

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
CAMPUS GAMA – FGA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

**AVALIAÇÃO ELETROFISIOLÓGICA DO PROCESSAMENTO PERCEPTUAL DA
ILUSÃO VISUAL DE MÜLLER-LYER EM PESSOAS SAUDÁVEIS**

BRUNA CARVALHO FERNANDES

ORIENTADOR: DR. FABIO VIEGAS CAIXETA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB

FACULDADE UNB GAMA – FGA



**AVALIAÇÃO ELETROFISIOLÓGICA DO PROCESSAMENTO PERCEPTUAL DA
ILUSÃO VISUAL DE MÜLLER-LYER EM PESSOAS SAUDÁVEIS**

BRUNA CARVALHO FERNANDES

ORIENTADOR: FABIO VIEGAS CAIXETA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA BIOMÉDICA

PUBLICAÇÃO: 189A/2024

BRASÍLIA/DF, AGOSTO DE 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE UNB GAMA - FGA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**AVALIAÇÃO ELETROFISIOLÓGICA DO PROCESSAMENTO PERCEPTUAL DA
ILUSÃO VISUAL DE MÜLLER-LYER EM PESSOAS SAUDÁVEIS**

BRUNA CARVALHO FERNANDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

APROVADA POR:

FABIO VIEGAS CAIXETA
(ORIENTADOR)

DR. CRISTIANO JACQUES MIOSSO
(EXAMINADOR INTERNO)

DR. ISABELA VIANA RAMOS
(EXAMINADOR EXTERNO)

FICHA CATALOGRÁFICA

CARVALHO FERNANDES, BRUNA

Avaliação eletrofisiológica do processamento perceptual da ilusão visual de Müller-Lyer em pessoas saudáveis.

[Distrito Federal], 2024.

User Field page_minus_preamble = 54p., 210 x 297 mm (FGA/UnB Gama, Mestrado em Engenharia Biomédica, 2019).

Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica, Faculdade UnB Gama, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica.

- | | |
|-----------------------------|------------------|
| 1. EEG | 2. Ilusão visual |
| 3. Event-Related Potentials | 4. Müller-Lyer |

I. FGA UnB

REFERÊNCIA

Carvalho Fernandes, Bruna (2024). Avaliação eletrofisiológica do processamento perceptual da ilusão visual de Müller-Lyer em pessoas saudáveis. Dissertação de mestrado em Engenharia Biomédica, Publicação 08/2024, Programa de Pós-Graduação, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54p.

CESSÃO DE DIREITOS

Autor: Bruna Carvalho Fernandes

Título: Avaliação eletrofisiológica do processamento perceptual visual da ilusão de Müller-Lyer em pessoas saudáveis.

Grau: Mestre

Ano: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender essas cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

bruna10cf@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

RESUMO

A ilusão de Müller-Lyer é uma ilusão visual onde dois segmentos de reta de comprimento idêntico parecem ter tamanhos diferentes devido à presença de setas em suas extremidades. Essa diferença influencia a interpretação visual das distâncias relativas dos segmentos de reta e, assim, essa ilusão demonstra como a percepção visual humana pode ser influenciada pelo contexto e pela interpretação do cérebro em relação ao processamento de informações visuais. O estudo do processamento cerebral desta ilusão é muito esclarecedor para entender as dinâmicas envolvidas na extração tanto de informações visuais mais básicas (como retas, cores e contrastes) quanto mais complexas (como interpretação de perspectiva e identificação de objetos).

O sinal de eletroencefalograma é resultado da medição de potenciais elétricos na superfície da cabeça e esta técnica tem sido muito utilizada para estudar, de forma não-invasiva, a atividade cerebral associada a vários processos cognitivos. Em especial, uma aplicação do EEG que é muito útil para estudar a resposta do cérebro a estímulos é o uso de estímulos relacionados a eventos (do inglês, *event-related potentials* - ERPs. No caso do sistema visual, os ERPs permitem analisar a atividade elétrica cerebral média em resposta a diferentes estágios do processamento visual, contribuindo para a compreensão de como funciona a integração e interpretação das informações visuais pelo cérebro. Este estudo explora a dinâmica da percepção visual por meio do uso da ilusão de Müller-Lyer e das técnicas de Eletroencefalograma (EEG) e potenciais relacionados a eventos (ERPs) para entender como diferentes configurações dessa ilusão afetam a percepção dos participantes. Por meio deste trabalho foi possível melhor entender a dinâmica do processamento de informações visuais presentes na ilusão de Müller-Lyer e entender qual tipo de processamento predominante para geração do efeito ilusório, bem como quais vias estão envolvidas no processamento extra-estriatal desta ilusão. Tais resultados permitem um melhor entendimento sobre o funcionamento do sistema visual humano e, por ser uma ilusão que possui muitos estudos em primatas não-humanos e com efeito conhecidamente preservado nestes animais, permite também um melhor entendimento sobre a própria evolução biológica do sistema visual.

A metodologia envolveu a apresentação de várias versões de imagens associadas à ilusão a indivíduos saudáveis, medindo as respostas eletrofisiológicas para identificar padrões específicos de processamento visual. As imagens apresentadas consistiram na versão de Brentano da ilusão de Müller-Lyer e algumas variações desta - totalizando 12 imagens. As imagens utilizadas consistiram em variações (1) do tipo das setas centrais, (2) de direcionamento das setas das pontas e (3) de posição da seta central. Foi solicitado que os participantes olhassem as imagens durante um tempo de 20ms e indicassem se a seta/reta localizada na parte central da imagem estava dividindo as retas

em posições iguais ou não. Foram calculados tanto os ERPs brutos obtidos a partir das respostas médias dos participantes perante cada modalidade e imagem, bem como também foram feitas subtrações destes ERPs para isolar componentes cognitivos de interesse, também foram analisados os mapas de superfície (*scalp maps*) médio dos participantes ao longo do tempo e medidas comportamentais como a acurácia e o tempo de resposta médio dos participantes perante cada bloco da tarefa. Para os resultados obtidos para os ERPs brutos, em todas as modalidades de imagens foram elicitados componentes do tipo N100 e P170 no eletrodo Fz, bem como um componente N170 no eletrodo Pz e um componente N400 em todos os eletrodos. Para os resultados obtidos da subtração dos ERPs, por sua vez, não houve um processamento diferencial em nenhum dos eletrodos selecionados ao isolarmos o processamento do julgamento de uma mesma reta sob diferentes marcações centrais, no entanto, os resultados do processamento do julgamento de uma mesma posição da marcação central para as diferentes retas demonstraram uma diferença entre os sinais comparados - sobretudo, nos eletrodos parietais e occipitais. Os resultados indicaram possíveis diferenças significativas nas respostas cerebrais associadas a variações da ilusão apresentadas, destacando a influência dos aspectos geométricos no processamento perceptual e a possível prevalência do processamento do tipo *bottom-up* na via de processamento desta ilusão.

Palavras-chave: Percepção, ilusão geométrica, event-related potentials, ilusão de Müller-Lyer.

ABSTRACT

The Müller-Lyer illusion is a visual illusion in which two line segments of identical length appear to have different sizes due to the presence of arrows at their ends. This difference influences the visual interpretation of the relative distances of the line segments and, thus, this illusion demonstrates how human visual perception can be influenced by context and the brain's interpretation of visual information processing. Studying the brain's processing of this illusion is very enlightening for understanding the dynamics involved in extracting both more basic visual information (such as lines, colors and contrasts) and more complex information (such as perspective interpretation and object identification).

The electroencephalogram signal is the result of measuring electrical potentials on the surface of the head and this technique has been widely used to study, in a non-invasive way, brain activity associated with various cognitive processes. In particular, one application of EEG that is very useful for studying the brain's response to stimuli is the use of event-related potentials (ERPs). In the case of the visual system, ERPs allow the analysis of the average brain electrical activity in response to different stages of visual processing, contributing to the understanding of how the integration and interpretation of visual information by the brain works. This study explores the dynamics of visual perception through the use of the Müller-Lyer illusion and the techniques of Electroencephalogram (EEG) and event-related potentials (ERPs) to understand how different configurations of this illusion affect the participants' perception. Through this work it was possible to better understand the dynamics of the processing of visual information present in the Müller-Lyer illusion and to understand which type of processing predominates in generating the illusory effect, as well as which pathways are involved in the extra-striatal processing of this illusion. These results allow a better understanding of the functioning of the human visual system and, as it is an illusion that has been studied extensively in non-human primates and whose effect is known to be preserved in these animals, it also allows a better understanding of the biological evolution of the visual system itself. The methodology involved presenting several versions of images associated with the illusion to healthy individuals, measuring electrophysiological responses to identify specific patterns of visual processing. The images presented consisted of Brentano's version of the Müller-Lyer illusion and some variations of it - resulting in 12 images in total. The images used consisted of variations in (1) the type of central arrows, (2) the direction of the arrows at the tips and (3) the position of the central arrow. Participants were asked to look at the images for 20 ms and indicate whether the arrow/line located in the central part of the image was dividing the lines into equal positions or not. Both the raw ERPs obtained from the average responses of the participants to each modality and image were calculated, as well as subtractions of these ERPs to isolate cognitive components of

interest. The average scalp maps of the participants over time and behavioral measures such as accuracy and average response time of the participants to each block of the task were also analyzed. For the results obtained for the raw ERPs, in all image modalities, N100 and P170 components were elicited at the Fz electrode, as well as an N170 component at the Pz electrode and an N400 component at all electrodes. For the results obtained from the subtraction of the ERPs, in turn, there was no differential processing at any of the selected electrodes when we isolated the processing of the judgment of the same line under different central markings. However, the results of the processing of the judgment of the same position of the central marking for the different lines demonstrated a difference between the compared signals - especially at the parietal and occipital electrodes. The results indicated possible significant differences in the brain responses associated with variations of the illusion presented, highlighting the influence of geometric aspects on perceptual processing and the possible prevalence of bottom-up processing in the processing pathway of this illusion.

Keywords: Perception, geometric illusion, event-related potentials, Müller-Lyer illusion.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O processamento da percepção sensorial no sistema visual	1
1.2	A ilusão visual de Müller-Lyer	7
1.3	O Eletroencefalograma (EEG) e Event-related Potentials (ERPs)	9
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	18
2	MATERIAIS E MÉTODOS	19
2.1	Variações das imagens	20
2.2	Procedimento experimental e análise de dados	22
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4	CONCLUSÃO	50
	LISTA DE REFERÊNCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração das duas principais vias de processamento de informações visuais proposta por Mortimer Mishkin e Leslie Ungerleider. Imagem retirada e adaptada de Kandel, 2021. (Abreviações: NGL = Núcleo Geniculado Lateral; TM = área Temporal Medial)

Figura 2. Esquemático dos principais aspectos físicos processados em cada etapa das vias de processamento visual. Imagem baseada em Kandel, 2021. (Abreviações: NGL = Núcleo Geniculado Lateral; TM = área Temporal Medial)

Figura 3. Ilusão de Müller Lyer em sua versão clássica. Figura retirada de Deroy, 2015.

Figura 4. Ilusão de Müller Lyer na versão de Brentano. Figura retirada de Gentaz, 2004.

Figura 5. Sinal de EEG bruto. Sinal extraído do participante 1 do presente estudo.

Figura 6. Esquema ilustrativo de processo para extração de um ERP a partir do sinal do EEG. Imagem de autoria própria e feita com o sinal de um dos participantes do presente estudo.

Figura 7. Ilustração do resultado de um experimento de ERP evidenciando o componente N170 clássico. Este resultado foi extraído do eletrodo PO8 (parieto-occipital do lado direito), com a referência correspondendo à média de todos os eletrodos. Imagem adaptada de Jonas, 2016.

Figura 8. Ilustração do resultado de um experimento de ERP evidenciando o componente N170 alterado em caso de pais de filhos autistas. Imagem adaptada de Dawson, 2005.

Figura 9. Versões da ilusão apresentadas aos participantes (versões somente da posição central).

Figura 10. Variação 1 com as duas variações da posição central. Na primeira imagem está ilustrada a modalidade controle e na segunda está ilustrada a modalidade da ilusão.

Figura 11. Variação 3 com as 4 posições das setas das pontas. Nas imagens da esquerda estão ilustradas as retas com as pontas das setas alinhadas e nas imagens da direita estão ilustradas as retas com as pontas das setas espelhadas.

Figura 12. Todas as variações de imagens apresentadas aos participantes.

Figura 13. Ilustração de todas as distâncias consideradas para o posicionamento das retas centrais para as retas com setas espelhadas.

Figura 14. Ilustração de todas as distâncias consideradas para o posicionamento das setas centrais para as retas com setas alinhadas.

Figura 15. Ilustração mostrando as posições dos eletrodos na touca EasyCap. Figura reproduzida de Bastos et al, 2016.

Figura 16. Foto do setup utilizado para aquisição dos sinais durante a apresentação dos estímulos. Autoria própria.

Figura 17. Pipeline da apresentação de cada trial de apresentação dos estímulos aos participantes. Autoria própria.

Figura 18. Esquema dos passos para processamento dos dados e extração dos ERPs. Autoria própria.

Figura 19. Taxa de acerto das imagens com as posições do meio marcadas. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 20. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “fora”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 21. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “dentro”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 22. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “direita”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 23. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com as setas apontadas para a “esquerda”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 24. Tempo de resposta médio das imagens com as posições do meio marcadas. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 25. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “fora”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 26. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “dentro”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 27. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “direita”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 28. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “esquerda”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura.

Figura 29. ERPs brutos das imagens com meio verdadeiro para os eletrodos da linha média.

Figura 30. ERPs brutos das imagens com setas espelhadas para as diferentes posições fora do meio.

Figura 31. ERPs brutos das imagens com setas alinhadas para as diferentes posições fora do meio.

Figura 32. Mapa de superfície para representando a ativação dos eletrodos ao longo do período de exibição das imagens com marcação das posições do meio para cada modalidade de retas (espelhadas e alinhadas).

Figura 33. Mapa de superfície para representando a ativação dos eletrodos ao longo do período de exibição das imagens com marcação das posições fora do meio de cada modalidade de retas (espelhadas e alinhadas).

Figura 34. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as diferentes posições das retas com setas espelhadas em relação as mesmas retas seccionadas ao meio. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

Figura 35. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as diferentes posições das retas com setas alinhadas em relação as mesmas retas seccionadas ao meio. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

Figura 36. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as posições do meio das retas com setas alinhadas em relação a mesma posição das retas com setas espelhadas. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

Figura 37. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as posições a mesma posição fora do meio (equivalente ao ponto: M + C/20) das retas com setas alinhadas em relação a mesma posição das retas com setas espelhadas. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACOES

EEG	Eletroencefalograma.
ERP	Potencial relacionado a eventos (event-related potencial).
MEG	Magnetoencefalografia.
NGL	Núcleo Geniculado Lateral.
N170	Componente de ERP que reflete processos de reconhecimento de faces humanas.
N400	Componente de ERP que reflete aspectos do processamento de linguagem.
P300	Componente de ERP que reflete processos de tomada de decisão.
TDAH	Transtorno do déficit de ateno e hiperatividade.
TEA	Transtorno do espectro autista.
TM	Area temporal medial.
V1	Córtex visual primário.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O PROCESSAMENTO DA PERCEPÇÃO SENSORIAL NO SISTEMA VISUAL

As sensações humanas e a percepção são fenômenos complexos que desempenham um papel fundamental na nossa experiência diária e na maneira como interagimos com o mundo ao nosso redor. As sensações - como o tato, o paladar, a visão e o som - são processos pelos quais os nossos sentidos captam informações do ambiente. A percepção, por sua vez, envolve a interpretação e organização dessas informações sensoriais pelo cérebro, resultando na compreensão consciente do que estamos experimentando. Esse intrincado sistema sensorial e perceptivo não apenas nos permite navegar no mundo físico, mas também influencia nossas emoções, pensamentos e comportamentos.

As sensações humanas são o ponto de partida para a percepção, que é um processo complexo baseado na interpretação e organização das informações sensoriais advindas dos sentidos. As células especializadas associadas a cada tipo de sentido - como do tato, da visão ou da audição - enviam sinais para áreas específicas do cérebro, onde são processados e integrados. A partir dessas informações, o cérebro constrói uma representação coerente do ambiente ao nosso redor, permitindo-nos não apenas reconhecer estímulos sensoriais, mas também atribuir significado a eles. Esse processamento perceptivo não é apenas passivo, mas também influenciado por experiências passadas, expectativas e emoções; moldando assim nossa compreensão subjetiva do mundo e nossa interação contínua com ele.

Desse modo, a experiência sensorial, em seu senso mais geral (sistemas sensoriais) não se comporta de maneira passiva - recebendo os estímulos externos e traduzindo integralmente suas propriedades físicas para o consciente; mas, ao contrário, o sistema nervoso realiza uma série de interpretações destes estímulos - enfatizando certos aspectos e ignorando outros. Assim, a percepção deve ser entendida como um processo ativo baseado na interpretação destes estímulos (Weidner, 2010) - e, por se tratar de uma interpretação, esse processo deve ser entendido como não-exato. As várias cores, odores e gostos percebidos pelo consciente são apenas criações feitas pelo cérebro a partir da experiência sensorial; eles não existem fora

deste contexto, mas possuem relação com as propriedades físicas dos estímulos dos quais foram geradas (Kandel, 2021).

