acurácia em todos os testes realizados, 85,45% contra 78,18% do classificador que utiliza a distância euclidiana da média. Essa diferença se dá pelo espalhamento das variáveis no vetor discriminante, quem em alguns casos deslocaram a média da classe em direção às variáveis das extremidades do vetor.

6 CONCLUSÃO

A investigação da relação entre processo cognitivo e a reatividade do sistema nervoso percebida pela variação do diâmetro pupilar permitiu uma melhor compreensão da influência do sistema cognitivo sobre os órgãos autônomos do sistema nervoso, particularmente sobre as reações apresentadas por meio de constrições e dilatações pupilares. O estudo mostrou que a pupila é um indicador sensível ao esforço mental, mas que existem diversas variáveis intrínsecas a cada indivíduo que pode influenciar a leitura do sinal pupilar.

Mais especificamente, percebeu-se nos experimentos realizados que algumas variáveis de confusão podem ser atenuadas controlando a luminosidade do ambiente de aplicação dos testes e o tempo de duração das tarefas, permitindo desta forma, que todos os indivíduos sejam avaliados sob as mesmas condições. Entretanto, observou-se que as variáveis intrínsecas ao estado físico de cada indivíduo, como o cansaço físico e mental, os reflexos emocionais, o tempo sem se alimentar e o uso de medicamentos podem dificultar a análise dos dados inserindo estímulos somáticos ao controle de diâmetro da pupila.

Nesta dissertação, foram realizados 2 experimentos cognitivos, que ao todo coletou o sinal pupilar de 88 indivíduos, sendo 33 no experimento preliminar com tarefas de contagem cognitiva e 55 no experimento subsequente com tarefas de memorização e operações matemáticas. Em ambos os experimentos foi possível perceber aumento no índice de variância pupilar à medida que se aumentava a dificuldade das tarefas. No entanto, não foi possível classificar o desempenho dos indivíduos baseando-se apenas na variância do sinal pupilar, como proposto originalmente no experimento preliminar, que utilizou os índices de variância para alimentar o sistema de regressão polinomial.

Extraíu-se desta investigação que a variância do diâmetro da pupila indica o esforço cognitivo, mas existe uma linha tênue entre esforço cognitivo e desempenho cognitivo. O esforço cognitivo é um indício de que o indivíduo apresentou dificuldade para realizar a tarefa proposta, mas não é conclusivo, pois mesmo apresentando dificuldade, o indivíduo ainda pode obter êxito na resolução da tarefa e conseqüentemente apresentar bom desempenho. Neste contexto, foi detectado com a análise da variância pupilar que alguns participantes com coeficientes de variância semelhantes possuíam descrições do sinal bastante distintas se observadas no domínio do tempo, o que indica que determinar o desempenho cognitivo unicamente através da variância pupilar pode ser uma simplificação exagerada deste fenômeno.

Observada a necessidade de analisar a descrição do sinal, foi implementada uma técnica de análise estatística multivariada que utiliza Análise de Componentes Principais (PCA) e Aná-

lise de Discriminantes Lineares de Máxima incerteza (MLDA). Com esta técnica foi possível contornar os fatores de confusão causados pela sumarização dos dados em um único coeficiente de variância, permitindo diferenciar os indivíduos pela descrição do sinal como um todo. A aplicação do método PCA permitiu extrair as características mais expressivas de cada observação e a aplicação do método MLDA permitiu extrair as características mais discriminantes do sinal coletado, compondo um conjunto de treinamento que maximiza a separabilidade entre as classes e minimiza a variabilidade dentro da classe. Ao implementar esta codificação obteve-se êxito na classificação dos indivíduos, com uma taxa de acurácia de 78,18% no classificador baseado na distância euclidiana da média e 85,45% no classificador baseado no limiar de separação entre classes.

A partir desta dissertação, vislumbram-se as seguintes possibilidades como trabalhos futuros:

- a) Implementar codificação estatística multivariada ao sinal pupilar adquirido no experimento preliminar (contagem cognitiva);
- b) Aprofundar os estudos sobre as variáveis que influenciam o sinal pupilar;
- c) Investigar as reações cognitivas por meio de sinais pupilares durante tarefas de aprendizagem;
- d) Ampliar a pesquisa para outros problemas mais complexos e/ou de outras áreas para aprimorar e difundir os métodos utilizados para análise do sinal pupilar como um todo.