Em se tratando do sistema visual, a percepção é resultado de representações falhas de menor ou maior grau das informações visuais que entram no sistema, cuja proporção de erro é determinada pela composição espacial e temporal da imagem observada (Bertulis & Bulatov, 2001). O nível de complexidade dedicado ao processamento das informações visuais é refletido no tamanho do córtex voltado para predominantemente este tipo de atividade: aproximadamente 27% da extensão total do córtex, nos humanos; para fins de comparação, apenas 8% do córtex humano são predominantemente voltados para processamento de informações auditivas, enquanto aproximadamente 7% são voltados para o sistema somatosensorial e 7% para o sistema motor - os 51% de área de córtex restantes são dedicados para o processamento de domínios como cognição, emoção e linguagem (Van Essen, 2004).

De acordo com Charles D. Gilbert e Aniruddha Das (Gilbert; Das, 2021), os sistemas sensoriais foram sendo moldados tanto para extração quanto para interpretação de estímulos físicos, que depois serão integrados em níveis cognitivos mais elevados (majoritariamente corticais) para basearem comportamentos (em seu senso mais geral do termo, visto que estamos tratando, aqui, de todos os processos sensoriais e suas integrações). Ainda sobre a extração das informações sensoriais, é sabido que estas são processadas no sistema nervoso central por meio de estágios organizados de forma hierárquica, mas com constante feedback entre si - e, com relação ao sistema visual, existe uma visão clássica de que os estímulos são extraídos em três níveis de processamento (Gilbert; Das, 2021): no nível mais baixo, são realizadas a extração e processamento de aspectos físicos das imagens - como cor, contraste, orientação e movimento; o nível intermediário envolve a análise mais complexas das cenas visuais e suas propriedades, onde a imagem é separada em relação à suas superfícies e contornos globais, e distinguindo o primeiro plano do plano de fundo; por fim, o terceiro nível envolve o reconhecimento de objetos e sua interação com memórias e significantes internos.

Essa ideia de aumento da complexidade ao longo de uma hierarquia sugere um mapeamento com relação aos níveis de informações visuais que serão extraídas e processadas. Acredita-se que existam sequências de áreas cerebrais que são ativadas em série e em paralelo - sendo que informações mais básicas da informação visual seriam processadas em níveis mais “baixos” (não-corticais), enquanto informações mais complexas seriam processadas em níveis mais “altos” (corticais) do sistema visual. Estudos mais recentes indicam uma história mais complexa ainda, em que áreas do córtex visual primário já participam do processamento intermediário da informação visual, enquanto neurônios de áreas corticais mais superiores (além do córtex visual primário, V1) também parecem participar do processamento de aspectos físicos dos objetos (Gilbert; Das, 2021).

É oportuno detalhar melhor o histórico das descobertas sobre a participação cortical no processamento visual: na década de 80, os estudos tanto anatômicos quanto fisiológicos de Mortimer Mishkin e Leslie Ungerleider demonstraram que a informação sensorial no córtex visual primário (V1) é dividida em duas vias principais (Gardner; Gardner, 2021) - a via ventral e a via dorsal do processamento visual (Figura 1). A primeira é essencialmente responsável pela identificação de objetos e sai do córtex visual primário (V1) em direção ao lobo temporal, eventualmente indo em direção ao hipocampo. A segunda via, por sua vez, é responsável pela extração da informação de onde o objeto está localizado e como pode ser alcançado, juntamente com informações sobre a sua forma e tamanho; e esta consiste na via que compreende a saída do córtex visual primário (V1) em direção ao lobo parietal, eventualmente indo em direção às áreas do córtex motor e áreas frontais. As informações transmitidas pelas duas vias sensoriais descritas (via visual dorsal e via visual ventral) são posteriormente subdivididas para processamento de características ou objetos específicos - existem subdivisões especializadas em, por exemplo, reconhecimento de faces - mas essas vias, embora processem informações diferentes, se comunicam constantemente entre si e estão intrinsecamente envolvidas na percepção holística de objetos e cenas visuais (Gilbert; Das, 2021).

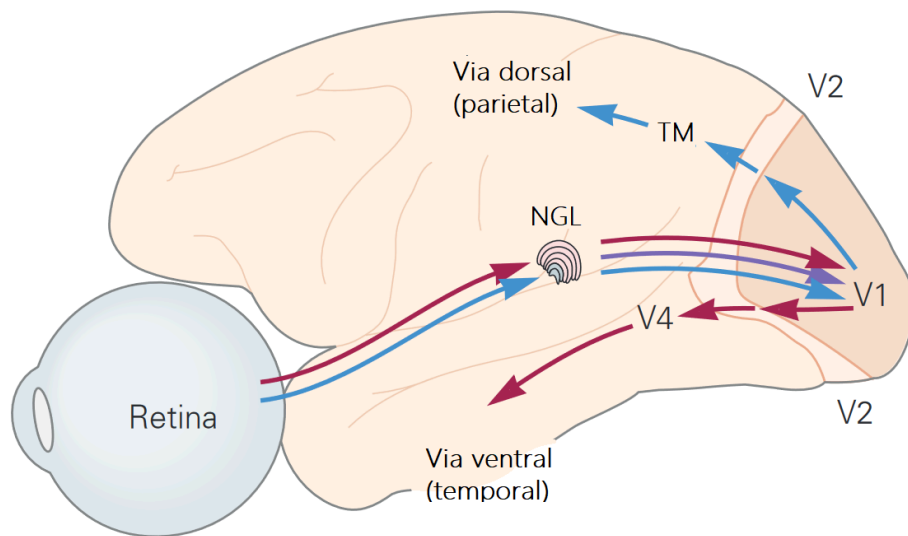


Figura 1. Ilustração das duas principais vias de processamento de informações visuais proposta por Mortimer Mishkin e Leslie Ungerleider. Imagem retirada e adaptada de Kandel, 2021. (Abreviações: NGL = Núcleo Geniculado Lateral; TM = área Temporal Medial; V1 = córtex visual primário)

A importância do modelo proposto por Mishkin e Ungerleider na compreensão do processamento visual reside na maneira como ele esclareceu a especialização funcional dentro do sistema visual do cérebro. À época dos estudos de Mortimer Mishkin e Leslie Ungerleider, já era conhecido que danos no córtex visual primário (sejam danos causados por doenças, danos de natureza física ou por intervenções cirúrgicas) causavam anormalidades no campo de visão (Escotoma) (Ungerleider; Mishkin, 1982) - mas a visão ainda era vista como um processo unitário e “simplificado”, sem distinção clara entre diferentes tipos de processamento de informações visuais. O modelo das vias dorsal e ventral demonstrou que o cérebro processa de forma simultânea e organizada as múltiplas características dos estímulos visuais, e envolve circuitos neurais especializados para isso.

Para os objetivos deste trabalho, não serão discutidas em detalhes a organização e a disposição celular do córtex visual para extração das informações visuais, mas é importante saber que existe uma organização muito complexa (em seu sentido tanto espacial quanto

computacional) da disposição celular e da divisão de processamento dos diferentes aspectos visuais envolvidos na extração de suas características. Existem diferentes divisões funcionais tanto na disposição das células (um exemplo são as arquiteturas funcionais do córtex - onde células corticais se organizam em “colunas”, ou camadas celulares, em uma mesma região cortical, e diferentes camadas são responsáveis por diferentes processamentos de informações) como também diferentes processamentos de informações em regiões de uma mesma célula (campos receptivos de células ganglionares da retina, por exemplo).

Dentro de todos esses níveis de divisão do sistema visual, existem dois tipos fundamentais de conectividade que valem ser destacados para compreender a maneira como o sistema visual processa as informações: existe um processamento chamado serial, que ocorre nas conexões sucessivas entre áreas corticais (processamento mais global), e o processamento paralelo, que ocorre simultaneamente em subconjuntos de fibras que processam diferentes submodalidades (processamento mais local) - como forma, cor e movimento (Gilbert; Das, 2021).

Sobre a anatomia das vias sensoriais do sistema visual, um ponto importante de se destacar é que, desde o primeiro momento em que as informações visuais estão sendo extraídas por meio da estimulação de células fotorreceptoras da retina, elas já são extraídas utilizando a estratégia do processamento paralelo - de fato, esse tipo de processamento é extensivamente utilizado no sistema visual. No caso das informações visuais extraídas na retina, essa estratégia consiste na extração de aproximadamente vinte características locais do estímulo (Gilbert; Das, 2021) - como, por exemplo, contrastes locais (ao comparar os níveis de escuro *versus* claro, vermelho *versus* verde e azul *versus* amarelo). Tais informações são extraídas por diversas populações neuronais de forma simultânea e paralela; e, posteriormente, são transmitidas para vias mais superiores (córtex visual primário e córtex associativo). Para ilustrar essa organização, a Figura 2 (abaixo) demonstra em que região ao longo da via visual são extraídas características como cor, profundidade, direção, orientação e identificação de formas mais complexas das informações visuais.

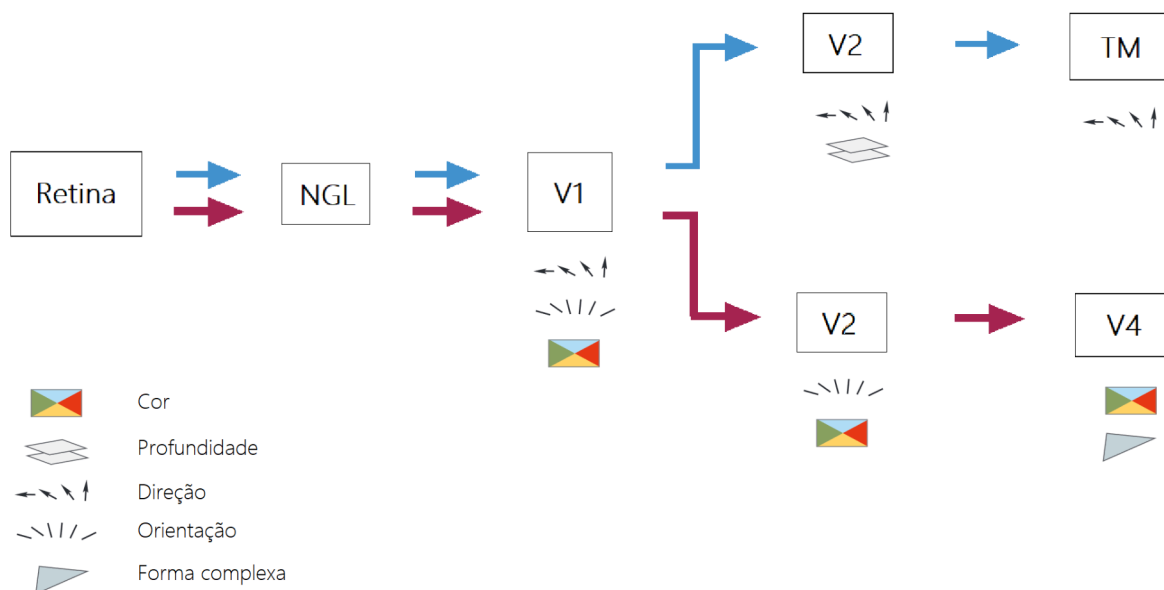


Figura 2. Esquemático dos principais aspectos físicos processados em cada etapa das vias de processamento visual. Imagem baseada em Kandel, 2021. (Abreviações: NGL = Núcleo Geniculado Lateral; TM = Área Temporal Medial; V1, V2 e V4 = Córtex Visual Primário, Secundário e Quaternário, respectivamente)

Apesar da grande integração das informações do sistema visual, ainda existe uma importante divisão entre os mecanismos de extração das informações visuais e o processo de tomada de decisão comportamental. É teorizado que existe um mecanismo mais voltado para a extração e interpretação mais básica das informações visuais, enquanto outro mecanismo de ordem superior avalia a relevância destas informações - em termos de objetivos e expectativas do indivíduo - com vistas a preparar e gerar a resposta comportamental mais adequada (VanRullen, 2001).

Tais mecanismos de integração de informação são o que chamamos de integração de baixo-nível (ou “bottom-up”) e integração de alto-nível (ou “top-down”). O *top-down* refere-se à influência dos centros superiores de processamento cognitivo (como o córtex pré-frontal) que envia informações e direciona a atenção e o controle executivo para áreas inferiores do córtex. Em contraste, o *bottom-up* descreve o processamento ascendente de informações sensoriais e perceptuais das áreas primárias sensoriais para áreas de associação superior, como o córtex parietal e temporal. Essa interação dinâmica entre o *top-down* e o

bottom-up permite ao cérebro integrar experiências sensoriais com expectativas e cognições superiores, influenciando nossa percepção e comportamento.

O processamento de organização perceptiva é caracterizado em uma ou outra classificação descrita acima dependendo de quais estruturas no cérebro são consideradas relativamente mais ativadas (King, 2017) - e, se tratando de sistema visual, as integrações de baixo-nível (*bottom-up*) são aquelas referentes aos processos de recepção de sinais visuais pelas estruturas desse sistema (por exemplo, a estrutura dos olhos e da retina); e integrações de alto-nível (*top-down*) são aquelas dependentes de mediação dos mecanismos de controle cognitivo por parte de estruturas cerebrais mais elevadas (King, 2017) - como os sistemas reguladores dos tipos dopaminérgico, glutamatérgico e GABAérgico.

1.2 A ILUSÃO VISUAL DE MÜLLER-LYER

Um melhor entendimento do processamento das ilusões visuais pode ser muito informativo para entender a origem dos problemas de organização perceptual - como em doenças psiquiátricas (King, 2017) - e representa uma fonte preciosa para o entendimento do funcionamento e do processamento de características visuais. De fato, no século 19 o filósofo e psicólogo Oswald Külpe já afirmava que existia algo de relevante no uso destas ilusões para o entendimento do processamento cerebral, visto que estas não são apenas percepções errôneas “divertidas” e resultado de processos subjetivos (Hamburger, 2007) - mas sim representações de adaptações importantes deste sistema aos diversos tipos de informações visuais (Bach & Poloschek, 2006; Hamburger, 2008).

Os sistemas visuais sensoriais são intrincados mecanismos pelos quais percebemos e interpretamos o mundo visual ao nosso redor. Ao nos depararmos com ilusões visuais, entretanto, estas desafiam nossa percepção ao apresentar imagens que parecem contraditórias ou ambíguas. Para este trabalho, propomos o estudo do processamento visual humano utilizando a manipulação de uma ilusão visual do tipo geométrica. Ilusões ópticas do tipo geométricas pertencem a uma classe de ilusões visuais que apresentam distorções subjetivas induzidas pelo contexto de suas características visuais (como comprimento, orientação ou

curvatura de linhas) e uma das ilusões geométricas mais conhecidas e extensivamente investigadas é a ilusão de Müller-Lyer (Dragoi, 1999).

A ilusão de Müller-Lyer é uma modalidade de ilusão visual que envolve a distorção da percepção do comprimento de um segmento de reta devido a configurações específicas de linhas e setas (Pessoa, 2008). Esta ilusão foi criada pelo psicólogo Franz Müller-Lyer no final do século XIX, e consiste no alinhamento de duas linhas de comprimento igual, sendo que uma das quais é adornada com setas apontando para dentro e a outra com setas apontando para fora; apesar de terem o mesmo tamanho físico, a linha com setas para fora geralmente é percebida como mais longa do que a linha com setas para dentro (Figura 3).

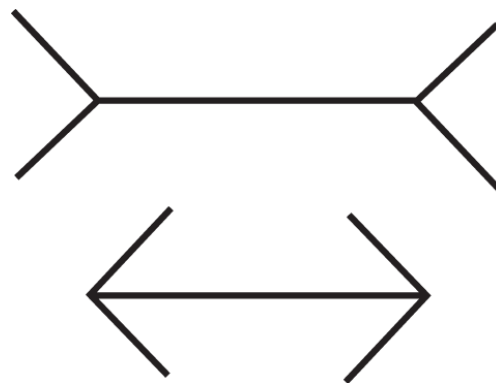


Figura 3. Ilusão de Müller-Lyer em sua versão clássica. Figura retirada de Deroy, 2015.

A versão de Brentano da ilusão de Müller-Lyer (Figura 4) é uma variação intrigante desse fenômeno perceptual e induz uma alteração ainda maior na percepção de profundidade e configuração espacial das linhas. Proposta pelo psicólogo e filósofo Franz Brentano, nessa versão as duas linhas externas são colocadas lado a lado e o observador é desafiado a avaliar não apenas o comprimento aparente das linhas, mas também a própria percepção de profundidade - considerando como as setas influenciam a interpretação visual das distâncias relativas dos segmentos de reta. Essa variação da ilusão de Müller-Lyer torna o efeito ilusório maior do que a versão clássica e permite melhor analisar a percepção visual humana - e, em especial, o seu processamento em relação à organização de informações espaciais.