REFERÊNCIAS

- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics**, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010.
- ADOLPHS, R. A landmark study finds that when we look at sad faces, the size of the pupil we look at influences the size of our own pupil. **Social Cognitive and Affective Neuroscience**, Oxford University Press, v. 1, n. 1, p. 3–4, 2006.
- AHERN, S.; BEATTY, J. 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, E.; TELGER, T. **The pupil**. New York: Springer, 1985.
- ALLARD, E. S.; WADLINGER, H. A.; ISAACOWITZ, D. M. Positive gaze preferences in older adults: assessing the role of cognitive effort with pupil dilation. **Aging, Neuropsychology, and Cognition**, Taylor & Francis, v. 17, n. 3, p. 296–311, 2010.
- ALLISON, R. S.; EIZENMAN, M.; CHEUNG, B. S. Combined head and eye tracking system for dynamic testing of the vestibular system. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, IEEE, v. 43, n. 11, p. 1073–1082, 1996.
- ASLIN, R. N.; MCMURRAY, B. Automated corneal-reflection eye tracking in infancy: Methodological developments and applications to cognition. **Infancy**, Taylor & Francis, v. 6, n. 2, p. 155–163, 2004.
- BABILONI, C. et al. Fundamentals of electroencefalography, magnetoencefalography, and functional magnetic resonance imaging. **International review of neurobiology**, Elsevier, v. 86, p. 67–80, 2009.
- BATTY, M.; TAYLOR, M. J. Early processing of the six basic facial emotional expressions. **Cognitive Brain Research**, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 613–620, 2003.
- BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. **Neurociências: desvendando o sistema nervoso**. São Paulo: Artmed Editora, 2016.
- BEATTY, J. Phasic not tonic pupillary responses vary with auditory vigilance performance. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 19, n. 2, p. 167–172, 1982.
- _____. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. **Psychological bulletin**, American Psychological Association, v. 91, n. 2, p. 276, 1982.
- BEATTY, J.; KAHNEMAN, D. Pupillary changes in two memory tasks. **Psychonomic Science**, Springer, v. 5, n. 10, p. 371–372, 1966.

BEATTY, J.; LUCERO-WAGONER, B. The pupillary system. **Handbook of psychophysiology**, v. 2, p. 142–162, 2000.

BENGIO, Y.; GRANDVALET, Y. No unbiased estimator of the variance of k-fold cross-validation. **Journal of machine learning research**, v. 5, n. Sep, p. 1089–1105, 2004.

BERGSTROM, J. R.; SCHALL, A. **Eye tracking in user experience design**. [S.l.]: Elsevier, 2014.

BOERSMA, F. et al. Effects of arithmetic problem difficulty on pupillary dilation in normals and educable retardates. **Journal of Experimental Child Psychology**, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 142–155, 1970.

BRADLEY, M. 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.

BRADSHAW, J. Pupil size as a measure of arousal during information processing. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 216, n. 5114, p. 515, 1967.

BRADSHAW, J. L. Load and pupillary changes in continuous processing tasks. **British Journal of Psychology**, Wiley Online Library, v. 59, n. 3, p. 265–271, 1968.

_____. Pupil size and drag state in a reaction time task. **Psychonomic Science**, Springer, v. 18, n. 2, p. 112–113, 1970.

BREMNER, F. 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 and Ophthalmology, v. 53, n. 11, p. 7343–7347, 2012.

CAUSSE, M. et al. Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task. **Applied psychophysiology and biofeedback**, Springer, v. 35, n. 2, p. 115–123, 2010.

CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American statistical association**, Taylor & Francis Group, v. 74, n. 368, p. 829–836, 1979.

CLEVELAND, W. S.; DEVLIN, S. J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. **Journal of the American statistical association**, Taylor & Francis Group, v. 83, n. 403, p. 596–610, 1988.

CLUSMANN, H.; SCHALLER, C.; SCHRAMM, J. Fixed and dilated pupils after trauma, stroke, and previous intracranial surgery: management and outcome. **Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry**, BMJ Publishing Group Ltd, v. 71, n. 2, p. 175–181, 2001.