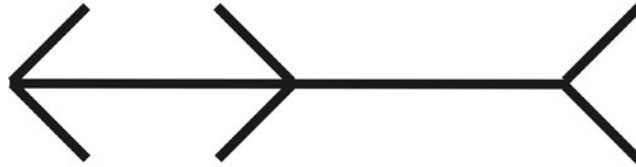


Figura 4. Ilusão de Müller Lyer na versão de Brentano. Figura retirada de Gentaz, 2004.

Existem indicações de que a ilusão de Müller-Lyer pode ser influenciada pela modulação da integração do tipo alto-nível (*top-down*) do córtex cingulado anterior e do córtex parietal posterior (Costa, 2021; Qiu et al., 2008; Weidner & Fink, 2007; Maddaluno et al., 2019). Mas há uma discussão sobre se os resultados que corroboram a teoria da modulação do tipo *top-down* não estariam relacionados, na realidade, ao tipo de tarefa cognitiva que estava sendo requisitada para os participantes, em vez do processamento visual em si (Weidner et al., 2010).

1.3 O ELETROENCEFALOGRAMA (EEG) E OS *EVENT-RELATED POTENTIALS* (ERPs)

Foi por volta de 1929 que o psiquiatra e neurologista alemão Hans Berger realizou uma série de experimentos nos quais ele demonstrou a possibilidade de realizar medições da atividade elétrica do cérebro de forma não-invasiva. Ele fez isso ao colocar eletrodos com pontas condutoras na superfície da cabeça, amplificar o sinal e mostrar sua variação ao longo do tempo. Apenas alguns anos depois o fenômeno foi validado por outros pesquisadores e as observações de Berger foram confirmadas (Jasper; Carmichael, 1935. Gibbs et al, 1935. apud Luck, 2014). Nas décadas seguintes, essa técnica tem se mostrado muito útil tanto para aplicações científicas e experimentais quanto para aplicações clínicas.

O sinal de eletroencefalograma (EEG), Figura 5, é resultado da medição de flutuações espontâneas de potenciais elétricos na superfície da cabeça. Esses potenciais são essencialmente resultado de variações de potenciais pós-sinápticos de células piramidais do córtex cerebral (Jackson, 2014). Esta técnica, por ser realizada sobre a superfície da cabeça, oferece informações muito úteis sobre funções e disfunções cerebrais de uma forma

não-invasiva - e, por isso, se mostra muito útil tanto para aplicações na academia quanto na indústria.

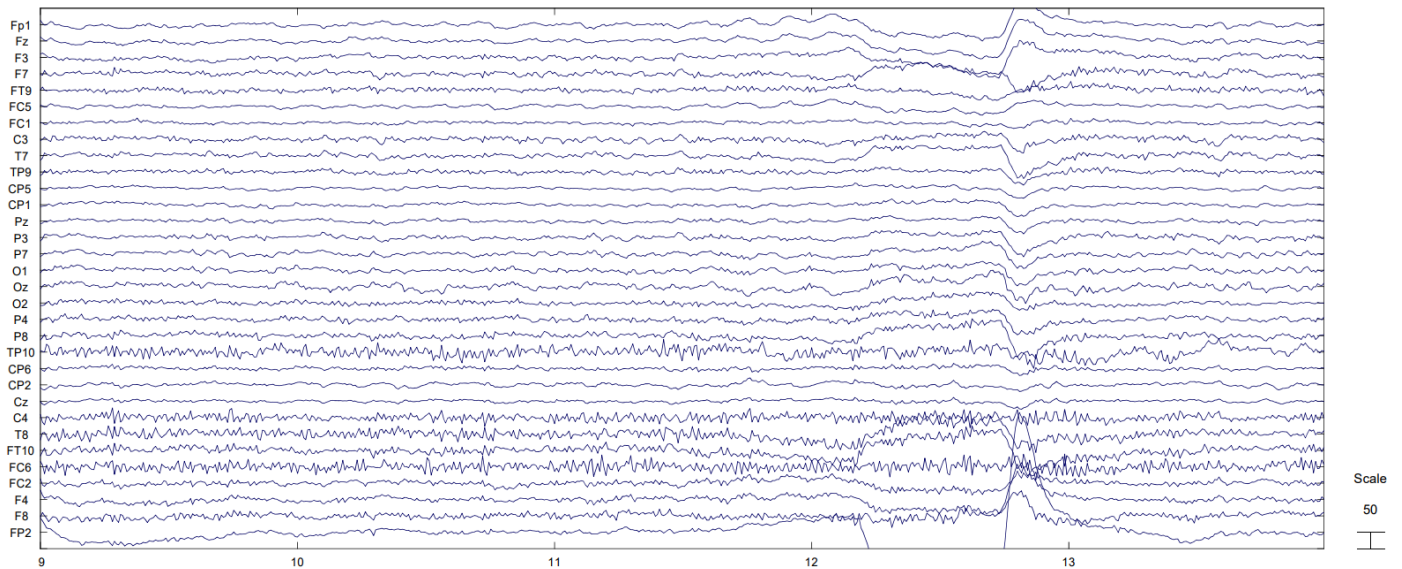


Figura 5. Sinal de EEG bruto. Sinal extraído do participante 1 do presente estudo.

O EEG é particularmente útil para estudar a atividade cerebral associada a vários processos cognitivos - como, por exemplo: atenção, percepção, memória e consciência. Esta técnica também é utilizada em ambientes clínicos para diagnosticar e monitorar distúrbios neurológicos. As gravações de EEG podem revelar padrões anormais de atividade cerebral e, por isso, podem auxiliar no planejamento do tratamento e na avaliação de intervenções terapêuticas. Além disso, sua precisão de milissegundo, em especial, torna esse um dos tipos de registros mais importantes para, por exemplo, os estudos de atenção e percepção - visto que muitos aspectos relacionados a estes fenômenos cognitivos aparentam operar na escala de décimos de milissegundos (Woodman, 2010).

É importante notar que, apesar da grande precisão temporal do EEG, é muito difícil determinar quais componentes correspondem a quais processos (Woodman, 2010), visto que a natureza do sinal elétrico não possui uma correspondência direta com a possível natureza do sinal cerebral diretamente abaixo dos eletrodos. Além disso, o registro do EEG sofre distorção devido ao chamado *spacial smearing* (“espalhamento espacial”, do inglês)(Jackson, 2014): os neurônios funcionam como uma espécie de dipolo elétrico (visto que possuem uma distribuição desigual de cargas elétricas) e, pelo fato da transmissão do sinal elétrico em um

dipolo ocorrer em quase todas direções, estes terão influência no registro da tensão elétrica em praticamente todos os locais do couro cabeludo, levando à diferença nas intensidades de campo elétrico que aquelas cargas provocam nos eletrodos, em função das distâncias entre as cargas e cada eletrodo; além disso, as várias camadas de tecido que o sinal cerebral precisa atravessar para chegar aos eletrodos na superfície do couro-cabeludo também resultam numa distorção deste sinal - especialmente no nível do crânio, visto que o tecido ósseo é mais resistivo à passagem de corrente elétrica (Srinivasan, 1996). Como consequência, em cada posição espacial do couro cabeludo, a atividade registrada é uma mistura (ou seja, uma soma ponderada) das fontes cerebrais subjacentes (Makeig et al., 1996).

Os potenciais relacionados a eventos (do inglês, *Event Related Potentials* - ERPs) são um tipo de aplicação do EEG, e podem fornecer informações muito valiosas sobre a resposta do cérebro a estímulos ou eventos específicos. Ao calcular a média da resposta do sinal de EEG após a apresentação de estímulos (Figura 6), pode-se isolar e analisar a atividade neural associada a processos cognitivos específicos. Esta técnica melhora a relação sinal-ruído (aqui, entender “sinal” como a parte de interesse do registro; enquanto “ruído” será todo o restante que atrapalha a leitura do que é relevante para o estudo em questão), revelando respostas cerebrais sutis que, de outra forma, poderiam ser obscurecidas pelo ruído de fundo. Ou seja, por meio desta técnica podemos isolar o um sinal de interesse que de outra forma estaria perdido dentro do registro “comum” do EEG (que inclui todos os sinais elétricos captados pelos eletrodos, como: outros potenciais elétricos resultantes da atividade basal ou de processamentos cerebrais que não são do interesse do estudo, registros musculares, entre outros) relacionado a estímulos específicos. Os ERPs, então, são caracterizados por componentes distintos - cada um refletindo diferentes estágios de processamento de informações, como por exemplo: percepção sensorial, atenção e codificação de memória.

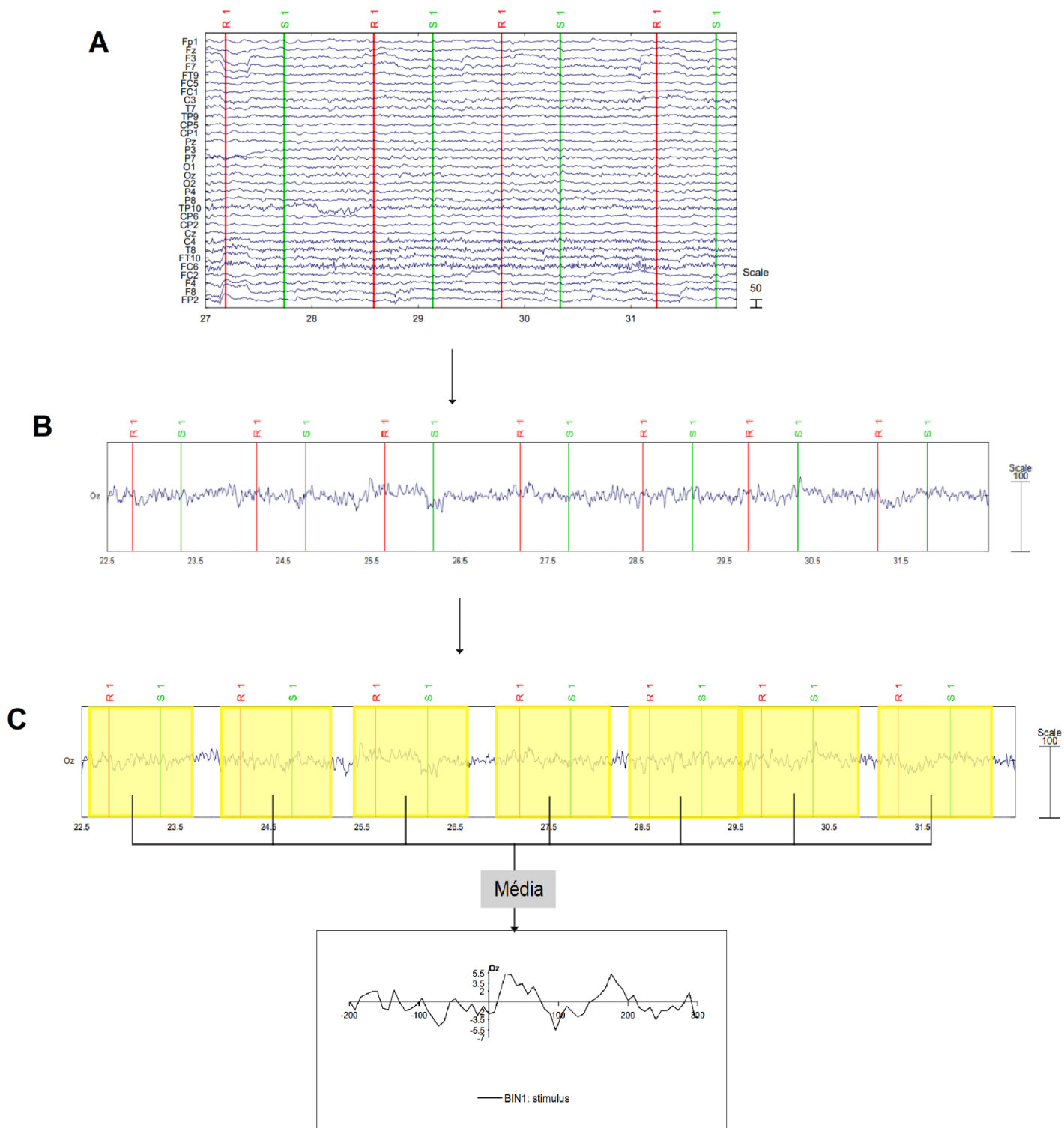


Figura 6. Esquema ilustrativo de processo para extração de um ERP a partir do sinal do EEG. A: sinal processado com marcação dos eventos de apresentação do estímulo (S1) e resposta do participante (R1); B: Exemplo do sinal em somente 1 eletrodo (Oz); C: Ilustração demonstrando que o

sinal (neste caso somente para um eletrodo) é seccionado em eventos (com algumas centenas de milissegundos anterior à apresentação do estímulo e um tempo posterior à resposta correspondente) e são feitas as médias destes eventos para que seja gerado o ERP final. Imagem feita com o sinal de um dos participantes do presente estudo.

O uso de ERPs na neurociência cognitiva levou a avanços significativos na compreensão dos mecanismos neurais subjacentes a várias funções cognitivas. Por exemplo, o componente P300 - frequentemente eliciado durante tarefas excêntricas onde estímulos raros são apresentados entre os frequentes - reflete processos relacionados à atenção, tomada de decisão e memória de trabalho. Da mesma forma, o componente N400 está associado ao processamento semântico e é provocado por incongruências semânticas em estímulos de linguagem. Ao utilizar a técnica de ERPs, é possível dissecar a dinâmica temporal dos processos cognitivos com precisão de milissegundos; lançando luz sobre a base neural da percepção, compreensão da linguagem, recuperação de memória e outras funções cognitivas complexas. Além disso, os ERPs têm aplicações clínicas, auxiliando no diagnóstico e monitoramento de distúrbios cognitivos, como doença de Alzheimer, esquizofrenia e transtorno de déficit de atenção/hiperatividade (TDAH) (Jadhav et al, 2022).

Um bom exemplo que ilustra a utilização de ERPs para diagnóstico de transtornos cognitivos é o caso do componente N170. Como descrito por Luck (Luck, 2014): o componente N170 é um componente relacionado ao reconhecimento de faces humanas, este componente possui uma magnitude máxima ocorrendo em torno de 170ms após a apresentação do estímulo e possui maior evidência em áreas do cérebro correspondentes às regiões ventrais do córtex visual. Para provocar este componente, basta realizar um experimento com a apresentação de imagens contendo rostos e imagens sem rostos para os participantes assistirem a apresentação de forma passiva (sem necessidade de nenhuma ação por parte do sujeito). O componente N170 é evidenciado como a diferença entre a curva resultante do sinal do participante ao ver um estímulo com imagens de rosto em comparação com quando o estímulo é uma imagem sem rostos, como um carro (Figura 7) - e essa diferença começa a aparecer no sinal a partir de aproximadamente 150 ms após a apresentação do estímulo - tendo seu pico ocorrendo em torno de 170ms, como mencionado anteriormente. Infere-se a partir desses resultados que, provavelmente, o cérebro humano necessita de 150 ms de processamento para poder distinguir entre rostos e outros objetos.

Alguns estudos utilizaram o componente N170 para entender o funcionamento do processo cognitivo de identificação de rostos. No mesmo trecho citado no parágrafo anterior, Steven Luck descreve que alguns estudos foram capazes de indicar (pelo menos parcialmente) que o processo de identificação de rostos é parcialmente influenciado pela atenção (Carmel & Bentin, 2002. apud Luck, 2014) e que existe a presença deste componente também em tarefas de identificação baseadas em expertise - como a identificação de pássaros por ornitólogos ou identificação de impressões digitais por especialistas dessa área (Tanaka & Curran, 2001; Busey & Vanderkolk, 2005; Luck, 2014). Ainda, alguns estudos foram capazes de demonstrar que o componente N170 se apresenta de forma anormal em crianças com autismo (Dawson et al., 2002; Luck, 2014; Dawson et al, 2005) e, particularmente a latência (tempo de geração do ERP após apresentação do estímulo) deste componente parece ser um biomarcador específico do TEA (transtorno do espectro autista) e pode estar relacionada diferenças no neurodesenvolvimento e ao uso de mecanismos cognitivos compensatórios decorrentes (Erin e at, 2018). A Figura 6 ilustra o resultado de um experimento realizado com pais de filhos diagnosticados com autismo e pais com filhos sem o transtorno (controle) - como o TEA possui um componente genético presente, se demonstra válida a realização de avaliações de traços deste transtorno em progenitores de pacientes com TEA. O experimento em questão mostrou que, em pais de pacientes autistas, existe uma alteração no componente N170 inter-hemisférico responsável pela diferenciação de imagens de rostos e imagens de cadeiras, quando comparado com os pais de crianças não-autistas - sugerindo que o processamento cerebral responsável pela identificação de rostos pode ser deficiente em portadores deste transtorno.

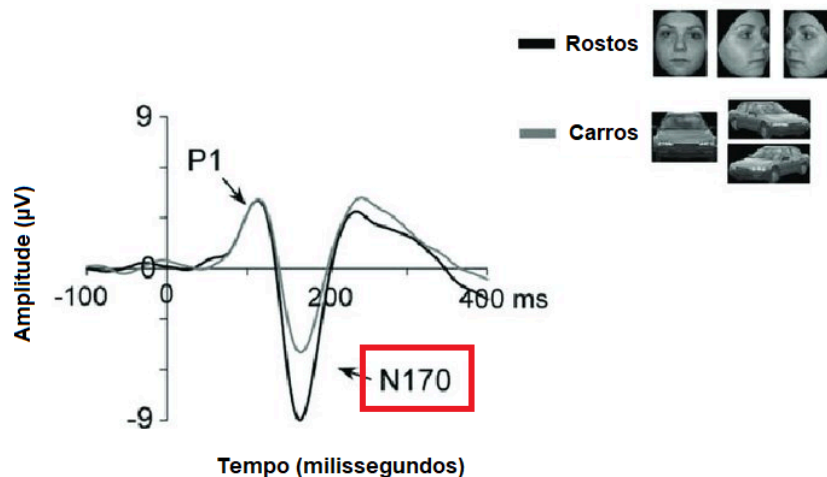


Figura 7. Ilustração do resultado de um experimento de ERP evidenciando o componente N170 clássico. Este resultado foi extraído do eletrodo PO8 (parieto-occipital do lado direito), com a referência correspondendo à média de todos os eletrodos. Imagem adaptada de Jonas, 2016.

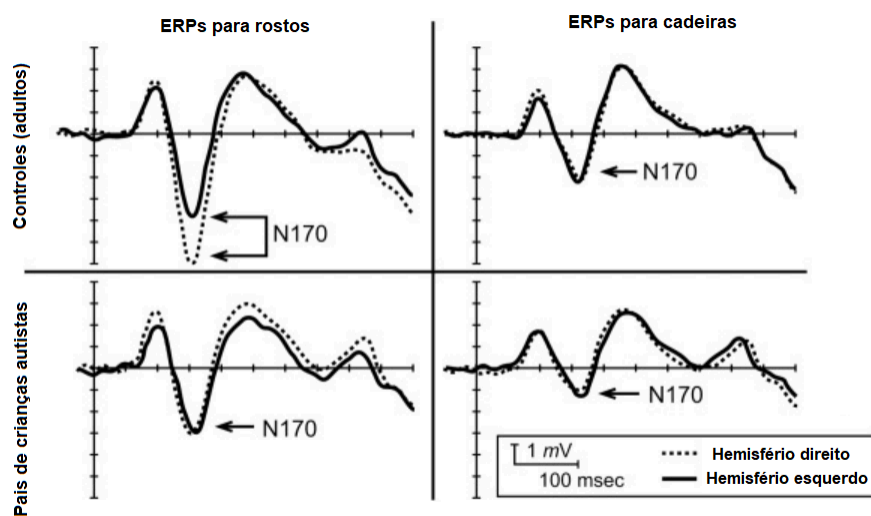


Figura 8. Ilustração do resultado de um experimento de ERP evidenciando o componente N170 alterado em caso de pais de filhos autistas. Imagem adaptada de Dawson, 2005.

É relevante notar que os potenciais relacionados a eventos (ERPs) podem ser registrados mesmo na ausência de uma resposta comportamental e refletem propriedades de alto nível do estímulo visual, como sua identidade ou categoria, após aproximadamente 150 ms (Mouchetant-Rostaing, Giard, Bentin, Augera, & Pernier, 2000; Allison, Puce, Spencer, &

McCarthy, 1999; Schendan, Ganis, & Kutas, 1998; Thorpe, Fize, & Marlot, 1996; Botzel, & Schulze, Stodieck, 1995. apud VanRullen, 2001) e raramente processos majoritariamente cognitivos (processos de natureza do tipo *top-down*) influenciarão os resultados de ERP antes de 100 ms após apresentação do estímulo (Luck, 2014). Dessa forma, é útil utilizar a marcação de aproximadamente 100 ms após apresentação do estímulo como um marco temporal de transição do processamento predominantemente do tipo *bottom-up* para o tipo *top-down*.

Assim, os ERPs se mostram como uma ferramenta poderosa para estudar a resposta do cérebro a estímulos - e, no caso do sistema visual, os ERPs permitem analisar a atividade elétrica cerebral associada a diferentes estágios do processamento visual, por exemplo: componentes específicos podem refletir a detecção inicial de estímulos visuais ou processos posteriores de reconhecimento e/ou de categorização visual, contribuindo para a compreensão de como o cérebro integra e interpreta informações visuais complexas.

Apesar de existir uma quantidade considerável de estudos com aplicações da técnica de ERP, ainda são poucos os estudos que utilizaram esta técnica para entedimento da dinâmica do sistema visual - e ainda menos com o uso de ilusões visuais na metodologia. Aqui, podemos citar o trabalho desenvolvido por VanRullen e Thorpe (VanRullen & Thorpe, 2001), em que analisaram o curso temporal do processamento visual a partir do estudo de ERPs relacionados a uma tarefa de classificação de imagens e onde foi possível isolar dois componentes deste processo: um componente estava relacionado ao processamento de informações visuais mais básicas e outro que estava relacionado à tomada de decisão e processamento de informações mais complexas (em termos cognitivos). Além deste estudo, também podemos citar os estudos feitos por Qiu e colaboradores (Qiu et al, 2008) e Weidner e colaboradores (Weidner et al, 2007; Weidner et al, 2010); ambos os estudos utilizaram medidas eletrofisiológicas para entender o processamento visual - desta vez já fazendo uso da ilusão de Müller-Lyer com vistas a entender a neurobiologia por trás desta ilusão -, mas utilizaram metodologias diferentes e chegaram a resultados também muito diferentes entre si.

Ainda sobre os estudos mencionados acima, o estudo de Qiu e colaboradores se mostrou muito relevante ao tentar distinguir o curso temporal envolvido no processamento da ilusão

de Müller-Lyer e qual tipo de processamento predominantemente envolvido neste - ou seja, se a ilusão é predominantemente influenciada pelo processamento do tipo baixo-nível ou alto-nível do sistema visual. O estudo, no entanto, não pareceu ser muito robusto para conseguir isolar os aspectos mais importantes para geração da ilusão - por exemplo, a alteração do comprimento das retas para criação das imagens-teste e imagens-controle já resultaria em alteração do sinal de ERP em si tendo em conta a alteração do tamanho da imagem na retina (Busch, 2004; Bayer, 2012; Pfabigan, 2015), não refletindo necessariamente que o participante estava sob efeito maior ou menor da ilusão.

Os estudos de Weidner e colaboradores, por sua vez, se mostraram muito mais robustos em suas metodologias, mas tais estudos focaram muito mais sobre aspectos visuais da ilusão com relação à angulação das setas e seus efeitos ao induzir mais ou menos os participantes (e quais implicações neurobiológicas disto), além do estudo ter sido feito com uso da técnica de Magnetoencefalograma (MEG) - que, apesar de ser uma técnica muito parecida com a técnica de EEG em questão de resolução espacial e temporal, não é fácil fazer uma analogia direta desta técnica com o EEG e também não é comum aplicar a metodologia de ERP neste caso.

Assim, com vistas a melhor entender o funcionamento cerebral do processamento de características visuais da ilusão de Müller-Lyer e melhor distinguir quais tipos de processamentos (i.e. processamento de baixo ou alto-nível) estão envolvidos na geração do efeito ilusório, utilizamos a combinação do estudo de EEGs com o uso da metodologia de ERPs para entender os diferentes estágios do processamento das características visuais relacionadas a esta ilusão pelo cérebro humano. Acreditamos que o entedimento destas características são muito úteis para entender melhor como funciona o processamento visual humano em si, e também poder estudar possíveis diferenças processuais entre outros grupos de interesse (sejam animais não-humanos ou humanos com transtornos cognitivos que influenciem o processamento sensorial).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar como ocorre o processamento da ilusão visual de Müller-Lyer e quais características relacionadas a este processamento no cérebro humano a partir do estudo da dinâmica do EEG de participantes saudáveis e utilizando a metodologia de ERPs.

1.3.2 Objetivos Específicos

1.3.2.1 Avaliar a suscetibilidade de pessoas saudáveis em uma tarefa de percepção visual da ilusão de Müller-Lyer;

1.3.2.2 Avaliar possíveis ERP (Event Related Potentials) evocados pela ilusão de Müller-Lyer e suas características;

1.3.2.3 Avaliar possíveis ERP (Event Related Potentials) evocados por imagens modificadas da ilusão Müller-Lyer (mas sem efeito ilusório completo) e suas características.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste experimento participaram 14 voluntários no total, sendo 6 homens e 8 mulheres. O projeto foi aprovado no Comitê de Ética da Faculdade de Ciências da Saúde sob o Parecer Consubstanciado do CEP nº 5.541.356, CAAE: 58556122.9.0000.0030.

Para este experimento, a imagem-base utilizada foi a ilusão de Müller-Lyer na versão de Brentano (Figura 4), onde as retas estão posicionadas de forma contínua. Nesta modalidade da ilusão, a seta do meio está localizada da metade do comprimento da reta, ou seja, a seta mediana divide a barra em duas partes iguais - enquanto que outras duas setas se posicionam nas pontas desta mesma barra. Para permitir a comparação com um estímulo neutro (mas psicometricamente parecido), foram elaboradas duas variações de imagens controle com inversão da direção de uma das setas das pontas e a substituição da seta central por uma reta, conforme ilustrado na Figura 9.

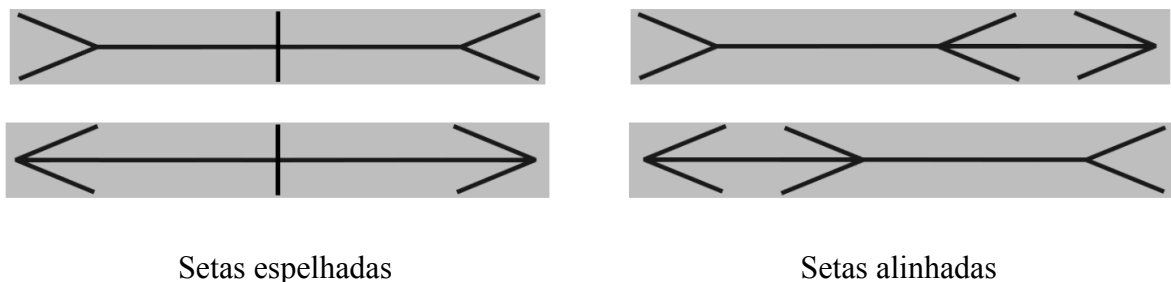


Figura 9. Versões da ilusão apresentadas aos participantes (versões somente da posição central).
Perceba que em todas as quatro configurações a reta horizontal está dividida exatamente no meio.

Importante notar que o comprimento total das imagens foi mantido para garantir que o espaço captado na retina seja o mesmo para todas as imagens. As imagens foram apresentadas em um monitor Dell P2217Hc do tipo LCD com taxa de resolução de 50/60Hz e os valores de *Rise time* e *Fall time* foram de 2,47ms e 14,78ms respectivamente; os participantes estavam a uma distância de 1m da tela do computador.

2.1 VARIAÇÕES DAS IMAGENS

Para medir a influência de cada aspecto da ilusão, foram criadas 12 imagens com as seguintes variações:

2.1.1 Variações do tipo das setas centrais: 2 variações (para as modalidades de teste, foi utilizada a seta central como mostrado na Figura 1; enquanto que, para as modalidades controle, a seta mediana foi substituída por uma barra vertical).



Figura 10. Variação 1 com as duas variações da posição central. Na primeira imagem está ilustrada a modalidade controle e na segunda está ilustrada a modalidade da ilusão.

2.1.2 Variações de direcionamento das setas das pontas: 4 variações (duas variações com ambas as setas direcionadas para o mesmo lado, outra com as setas posicionadas para fora e outra com as setas posicionadas para dentro).

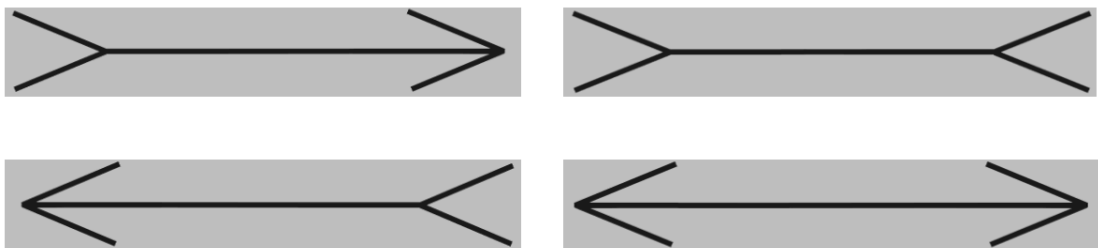


Figura 11. Variação 3 com as 4 posições das setas das pontas. Nas imagens da esquerda estão ilustradas as retas com as pontas das setas alinhadas e nas imagens da direita estão ilustradas as retas com as pontas das setas espelhadas.

A Figura 12 a seguir ilustra todas as variações de imagens usadas para o experimento.

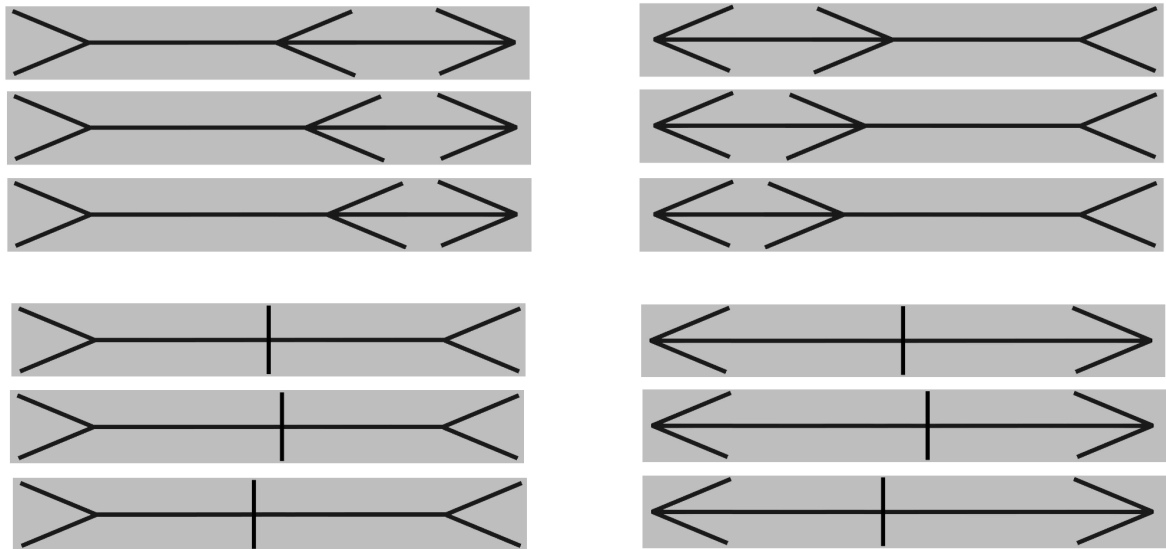


Figura 12. Todas as variações de imagens apresentadas aos participantes.

2.1.3 Variações de posição da seta central

2.1.3.1 Variações para as setas espelhadas: 3 posições (uma variação marcando a posição do meio da reta e duas variações marcando a soma ou a subtração de $1/20$ do tamanho da reta a partir do meio).

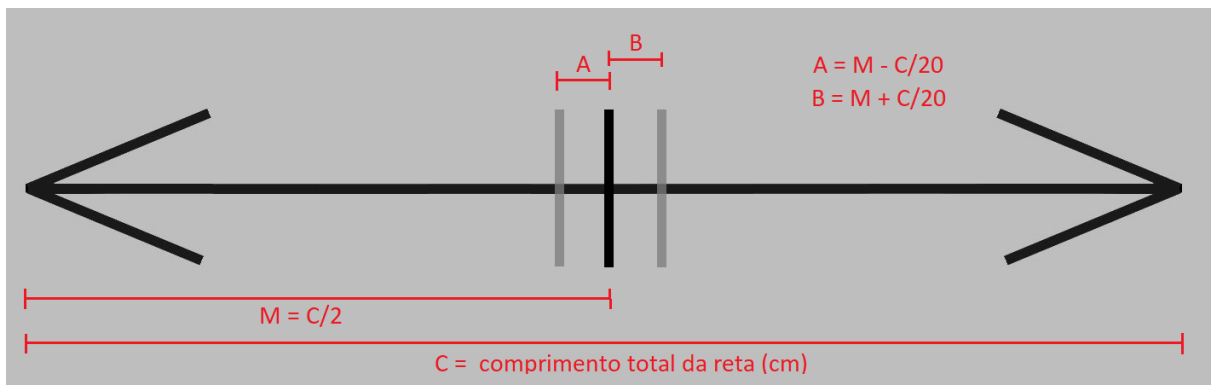


Figura 13. Ilustração de todas as distâncias consideradas para o posicionamento das retas centrais para as retas com setas espelhadas.

2.1.3.2 Variações para as setas alinhadas: 3 posições (uma variação marcando a posição do meio da reta, uma variação marcando a soma ou a

subtração - dependendo da direção das setas das pontas - de $1/20$ do tamanho da reta a partir do meio e uma variação marcando um ponto arbitrário).