COELHO, J. G.; BROENS, M. C. **Encontro com as ciências cognitivas**: Cognição, emoção e ação. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2015.

DAMÁSIO, A. **O erro de Descartes**: emoção, razão e o cérebro humano. São Paulo: Editora Companhia das Letras, 2012.

DEMÉTRIO, C. G. B.; ZOCCHI, S. S. Modelos de regressão. **Piracicaba: ESALQ**, 2006.

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

DIONISIO, D. P. et al. Differentiation of deception using pupillary responses as an index of cognitive processing. **Psychophysiology**, Cambridge University Press, v. 38, n. 2, p. 205–211, 2001.

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

DUQUE, A.; SANCHEZ, A.; VAZQUEZ, C. Gaze-fixation and pupil dilation in the processing of emotional faces: The role of rumination. **Cognition and Emotion**, Taylor & Francis, v. 28, n. 8, p. 1347–1366, 2014.

EBISAWA, Y. 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, Y.; 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.], 1993. p. 1268–1269.

EINHÄUSER, W.; KOCH, C.; CARTER, O. L. Pupil dilation betrays the timing of decisions. **Frontiers in human neuroscience**, Frontiers Media SA, v. 4, 2010.

EINHÄUSER, W. et al. Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 105, n. 5, p. 1704–1709, 2008.

EYSENCK, M. W.; KEANE, M. t. **Manual de Psicologia Cognitiva**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.

FABBRO, D. A. D.; THOMAZ, C. E. Contagem e Cognição Numérica: experimentos com eye-tracking. In: **Proceedings of the 4th Symposium on Knowledge Discovery, Mining and Learning**. Recife, Brazil: [s.n.], 2016. p. 186–193.

FISHER, R. A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. **Annals of human**

genetics, Wiley Online Library, v. 7, n. 2, p. 179–188, 1936.

FORSYTH, D.; PONCE, J. **Computer vision: a modern approach**. London: Prentice Hall, 2011.

FUKUDA, K. et al. Cognition, blinks, eye-movements, and pupillary movements during performance of a running memory task. **Aviation, space, and environmental medicine**, Aerospace Medical Association, v. 76, n. 7, p. C75–C85, 2005.

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

GAZZANIGA, M.; IVRY, R.; MANGUN, G. **Cognitive Neuroscience: the biology of the mind**. 4. ed. New York: W. W. Norton, 2014.

GEANGU, E. et al. Infant pupil diameter changes in response to others' positive and negative emotions. **PloS one**, Public Library of Science, v. 6, n. 11, p. e27132, 2011.

GEJJI, R. et al. Understanding the subject-specific effects of pupil dilation on iris recognition in the nir spectrum. In: IEEE. **Technologies for Homeland Security (HST), 2015 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

GERVEN, P. W. V. et al. Memory load and the cognitive pupillary response in aging. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 41, n. 2, p. 167–174, 2004.

GEVA, R. et al. Alerting, orienting or executive attention networks: differential patterns of pupil dilations. **Frontiers in behavioral neuroscience**, Frontiers Media SA, v. 7, 2013.

GOLDINGER, S. D.; PAPESH, M. H. Pupil dilation reflects the creation and retrieval of memories. **Current Directions in Psychological Science**, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 21, n. 2, p. 90–95, 2012.

GOMES, C. A.; MONTALDI, D.; MAYES, A. The pupil as an indicator of unconscious memory: Introducing the pupil priming effect. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 52, n. 6, p. 754–769, 2015.

GRANHOLM, E. et al. Pupillary responses index cognitive resource limitations. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 33, n. 4, p. 457–461, 1996.

GRAUR, S.; SIEGLE, G. Pupillary motility: bringing neuroscience to the psychiatry clinic of the future. **Current neurology and neuroscience reports**, Springer, v. 13, n. 8, p. 365, 2013.

GREDEBÄCK, G. et al. Individual differences in face processing: Infants' scanning patterns and pupil dilations are influenced by the distribution of parental leave. **Infancy**, Wiley Online Library, v. 17, n. 1, p. 79–101, 2012.

GREDEBÄCK, G.; MELINDER, A. Teleological reasoning in 4-month-old infants: pupil dilations and contextual constraints. **PLoS One**, Public Library of Science, v. 6, n. 10, p. e26487, 2011.