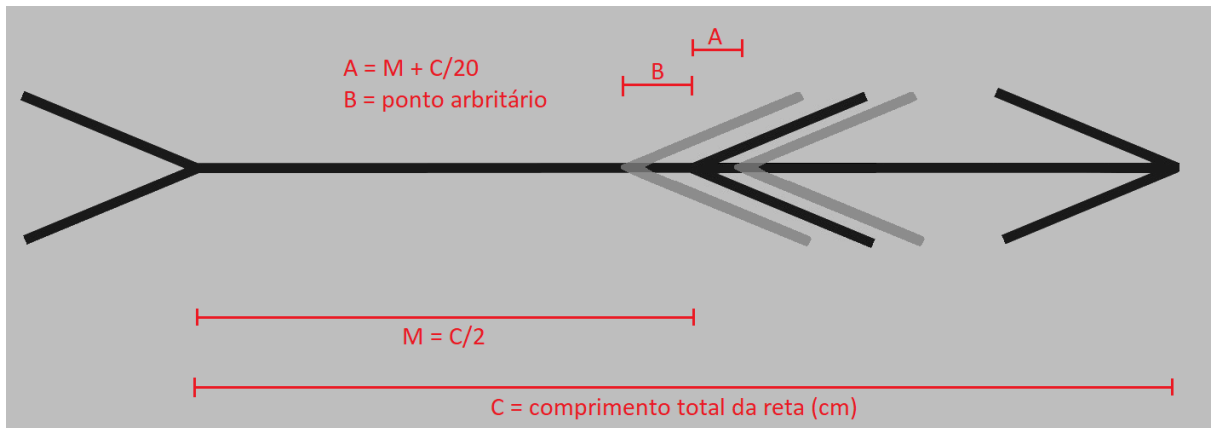


Figura 14. Ilustração de todas as distâncias consideradas para o posicionamento das setas centrais para as retas com setas alinhadas.

2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

Os experimentos aconteceram no Departamento de Ciências Fisiológicas da UnB em apenas 1 sessão. Primeiramente, os participantes foram posicionados em uma cadeira confortável a 1 m de distância da tela do computador (foi medida a distância da tela até o ombro do participante utilizando uma fita métrica) e tiveram um período para aclimação ao ambiente. Após esse período foi posicionada uma touca de EEG para monitoramento dos sinais cerebrais basais e foram dadas as devidas instruções sobre a realização da tarefa. O posicionamento da touca de EEG foi conferida com a medição da distância entre o *nasion* e o *inion* de cada participante (devendo esta distância corresponder à posição do eletrodo Cz). A localização dos eletrodos seguiu as posições do sistema 10-20, conforme a Figura 15.

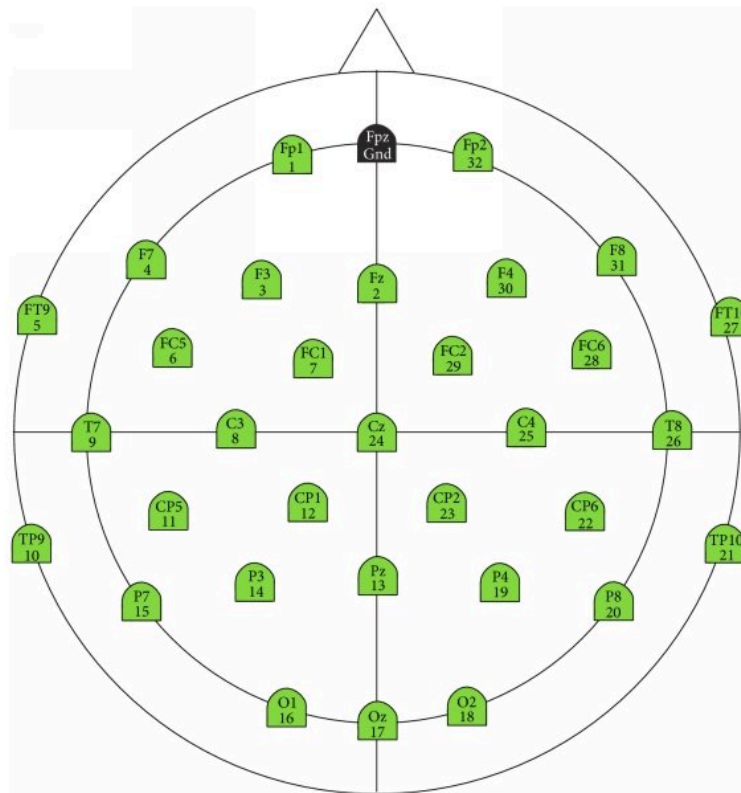


Figura 15. Ilustração mostrando as posições dos eletrodos na touca Easycap. Figura reproduzida de Bastos et al, 2016.

Após a colocação dos eletrodos, foram medidas as impedâncias dos eletrodos e injetado o gel condutor nos espaços entre o couro cabeludo e as pontas dos eletrodos. A impedância dos eletrodos foi medida durante a colocação do gel e todos ficaram abaixo de $50\text{k}\Omega$, alguns chegando a ficar abaixo de $15\text{k}\Omega$.

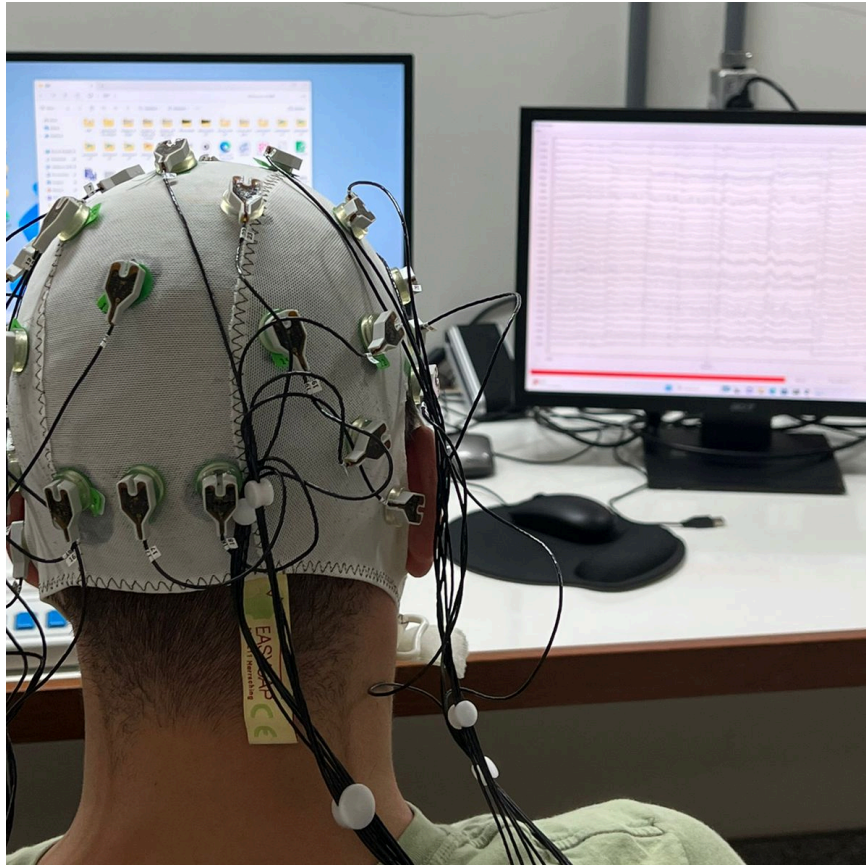


Figura 16. Foto do setup utilizado para aquisição dos sinais durante a apresentação dos estímulos.

O participante deveria aguardar aparecer a tela de respostas (onde estariam posicionadas de forma ilustrativa na tela a posição dos botões a serem apertados) e somente poderiam responder após ouvir um sinal sonoro. A duração desta apresentação para o participante foi de apenas 20ms e, após esse tempo, o participante escolhia se apertava um de dois botões: (1) se as retas divididas pela seta possuem tamanhos iguais ou (2) se as retas possuem tamanhos diferentes. A marcação da resposta pelo participante foi feita utilizando o sistema *Chronos Stimulus Presentation*, da empresa E-prime.

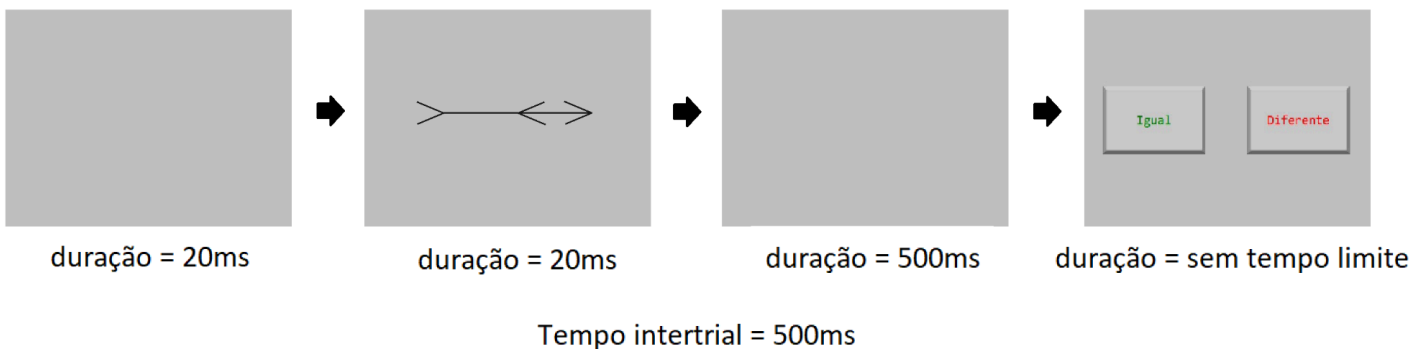


Figura 17. Sequência da apresentação de cada trial de estímulos aos participantes.

Foram realizadas 3 rodadas de apresentação de imagens aos participantes. Entre cada rodada os participantes eram convidados a fazerem uma pausa para relaxar e descansar os olhos, e poderiam apertar uma tecla do teclado do computador quando estivessem prontos para prosseguir para a próxima rodada. O número total de modalidades de imagens apresentadas foi de 12 (conforme descrito na seção de Métodos), sendo que foram apresentadas 26 repetições de cada imagem para cada série - dessa forma, cada imagem foi apresentada no total de 78 vezes para cada participante e o número total de apresentações de imagens foi de 936. O tempo médio de duração do experimento todo (incluindo a preparação inicial do participante até a finalização do experimento) foi de aproximadamente 2 horas e o tempo médio de duração da tarefa em si foi de aproximadamente 42 minutos.

Ao longo de todo o experimento, foram monitorados os sinais de EEG dos participantes e marcado o momento exato da apresentação da ilusão (início dos 20ms). A análise de dados foi feita após o experimento (*offline*), em ambiente MATLAB, utilizando o pacote de ferramentas *open-source* EEGLAB na versão 2023. O computador utilizado tanto para a apresentação dos estímulos como para a aquisição do sinal foi um OptiPlex 7050 D11S com processador Intel(R) Core(TM) i7-7700 que operou no sistema Windows 11 Pro, o monitor utilizado para apresentação da tarefa para o participante foi o Dell P2217Hc de 21,5 polegadas e taxa de atualização de 50/60Hz.

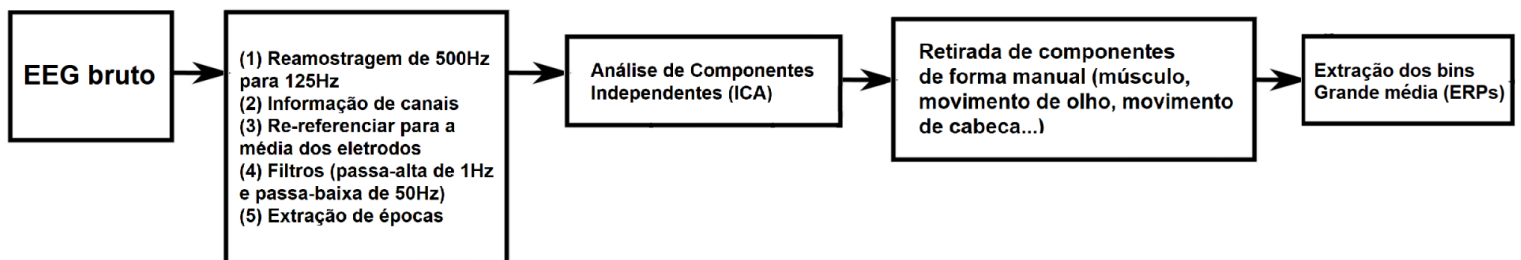


Figura 18. Esquema dos passos para processamento dos dados e extração dos ERPs.

O pré-processamento dos sinais foi feita conforme ilustrado na Figura 18, sendo o detalhamento de cada etapa descrita a seguir (ordem de processamento):

2.2.1 Importação dos sinais brutos (extensões .eeg, .vmrk e .vhdr): os sinais foram importados utilizando a extensão da Brain Vision Recorder para arquivos .vhdr e estes foram transformados em arquivos .set;

2.2.2 Reamostragem do sinal: para acelerar o processamento dos dados, foi realizado um *downsampling* da frequência do sinal de 500Hz (frequência utilizada para a coleta do sinal) para 125Hz para poder preservar as frequências de até 62,5Hz - em acordo com o estipulado pelo Teorema de Nyquist-Shannon;

2.2.3 Re-referenciar do Cz para a média dos eletrodos: o sinal original foi coletado utilizando o eletrodo Cz como referência, então fizemos a re-amostragem para um eletrodo imaginário com sinal equivalente à média de todos os eletrodos;

2.2.4 Filtragem: a filtragem foi feita utilizando dois filtros FIR com janelamento do tipo *Hamming*, os filtros foram do tipo *high-pass* de 1 Hz e *low-pass* de 50 Hz - não foi optamos por utilizar um filtro do tipo IIR por não haver problemas de distorção de fase para a análise das formas dos ERPs. O projeto de filtragem foi feito separadamente para evitar a possível influência do filtro passa-alta na inclinação da faixa de transição do espectro de frequências do filtro passa-baixa quando projetado em um mesmo filtro passa-banda clássico, considerando as mesmas tolerâncias de *ripple* e bandas de transição - que poderiam produzir grandes artefatos no sinal (Luck, 2014; Widmann et al., 2015);

2.2.5 Extração das épocas: nesta etapa o sinal é dividido em porções de tempo pré-definidas que ocorrem em torno de um evento de interesse. Aqui, o sinal foi dividido em porções ao redor da apresentação do estímulo (considerando a primeira aparição na tela) com um tempo de -500 ms antes da apresentação e 800 ms após a apresentação do estímulo (totalizando um tempo total de 1300 ms para cada época). Aqui, foi escolhido um período longo de tempo tanto para a extração do baseline quanto para o sinal pós-apresentação do estímulo para garantir que teríamos margens de tempo “sobrando” caso fosse necessário diminuí-las posteriormente - contudo, apenas foram considerados os tempos de -200 ms antes e 500 ms após a apresentação do estímulo para análise dos ERPs;

2.2.6 Análise de Componentes Independentes (*Independent Component Analysis, ICA*): a aplicação do ICA no sinal de EEG é voltada para separar atividades de fontes independentes (i.e. cérebro, músculos, energia elétrica...) nos dados individuais de cada sujeito - esta separação é baseada no conteúdo informativo dos próprios dados e leva em consideração que os dados registrados na superfície da cabeça, as possíveis áreas corticais ativas e as possíveis fontes de artefato que podem ter impregnado o sinal durante a aquisição, possuem atividades completamente independentes umas das outras (Onton & Makeig, 2006). A partir da listagem de componentes do sinal extraídos por meio do processamento de ICA (total: 32), foram analisados os possíveis artefatos neurais e não-neurais baseados em suas características topográficas, espectrais e temporais esperadas (Chaumon, 2015) e restaram, em média, 28 componentes para cada participante.

1. Características do sinal tipicamente neural consideradas:

- 1.1. Espalhamento topográfico suave e em formato de dipolo;
- 1.2. Grande amplitude;
- 1.3. Grande ativação relacionada a evento;
- 1.4. Pico de potência em bandas de frequências conhecidamente fisiológicas.

2. Características do sinal tipicamente de movimento de olho:

- 2.1.1. Espalhamento topográfico bilateralizado, frontal e oposto;
- 2.1.2. Polaridade oposta ao redor dos olhos;
- 2.1.3. Inexistência de picos em frequências fisiológicas;
- 2.1.4. Alta correlação com Eletrooculografia (EOGs).

3. Características do sinal tipicamente muscular:

- 3.1.1. Espalhamento topográfico localizado;
- 3.1.2. Presença de períodos de tempo ruidosos constantes se dissipando/aumentando entre os testes;

3.1.3. Picos de potência em altas frequências.

4. Também foram considerados os casos de componentes raros, eletrodos defeituosos, artefato de eletrocardiograma (ECG) e ruído de linha de energia elétrica - mas estes componentes apareceram em uma escala muito menor do que os outros listados acima.

2.7 Geração dos ERPs: Para criar os ERPs a partir das épocas do sinal, foram separadas cada época relativa a cada tipo de estímulo apresentado - ou seja, para cada uma das 12 imagens - e foi feita a média de todas as épocas de cada participante para cada estímulo (gerando os ERPs de cada participante); para geração dos ERPs em si, foi feita a média destes sinais dos ERPs individuais para cada estímulo (*grand average*).