GROSS, J. J. Emotion regulation. **Handbook of emotions**, v. 3, p. 497–513, 2008.

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

GUESTRIN, E. D.; EIZENMAN, M. 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.

HANSEN, D. W.; JI, Q. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, IEEE, v. 32, n. 3, p. 478–500, 2010.

HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. Algorithm as 136: A k-means clustering algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)**, JSTOR, v. 28, n. 1, p. 100–108, 1979.

HARTMANN, M.; FISCHER, M. H. Pupillometry: the eyes shed fresh light on the mind. **Current Biology**, Elsevier, v. 24, n. 7, p. R281–R282, 2014.

HAYHOE, M.; BALLARD, D. Eye movements in natural behavior. **Trends in cognitive sciences**, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 188–194, 2005.

HEAVER, B.; HUTTON, S. B. Keeping an eye on the truth? pupil size changes associated with recognition memory. **Memory**, Taylor & Francis, v. 19, n. 4, p. 398–405, 2011.

HEBB, D. O. **The organization of behavior: a neuropsychological theory**. London: Psychology Press, 2005.

HERPERS, R. et al. Edge and keypoint detection in facial regions. In: IEEE. **Automatic Face and Gesture Recognition, 1996. Proceedings of the Second International Conference on**. [S.l.], 1996. p. 212–217.

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

_____. The role of pupil size in communication. **Scientific American**, v. 233, n. 5, p. 110–2, 1975.

HESS, E. H.; PETROVICH, S. B. Pupillary behavior in communication. **Nonverbal behavior and communication**, Psychology Press Hobokon, p. 327–348, 1987.

HESS, E. H.; POLT, J. 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.

_____. 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.

_____. Reply to “critique of a pupillary response experiment” by roger p. dooley and donald j. lehr. **Perceptual and motor skills**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 25, n. 2, p. 659–660, 1967.

HOFLE, M. et al. You can see pain in the eye: pupillometry as an index of pain intensity under different luminance conditions. **International journal of psychophysiology**, Elsevier, v. 70, n. 3, p. 171–175, 2008.

HUETTEL, S. A.; SONG, A. W.; MCCARTHY, G. **Functional magnetic resonance imaging**. [S.l.]: Sinauer Associates Sunderland, 2004. v. 1.

HYÖNÄ, J.; TOMMOLA, J.; ALAJA, A.-M. Pupil dilation as a measure of processing load in simultaneous interpretation and other language tasks. **The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 48, n. 3, p. 598–612, 1995.

IBANEZ, V. B.; YANO, V.; ZIMMER, A. Automatic pupil size measurement based on region growth. In: IEEE. **Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2012 ISSNIP**. [S.l.], 2012. p. 1–4.

JADUE, J. et al. Web user click intention prediction by using pupil dilation analysis. In: IEEE. **Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2015 IEEE/WIC/ACM International Conference on**. [S.l.], 2015. v. 1, p. 433–436.

JAMES, W. What is an emotion? **Mind**, JSTOR, v. 9, n. 34, p. 188–205, 1884.

JEPMA, M.; NIEUWENHUIS, S. Pupil diameter predicts changes in the exploration–exploitation trade-off: Evidence for the adaptive gain theory. **Journal of cognitive neuroscience**, MIT Press, v. 23, n. 7, p. 1587–1596, 2011.

JOSHI, S. et al. Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. **Neuron**, Elsevier, v. 89, n. 1, p. 221–234, 2016.

JÓZSA, E. A potential application of pupillometry in web-usability research. **Periodica Polytechnica. Social and Management Sciences**, Periodica Polytechnica, Budapest University of Technology and Economics, v. 18, n. 2, p. 109, 2010.

KAHNEMAN, D. **Attention and effort**. [S.l.]: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1973. v. 1063.

_____. **Thinking, fast and slow**. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011.

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

KAHNEMAN, D.; BEATTY, J.; POLLACK, I. Perceptual deficit during a mental task. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 157, n. 3785, p. 218–219, 1967.

KAHNEMAN, D.; ONUSKA, L.; WOLMAN, R. E. Effects of grouping on the pupillary response in a short-term memory task. **The Quarterly Journal of Experimental Psychology**, Taylor & Francis, v. 20, n. 3, p. 309–311, 1968.

KAHNEMAN, D.; PEAVLER, W. S. Incentive effects and pupillary changes in association learning. **Journal of Experimental Psychology**, American Psychological Association, v. 79, n. 2p1, p. 312, 1969.

KAHNEMAN, D.; PEAVLER, W. S.; ONUSKA, L. Effects of verbalization and incentive on the pupil response to mental activity. **Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie**, University of Toronto Press, v. 22, n. 3, p. 186, 1968.

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

KAHNEMAN, D.; WRIGHT, P. 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.

KAHNEMANN, D.; BEATTY, J. Pupillary responses in a pitch-discrimination task. **Attention, Perception, & Psychophysics**, Springer, v. 2, n. 3, p. 101–105, 1967.

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

KELTNER, D.; KRING, A. M. Emotion, social function, and psychopathology. **Review of General Psychology**, Educational Publishing Foundation, v. 2, n. 3, p. 320, 1998.

KIRSCHBAUM, A. R. **Method and apparatus to measure pupil size and position**. [S.l.]: Google Patents, 1998. US Patent 5,790,235.

KLINGNER, J.; KUMAR, R.; HANRAHAN, P. Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. In: ACM. **Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications**. [S.l.], 2008. p. 69–72.

KOELEWIJN, T. et al. Pupil dilation uncovers extra listening effort in the presence of a

single-talker masker. **Ear and Hearing**, LWW, v. 33, n. 2, p. 291–300, 2012.

KORBACH, A.; BRÜNKEN, R.; PARK, B. Differentiating different types of cognitive load: a comparison of different measures. **Educational Psychology Review**, Springer, p. 1–27, 2017.

KORN, C. W.; BACH, D. R. A solid frame for the window on cognition: Modeling event-related pupil responses. **Journal of vision**, The Association for Research in Vision and Ophthalmology, v. 16, n. 3, p. 28–28, 2016.

KRALIK, J. D. et al. Techniques for chronic, multisite neuronal ensemble recordings in behaving animals. **Methods**, Elsevier, v. 25, n. 2, p. 121–150, 2001.

KUCHINSKY, S. E. et al. Pupil size varies with word listening and response selection difficulty in older adults with hearing loss. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 50, n. 1, p. 23–34, 2013.

LAENG, B.; SIROIS, S.; GREDEBÄCK, G. Pupillometry: a window to the preconscious? **Perspectives on psychological science**, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 7, n. 1, p. 18–27, 2012.

LANATÀ, A. et al. Eye tracking and pupil size variation as response to affective stimuli: a preliminary study. In: IEEE. **Pervasive computing technologies for healthcare (pervasivehealth), 2011 5th international conference on**. [S.l.], 2011. p. 78–84.

LEE, J. et al. Evaluation of the methods for pupil size estimation: on the perspective of autonomic activity. In: IEEE. **Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS'04. 26th Annual International Conference of the IEEE**. [S.l.], 2004. v. 1, p. 1501–1504.

MAGLIERO, A. Pupil dilations following pairs of identical and related to-be-remembered words. **Memory & Cognition**, Springer, v. 11, n. 6, p. 609–615, 1983.

MARIEB, E. N.; WILHELM, P. B.; MALLAT, J. **Anatomia humana**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

MARSHALL, S. P. **Method and apparatus for eye tracking and monitoring pupil dilation to evaluate cognitive activity**. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,090,051.

MILL, R. D.; O'CONNOR, A. R.; DOBBINS, I. G. Pupil dilation during recognition memory: Isolating unexpected recognition from judgment uncertainty. **Cognition**, Elsevier, v. 154, p. 81–94, 2016.

MORATO, E. M. **Linguagem e cognição**: as reflexões de ls vygotsky sobre a ação reguladora da linguagem. São Paulo: Plexus Editora, 2002.

MORIMOTO, C. H. et al. Pupil detection and tracking using multiple light sources. **Image and vision computing**, Elsevier, v. 18, n. 4, p. 331–335, 2000.

MURPHY, P. R. et al. Pupil diameter covaries with bold activity in human locus coeruleus. **Human brain mapping**, Wiley Online Library, v. 35, n. 8, p. 4140–4154, 2014.