Para a realização das análises estatísticas dos dados de comportamento, foram realizados dois testes do tipo *two-way* ANOVA considerando, para cada imagem, a média dos tempos de resposta e da taxa de acerto de cada participante. A análise foi feita dentro do programa MATLAB e, para todos os resultados cuja diferença entre os dados foi significativa ($p < 0.05$), foram analisadas as respectivas interações *post-hoc*.

O experimento todo foi feito em um computador do tipo desktop da marca Dell (modelo Optiplex 7050, com processador Intel(R) Core(TM) i7-7700, RAM de 16GB e sistema Windows 11) e o equipamento de captura dos sinais foi o amplificador ActiChamp de 32 eletrodos ativos e do tipo gel, da empresa Brain Products.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS COMPORTAMENTAIS (TAXA DE ACERTO)

As figuras 19 a 23 ilustram os resultados comportamentais relativos às taxas de acerto de todos os participantes ao serem expostos a cada imagem indicada. Para estipular a taxa de acerto mostradas foram isoladas as quantidades de acertos de todos os participantes para cada imagem em cada rodada de apresentação, e esse resultado foi dividido pela quantidade de apresentações totais dessas mesmas imagens para cada bloco (26) e multiplicado por 100.

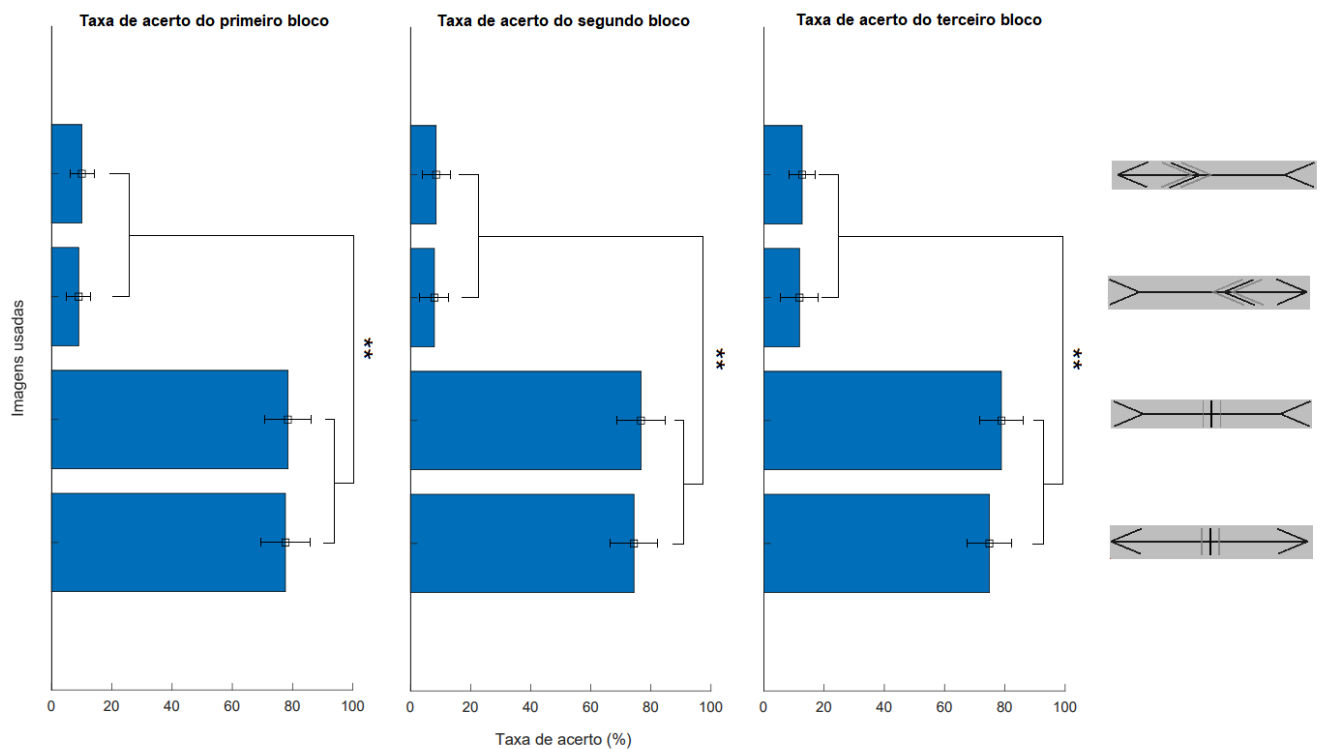


Figura 19. Taxa de acerto das imagens com as posições do meio marcadas. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA e as marcações (**) indicam os valores que foram significativamente diferentes entre si ao serem comparados via *pos-hoc* ($p < 0.01$).

Como ilustrado na Figura 19, as taxas de acerto nas imagens com setas espelhadas foi muito superior às taxas de acerto dos participantes perante as imagens de setas alinhadas (versão clássica da ilusão de Müller-Lyer). Tal resultado mostra que os participantes foram iludidos com sucesso pela versão utilizada da ilusão, enquanto tiveram maior facilidade para julgar as posições centrais das versões com setas espelhadas na ausência da confusão induzida pela ilusão.

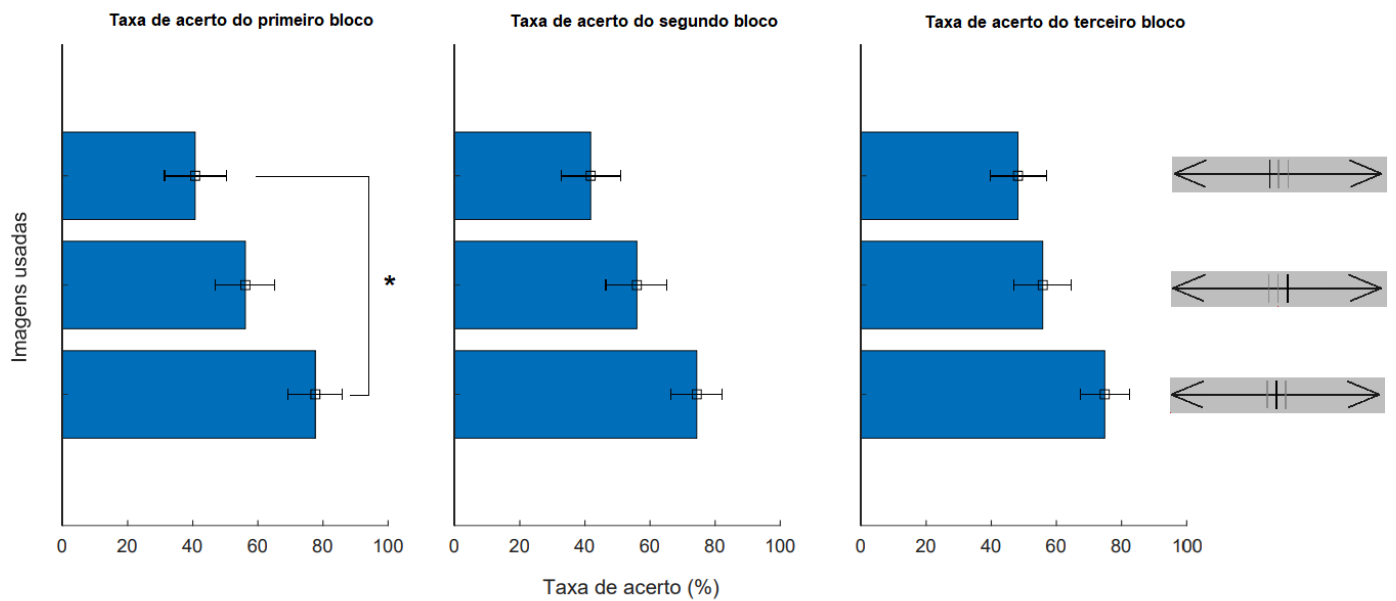


Figura 20. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “fora”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA e as marcações (*) indicam os valores que foram significativamente diferentes entre si ao serem comparados via *pos-hoc* ($p < 0.05$).

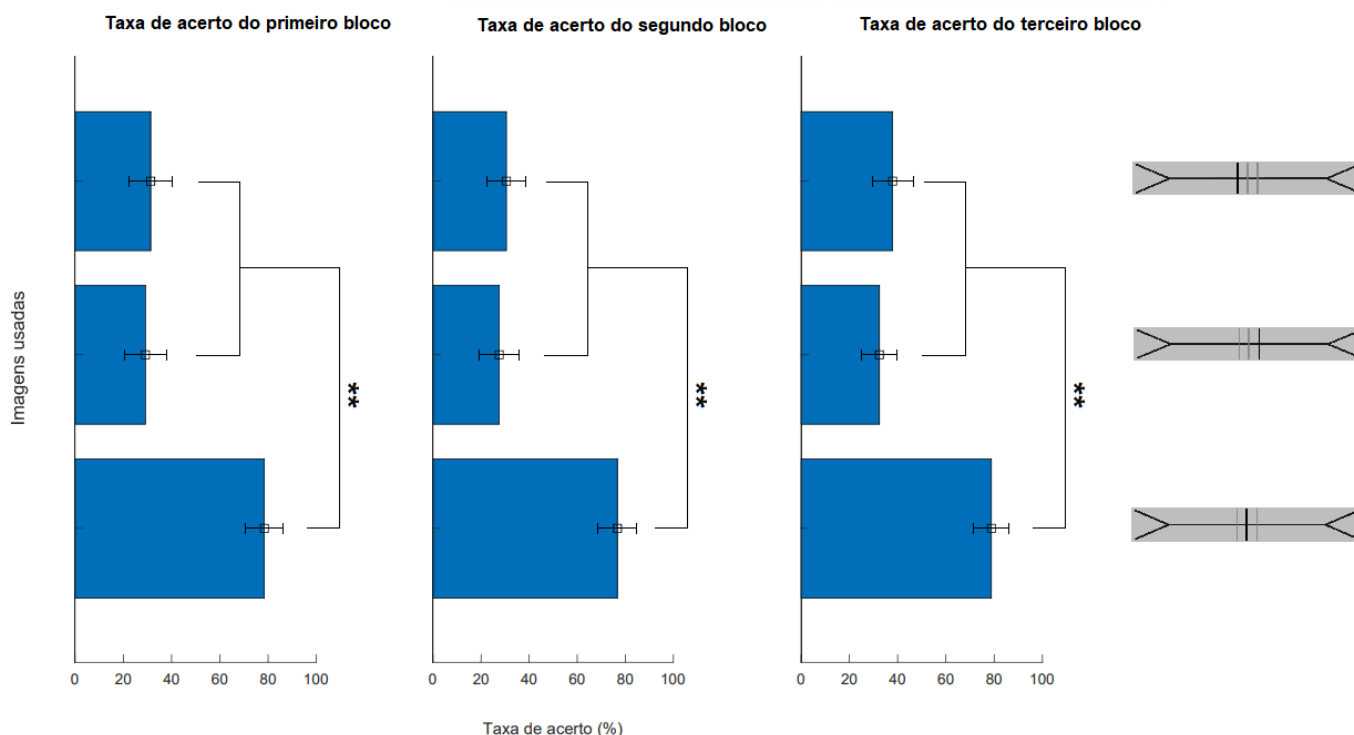


Figura 21. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “dentro”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA e as marcações (**) indicam os valores que foram significativamente diferentes entre si ao serem comparados via *pos-hoc* ($p < 0.01$).

Como ilustrado nas Figuras 20 e 21, ao considerarmos a influência das posições escolhidas dentro de cada modalidade de retas e direcionamento de setas, existiu uma diminuição da taxa de acerto conforme a marcação central se distanciava do meio verdadeiro. Importante notar, contudo, que (excetuando-se a posição do meio verdadeiro) as taxas de acerto se aproximavam muito do valor de 50% - indicando que existiu talvez uma influência de confusão na percepção do participante para com a posição verdadeira da marcação central.

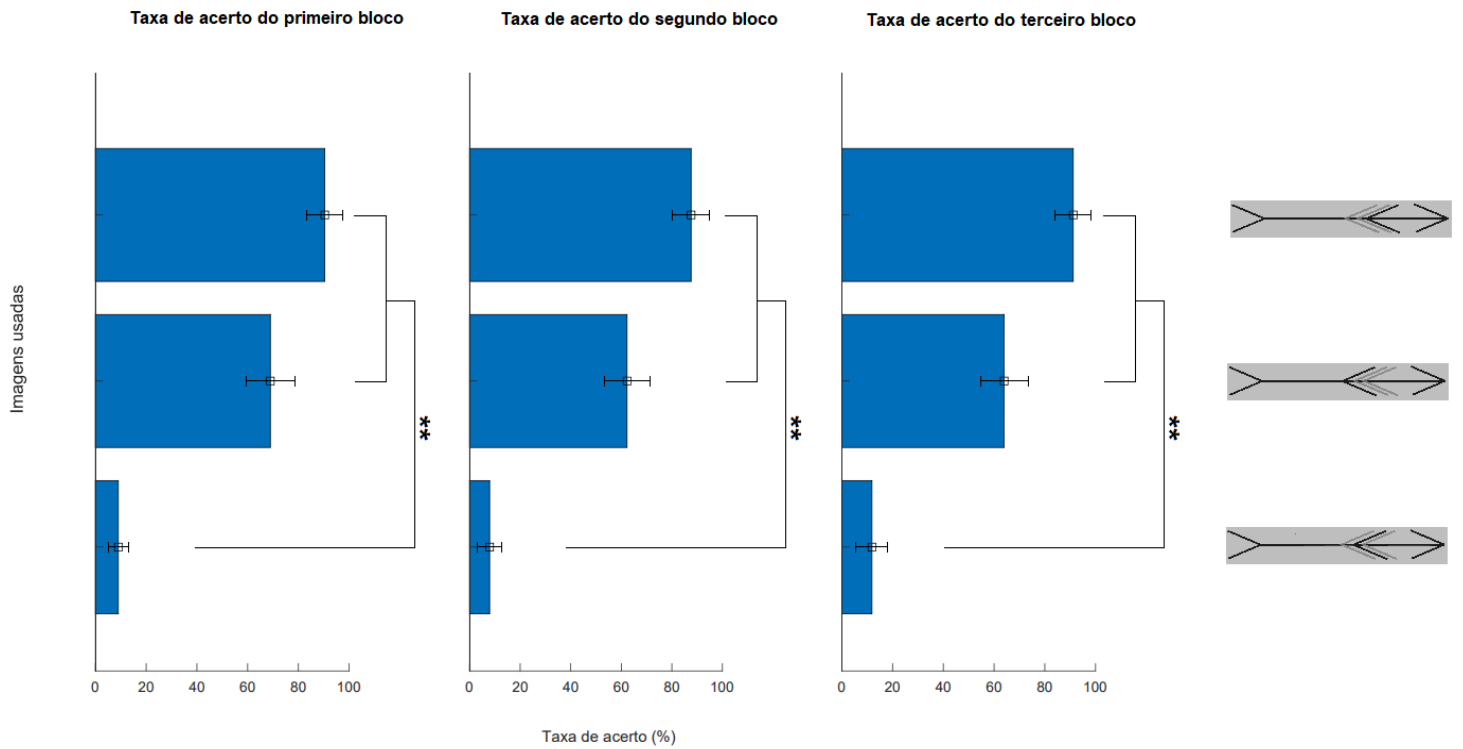


Figura 22. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “direita”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA e as marcações (**) indicam os valores que foram significativamente diferentes entre si ao serem comparados via *pos-hoc* ($p < 0.01$).

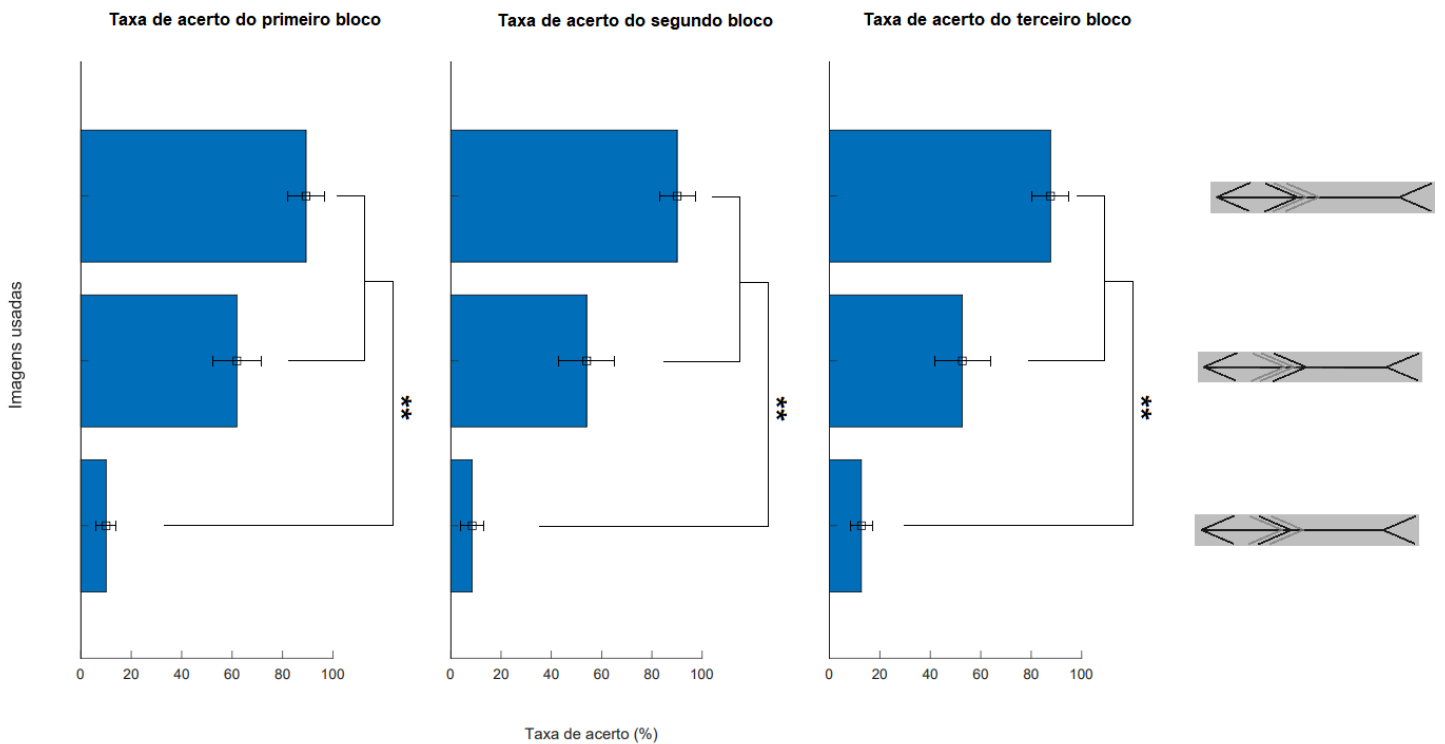


Figura 23. Taxa de acerto das imagens para as posições da reta com as setas apontadas para a “esquerda”. Cada barra representa os valores de acerto absoluto dos participantes, em porcentagem, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA e as marcações (**) indicam os valores que foram significativamente diferentes entre si ao serem comparados via *pos-hoc* ($p < 0.01$).

As Figuras 22 e 23 contudo, possuem o resultado inverso mostrado para as Figuras 20 e 21 anteriores; quando isolamos a influência das diferentes posições da seta central dentro da modalidade de setas espelhadas, vemos que, ao nos distanciarmos da posição do meio verdadeiro (para ambas as direções), maior a taxa de acerto dos participantes - e, quanto mais próxima fica a posição da seta central e a da ponta, ainda maior a taxa de acerto dos participantes; o que pode indicar que a disposição das distâncias entre as pontas das setas influencia no julgamento da ilusão pelos participantes.

Vemos que as taxas de acerto não foram alteradas ao longo das rodadas de experimento, o que mostra que, apesar da grande quantidade de imagens apresentadas ao longo de cada rodada, não parece que houve algum tipo de aprendizado dos participantes relativo à taxa de acerto das imagens - e também não houve prejuízo na performance devido a cansaço ou indisposição do participante.

3.2 RESULTADOS COMPORTAMENTAIS (TEMPO DE RESPOSTA)

As Figuras 24 a 28 ilustram os resultados comportamentais relativos aos tempos de resposta médio de todos os participantes ao serem expostos a cada imagem indicada. Os tempos estão ilustrado em milissegundos e correspondem ao período de tempo entre a apresentação da imagem no monitor até o momento em que o participante apertou o botão de resposta.

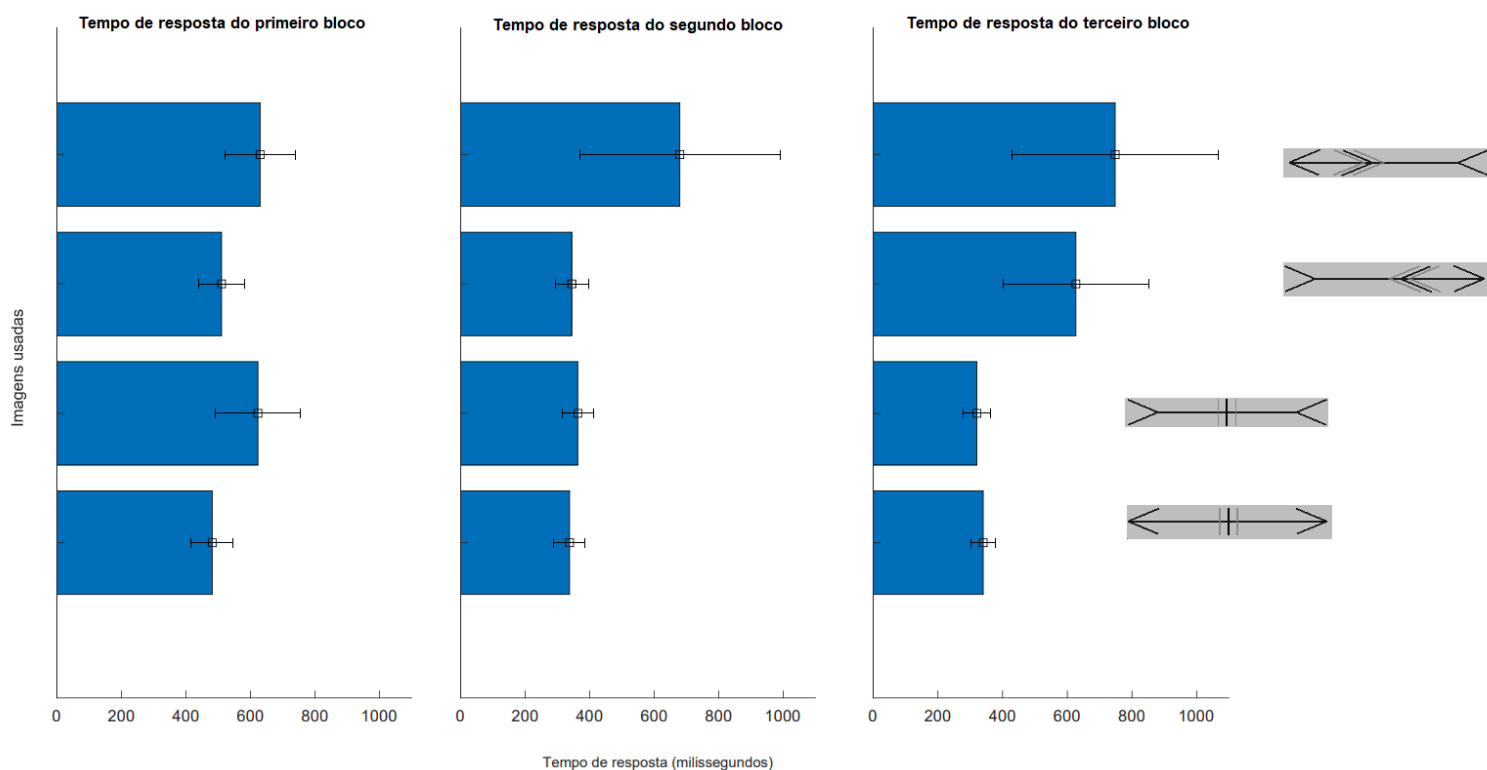


Figura 24. Tempo de resposta médio das imagens com as posições do meio marcadas. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Não houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA.

A Figura 24 mostra que os participantes demoraram um pouco mais tempo para julgar as imagens correspondentes à modalidade de setas alinhadas do que as modalidades de setas espelhadas (resultado não significativo, contudo) - esse resultado já era esperado devido à

maior facilidade de interpretação das imagens com setas espelhadas em decorrência da ausência da confusão induzida pela versão da ilusão.

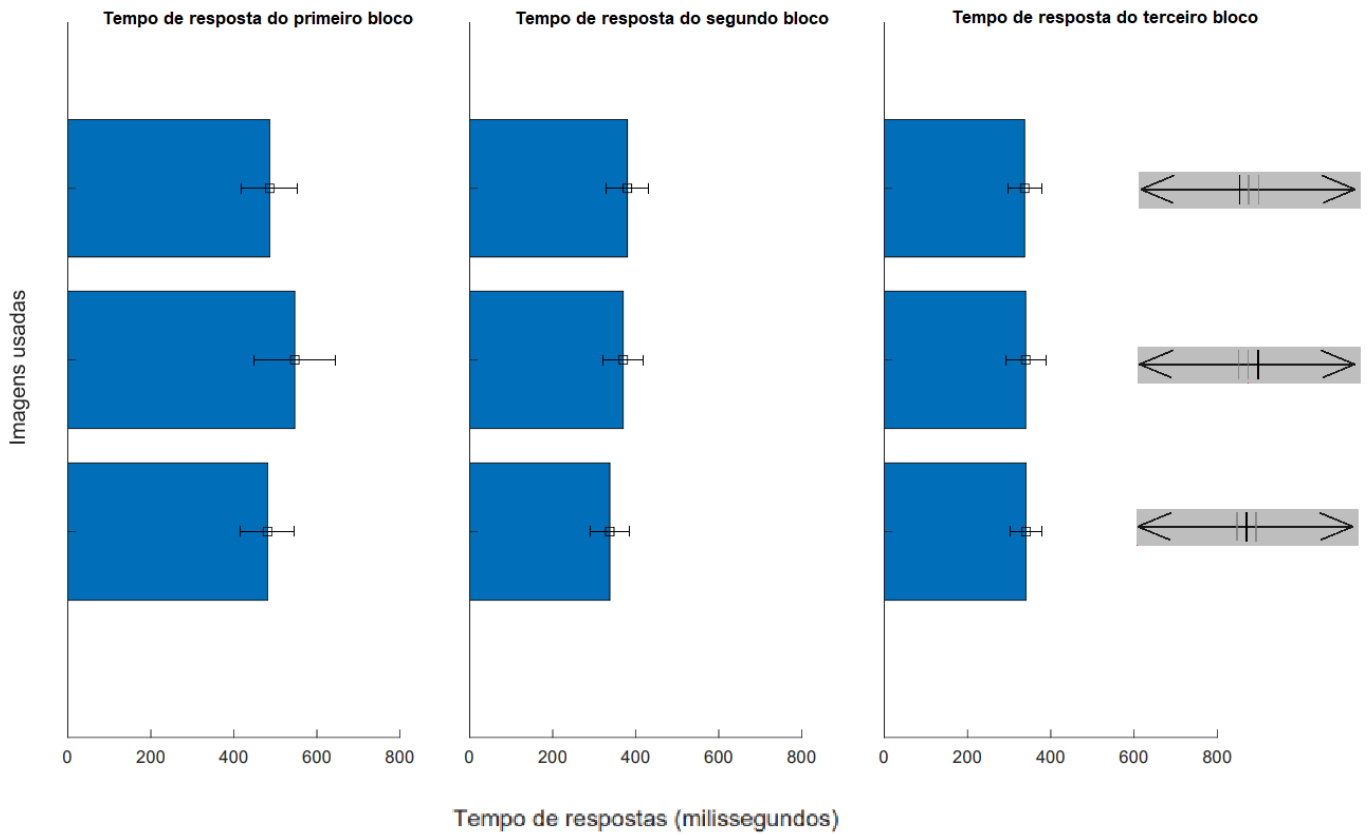


Figura 25. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “fora”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Não houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA.

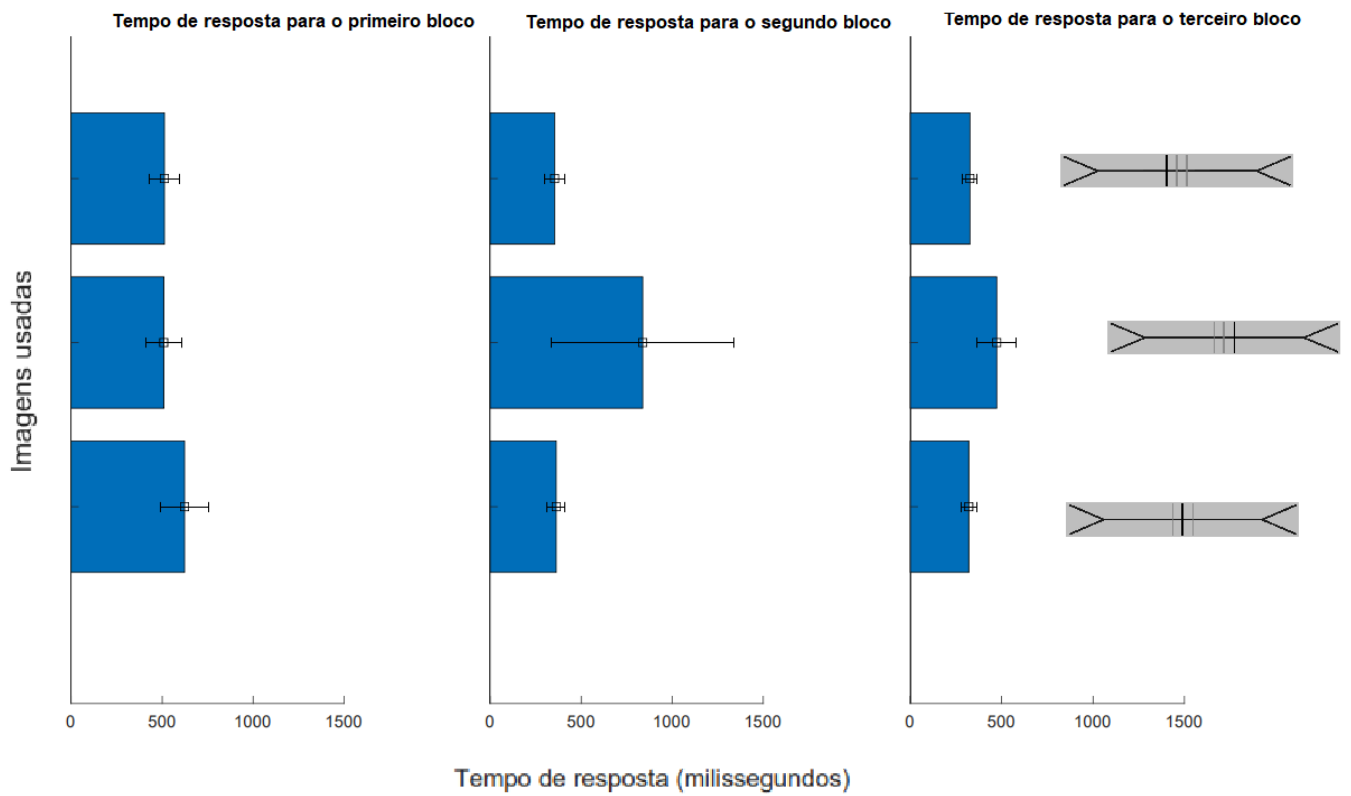


Figura 26. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para “dentro”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Não houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA.

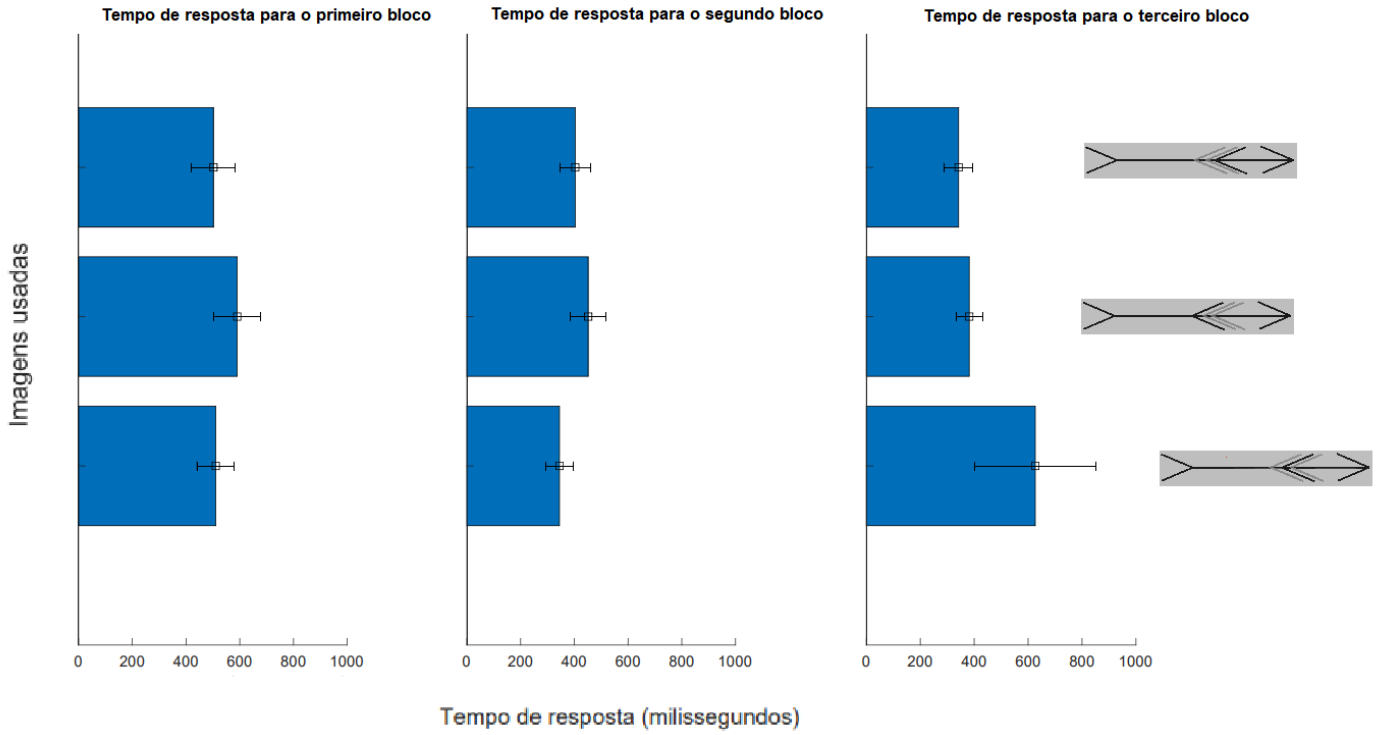


Figura 27. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “direita”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Não houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA.