NISHIYAMA, J. et al. The pupil as a possible premonitor of drowsiness. In: IEEE. **Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE**. [S.l.], 2007. p. 1586–1589.

NUTHMANN, A.; MEER, E. V. D. Time's arrow and pupillary response. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 42, n. 3, p. 306–317, 2005.

OCHSNER, K. N.; GROSS, J. J. The cognitive control of emotion. **Trends in cognitive sciences**, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 242–249, 2005.

OLSEN, A. **The tobii i-vt fixation filter**. [S.l.], 2012.

OTERO, S. C.; WEEKES, B. S.; HUTTON, S. B. Pupil size changes during recognition memory. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 48, n. 10, p. 1346–1353, 2011.

PAPESH, M. H.; GOLDINGER, S. D. Pupil-blah-metry: Cognitive effort in speech planning reflected by pupil dilation. **Attention, Perception, & Psychophysics**, Springer, v. 74, n. 4, p. 754–765, 2012.

PARROTT, W. G. Beyond hedonism: Motives for inhibiting good moods and for maintaining bad moods. Prentice-Hall, Inc, 1993.

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

PAVLOV, I. P.; ANREP, G. V. **Conditioned reflexes**. [S.l.]: Courier Corporation, 2012.

PEAVLER, W. S. Pupil size, information overload, and performance differences. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 5, p. 559–566, 1974.

PHELPS, E. A. Emotion and cognition: insights from studies of the human amygdala. **Annu. Rev. Psychol.**, Annual Reviews, v. 57, p. 27–53, 2006.

PINHEIRO, A. P. et al. **Desenvolvimento de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em técnicas de visão computacional**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

PINHEIRO, J. **Estatística Básica**. [S.l.]: Elsevier Acadêmico, 2009. (Em Portuguese do Brasil). ISBN 8535230300,9788535230307.

POLT, J. M.; HESS, E. H. Changes in pupil size to visually presented words. **Psychonomic Science**, Springer, v. 12, n. 8, p. 389–390, 1968.

POOLE, A.; BALL, L. 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, D. et al. **Neurociências**. 4. ed. São Paulo: Artmed Editora, 2010.

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

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

SANTIS, A. D.; IACOVIELLO, D. Optimal segmentation of pupillometric images for estimating pupil shape parameters. **Computer methods and programs in biomedicine**, Elsevier, v. 84, n. 2, p. 174–187, 2006.

SCHLUROFF, M. Pupil responses to grammatical complexity of sentences. **Brain and language**, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 133–145, 1982.

SCHWEITZER, H.; DENG, R.; ANDERSON, R. F. A dual-bound algorithm for very fast and exact template matching. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, IEEE, v. 33, n. 3, p. 459–470, 2011.

SIEGLE, G. J.; ICHIKAWA, N.; STEINHAEUER, S. Blink before and after you think: blinks occur prior to and following cognitive load indexed by pupillary responses. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 5, p. 679–687, 2008.

SIROIS, S.; BRISSON, J. Pupillometry. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science**, Wiley Online Library, v. 5, n. 6, p. 679–692, 2014.

SIROIS, S.; JACKSON, I. R. Pupil dilation and object permanence in infants. **Infancy**, Wiley Online Library, v. 17, n. 1, p. 61–78, 2012.

SOLOMON, R. C. The philosophy of emotions. **Handbook of emotions**, v. 3, p. 3–17, 2008.

SPRINTHALL, R. C. **Basic statistical analysis**. [S.l.]: Allyn & Bacon, 2003. (International series of monographs on physics).

SQUIRE, L. R. Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. **Neurobiology of learning and memory**, Elsevier, v. 82, n. 3, p. 171–177, 2004.

STANNERS, R. F. et al. The pupillary response as an indicator of arousal and cognition. **Motivation and Emotion**, Springer, v. 3, n. 4, p. 319–340, 1979.

STEENBERGEN, H. V.; BAND, G. P.; HOMMEL, B. Threat but not arousal narrows attention: evidence from pupil dilation and saccade control. **Frontiers in Psychology**, Frontiers Media SA, v. 2, 2011.

STEIDTMANN, D.; INGRAM, R. E.; SIEGLE, G. J. Pupil response to negative emotional information in individuals at risk for depression. **Cognition and Emotion**, Taylor & Francis, v. 24, n. 3, p. 480–496, 2010.

STEINHAEUER, S. R.; HAKEREM, G. The pupillary response in cognitive psychophysiology and schizophrenia. **Annals of the New York Academy of Sciences**, Wiley Online Library, v. 658, n. 1, p. 182–204, 1992.

STEINHAEUER, S. R. et al. Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing. **International journal of psychophysiology**, Elsevier, v. 52, n. 1, p. 77–86, 2004.

TENORIO, E. Z.; THOMAZ, C. E. 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.

THOMAS, L. E.; LLERAS, A. Moving eyes and moving thought: On the spatial compatibility between eye movements and cognition. **Psychonomic bulletin & review**, Springer, v. 14, n. 4, p. 663–668, 2007.

THOMAZ, C. 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.

TILES, M. **The philosophy of set theory: an historical introduction to cantor's paradise**. New York: Courier Corporation, 2004.

TOBII TECHNOLOGY. **User Manual - Tobii Studio**. 3.2. ed. [S.l.], 2012. Rev A.

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

TOKUDA, Y.; NAKAZATO, N.; STEIN, G. Pupillary evaluation for differential diagnosis of coma. **Postgraduate medical journal**, The Fellowship of Postgraduate Medicine, v. 79, n. 927, p. 49–51, 2003.

TOOBY, J.; COSMIDES, L. The evolutionary psychology of the emotions and their relationship to internal regulatory variables. **Handbook of emotions**, v. 3, p. 114–148, 2008.

TULVING, E. Episodic memory: from mind to brain. **Annual review of psychology**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 53, n. 1, p. 1–25, 2002.

TULVING, E. et al. Episodic and semantic memory. **Organization of memory**, v. 1, p. 381–403, 1972.

VARGAS, D. B. **Pupilometria dinâmica e reação à pilocarpina em pacientes com Doença de Chagas**. Brasília: Universidade de Brasília, 2016.

VERNEY, S. P.; GRANHOLM, E.; MARSHALL, S. P. Pupillary responses on the visual backward masking task reflect general cognitive ability. **International Journal of Psychophysiology**, Elsevier, v. 52, n. 1, p. 23–36, 2004.

VÕ, M. L.-H. et al. The coupling of emotion and cognition in the eye: Introducing the pupil old/new effect. **Psychophysiology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 1, p. 130–140, 2008.

VOLKE, H.-J. et al. On-coupling and off-coupling of neocortical areas in chess experts and novices as revealed by evoked eeg coherence measures and factor-based topological analysis—a pilot study. **Journal of Psychophysiology**, Hogrefe & Huber Publishers, v. 16, n. 1, p. 23, 2002.

WANG, C.-A.; MUNOZ, D. P. A circuit for pupil orienting responses: implications for cognitive modulation of pupil size. **Current opinion in neurobiology**, Elsevier, v. 33, p. 134–140, 2015.

WHITTLESEA, B. W.; PRICE, J. R. Implicit/explicit memory versus analytic/nonanalytic processing: Rethinking the mere exposure effect. **Memory & Cognition**, Springer, v. 29, n. 2, p. 234–246, 2001.

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

ZEKVELD, A. A.; KRAMER, S. E.; FESTEN, J. M. Cognitive load during speech perception in noise: the influence of age, hearing loss, and cognition on the pupil response. **Ear and hearing**, LWW, v. 32, n. 4, p. 498–510, 2011.

ZHANG, Y.; BULLING, A.; GELLERSEN, H. Discrimination of gaze directions using low-level eye image features. In: ACM. **Proceedings of the 1st international workshop on pervasive eye tracking & mobile eye-based interaction**. [S.l.], 2011. p. 9–14.

ZHANG, Y. et al. A new eye location method based on ring gabor filter. In: IEEE. **Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2008. p. 301–305.

APÊNDICE A – TERMO DE CONSENTIMENTO

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

Pesquisadores Responsáveis: Carlos Eduardo Thomaz e Rafael Nobre Orsi
Endereço: Avenida Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Sala K5-01
CEP: 09.850-901 – São Bernardo do Campo – SP
Fone: (11) 4353-2910 ramal: 2183 - E-mail: cet@fei.edu.br; rafaelorsi@fei.edu.br

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado(a) a participar de um projeto de pesquisa que visa observar funções cognitivas através da dilatação das pupilas. Para este estudo, você será submetido a uma série de testes cognitivos que o leve a realizar esforços mentais para solucioná-los enquanto seus movimentos oculares são registrados através de um conjunto de câmeras.

O experimento não é invasivo e o equipamento utilizado não apresenta risco algum a você.

Nesta pesquisa a aquisição de dados não tem objetivo diagnóstico. Seu nome ou o material que indique sua participação não serão disponibilizados a terceiros. O(A) Sr(a) não será identificado(a) em nenhuma publicação que possa resultar deste estudo. Para participar deste estudo você não terá nenhum custo, nem receberá qualquer vantagem financeira. Você será instruído(a) sobre o estudo em qualquer aspecto que desejar e estará livre para participar ou recusar-se a participar, podendo retirar seu consentimento ou interromper a participação a qualquer momento.

Este termo de consentimento encontra-se impresso em duas vias, sendo que uma cópia será arquivada pelo pesquisador responsável, no Laboratório de Processamento de Imagens do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Universitário FEI, em São Bernardo do Campo, e a outra será fornecida a você.

Eu, _____, RG _____, concordo de livre e espontânea vontade em participar como voluntário(a) do projeto supracitado. Declaro que fui informado(a) dos objetivos do estudo de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Recebi uma cópia deste termo de consentimento livre e esclarecido e me foi dada a oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

_____, _____ de _____ de _____.

Assinatura participante

Assinatura pesquisador

APÊNDICE B – TERMO DE CONSENTIMENTO PARA MENORES DE IDADE

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

Pesquisadores Responsáveis: Carlos Eduardo Thomaz e Rafael Nobre Orsi
Endereço: Avenida Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Sala K5-01
CEP: 09.850-901 – São Bernardo do Campo – SP
Fone: (11) 4353-2910 ramal: 2183 - E-mail: cet@fei.edu.br; rafaelorsi@fei.edu.br

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO PARA MENORES DE IDADE

Caro Responsável Legal:

Gostaríamos de obter o seu consentimento para que o(a) menor de idade sob sua responsabilidade legal possa participar como voluntário(a) da pesquisa de **Análise da capacidade cognitiva por meio de sinais pupilares**.

Este projeto de pesquisa visa observar funções cognitivas através de biosinais do sistema nervoso indicados pela variação do diâmetro das pupilas. Para este estudo, o(a) voluntário(a) será submetido a uma série de tarefas cognitivas que exigem esforço mental para serem solucionadas; enquanto isso seus movimentos oculares são registrados através de um conjunto de câmeras.

O experimento não é invasivo e o equipamento utilizado não apresenta risco algum ao voluntário.

Nesta pesquisa a aquisição de dados não tem objetivo diagnóstico. O nome ou o material que indique a participação do(a) voluntário(a) não serão disponibilizados a terceiros. O(A) voluntário(a) não será identificado(a) em nenhuma publicação que possa resultar deste estudo. Para participar deste estudo o(a) voluntário(a) não terá nenhum custo, nem receberá qualquer vantagem financeira. Você será instruído(a) sobre o estudo em qualquer aspecto que desejar e estará livre para autorizar ou recusar-se a autorizar a participação do(a) voluntário(a) sob sua responsabilidade legal, podendo retirar seu consentimento ou interromper a participação a qualquer momento.

Este termo de consentimento encontra-se impresso em duas vias, sendo que uma cópia será arquivada pelo pesquisador responsável, no Laboratório de Processamento de Imagens do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Universitário FEI, em São Bernardo do Campo, e a outra será fornecida a você.

Eu, _____, RG _____,
autorizo o menor de idade _____, RG: _____,
a participar como voluntário(a) no projeto supracitado. Declaro que fui informado(a) dos objetivos do estudo de maneira clara e detalhada e que o(a) menor de idade supracitado concorda em participar desta pesquisa de livre e espontânea vontade. Declaro ainda que recebi uma cópia deste termo de consentimento livre e esclarecido para menores de idade e me foi dada a oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

_____, _____ de _____ de _____.

Assinatura do responsável legal

Assinatura pesquisador