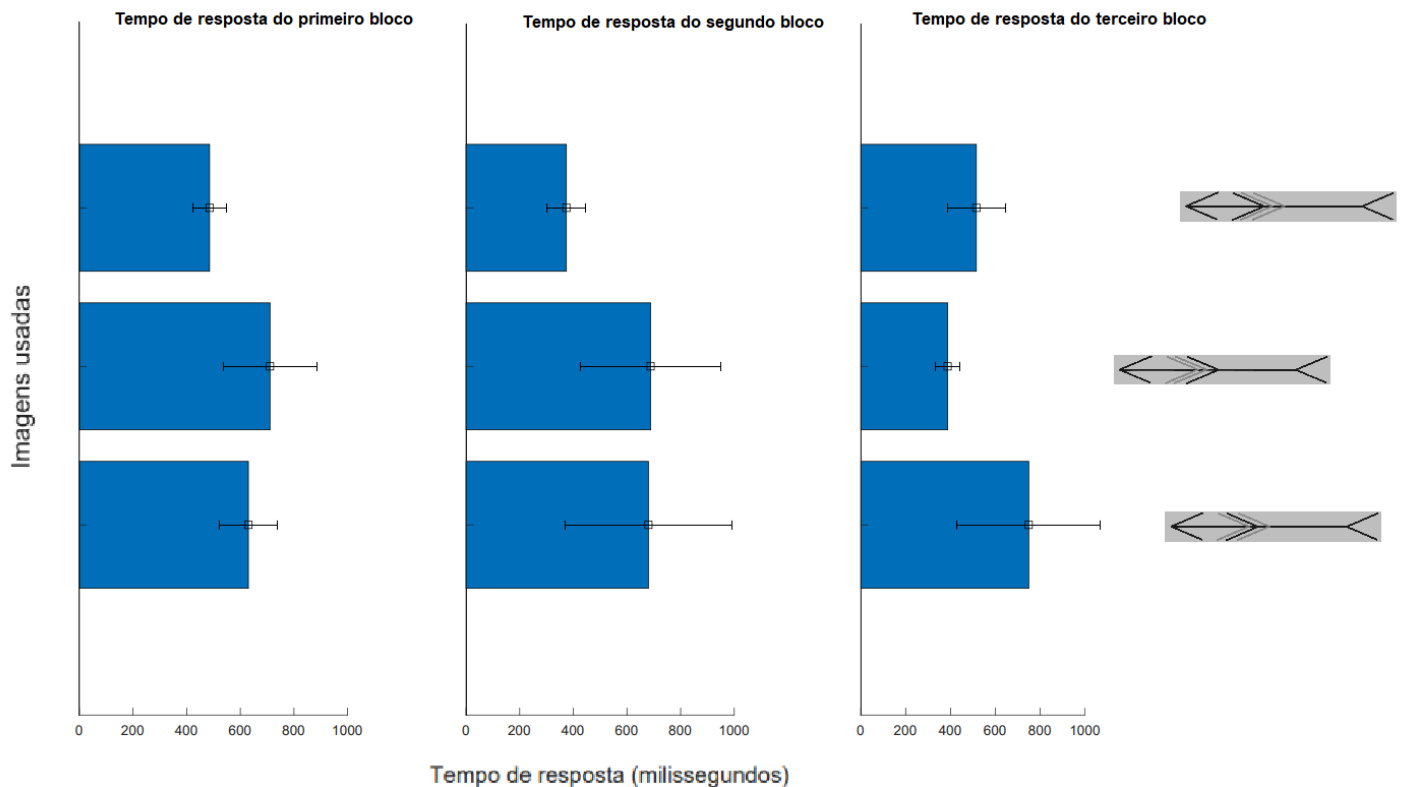


Figura 28. Tempo de resposta médio das imagens para as posições da reta com setas apontadas para a “esquerda”. Cada barra representa os valores de tempo de resposta médio dos participantes, em milissegundos, ao tentarem julgar as imagens ilustradas à direita da figura. Os valores indicados pelas barras de erro correspondem ao erro padrão. Não houve um resultado significativo ($p < 0.05$) entre as categorias de imagens no teste tipo *two-way* ANOVA.

As Figuras 25 a 28 demonstram que não existiu diferença significativa entre os tempos de resposta para nenhuma das modalidades de setas apresentadas. Em aspectos gerais, o tempo mínimo de resposta após a apresentação de qualquer uma das modalidades de imagens foi de 156 ms e o tempo médio foi de 646 ms.

3.3 RESULTADOS ELETROFISIOLÓGICOS

Foram extraídos os *epochs* de cada um dos 14 participantes conforme procedimento ilustrado na Figura 6. Após toda a etapa de pré-processamento e limpeza do sinal, restaram em média para cada participante: 1248 épocas, totalizando 1562 eventos (contabilizando todas as marcações de apresentação de estímulo, marcação de resposta e limites de

boundaries do sinal) e foram preservados, em média, 28 componentes dos 32 elencados no processamento de ICA.

3.3.1 ERPs brutos

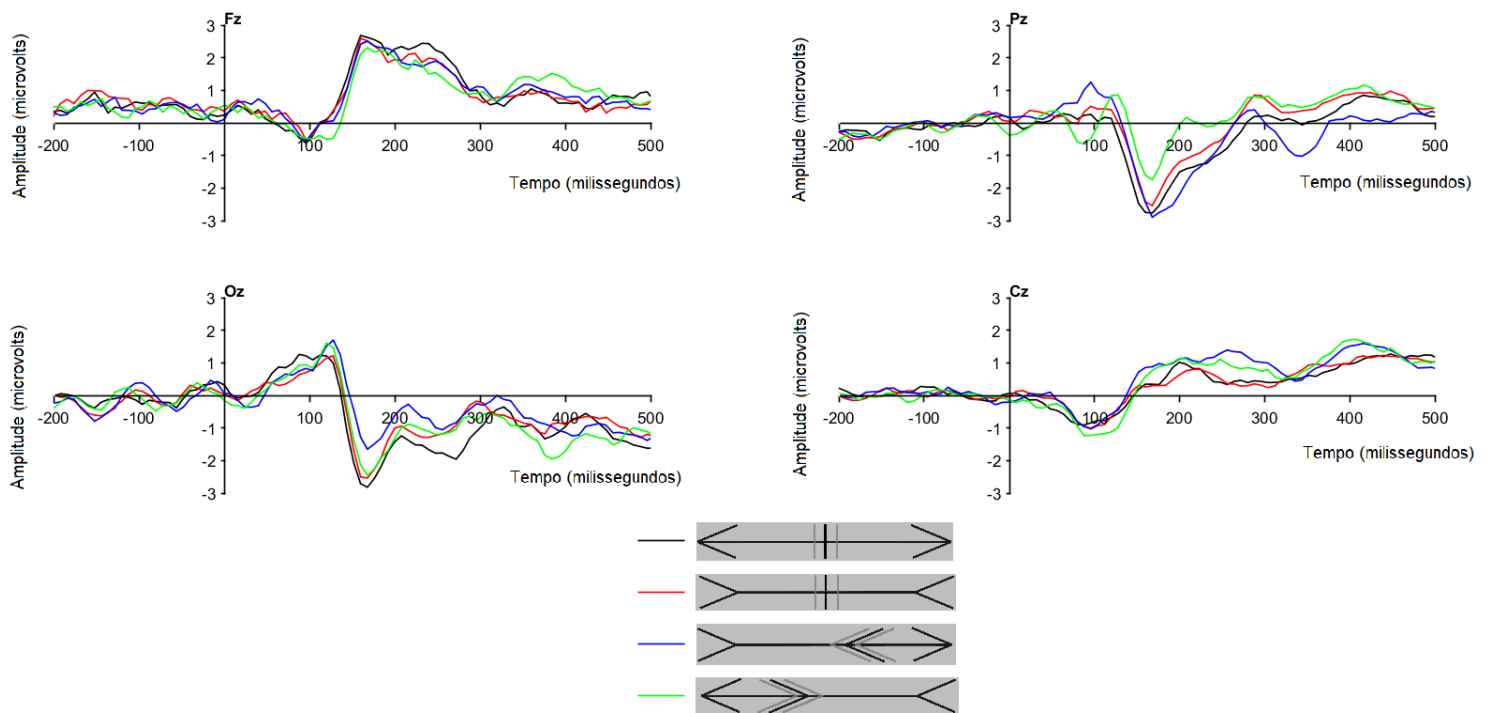


Figura 29. ERPs brutos das imagens com meio verdadeiro para os eletrodos da linha média.

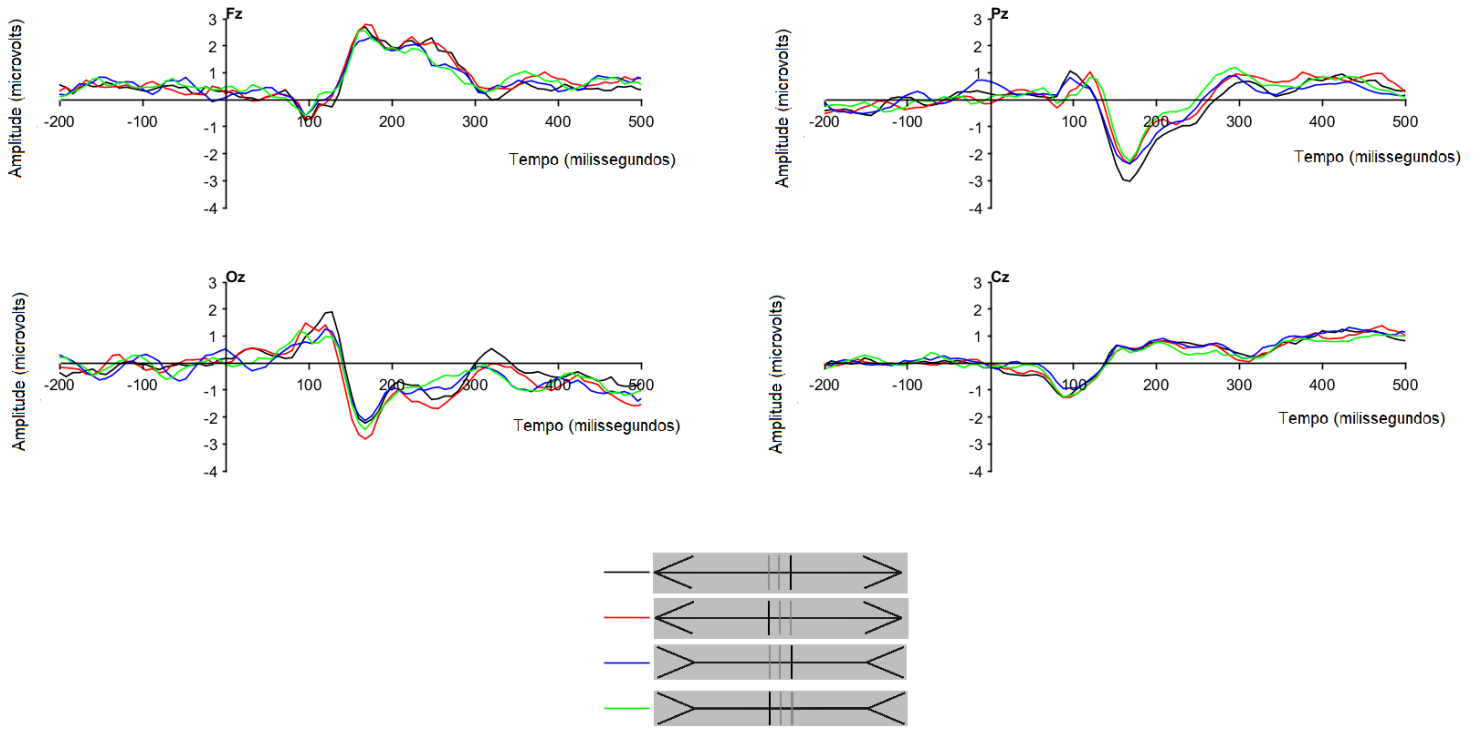


Figura 30. ERPs brutos das imagens com setas espelhadas para as diferentes posições fora do meio.

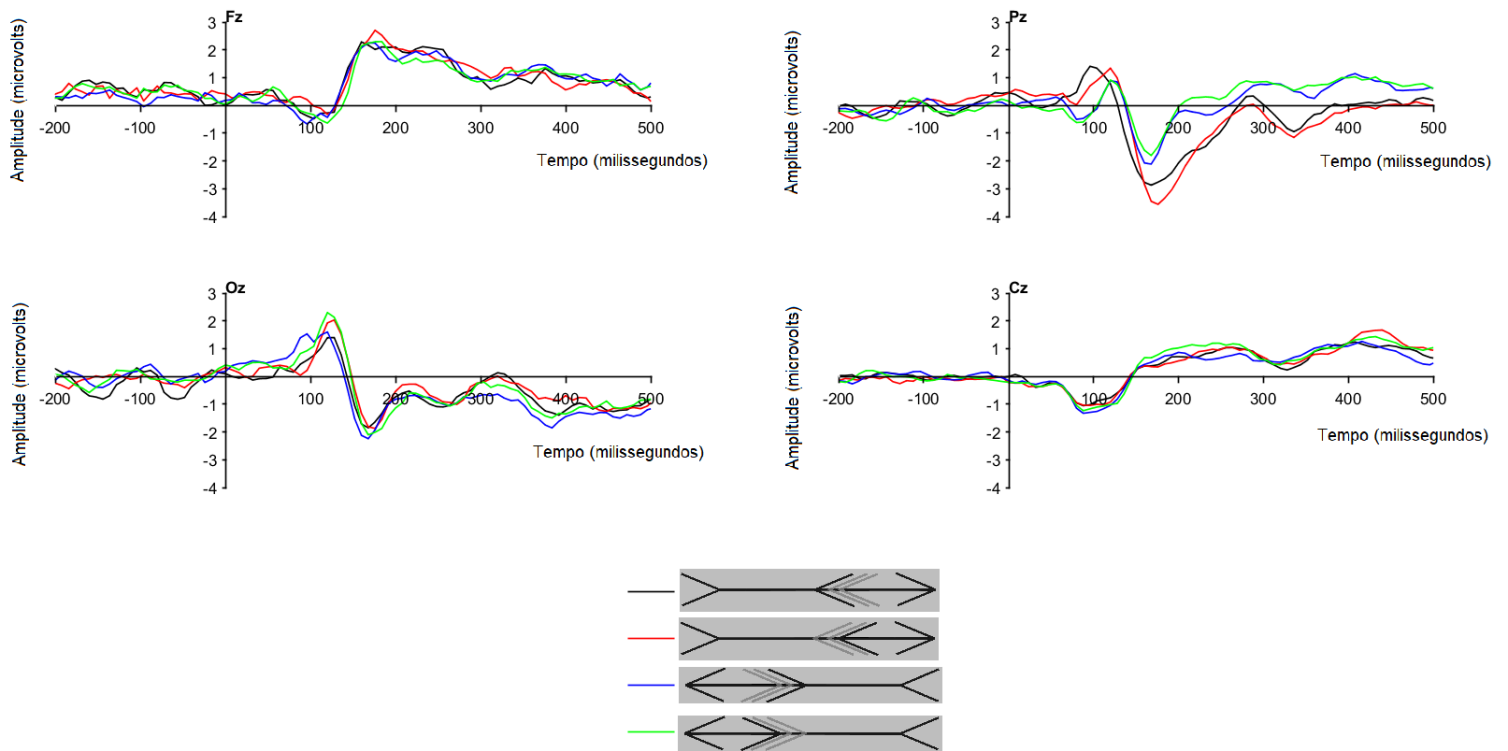


Figura 31. ERPs brutos das imagens com setas alinhadas para as diferentes posições fora do meio.

As Figuras 29 a 31 ilustram os ERPs obtidos aos participantes observarem cada imagem ilustrada. Importante notar que a “forma” dos ERPs é muito semelhante entre si, mas existem algumas imagens que possuem uma diferenciação com relação a um aumento ou diminuição local da curva de potencial - este resultado indica que o processamento “geral” das imagens possui semelhanças importantes no quesito de processamento visual global, mas as pequenas diferenças de potencial podem indicar diferenças locais importantes para elucidar o tipo de informação que está sendo extraída/processada ao considerar cada imagem apresentada.

3.3.2 Mapas de superfície (*Scalp maps*)

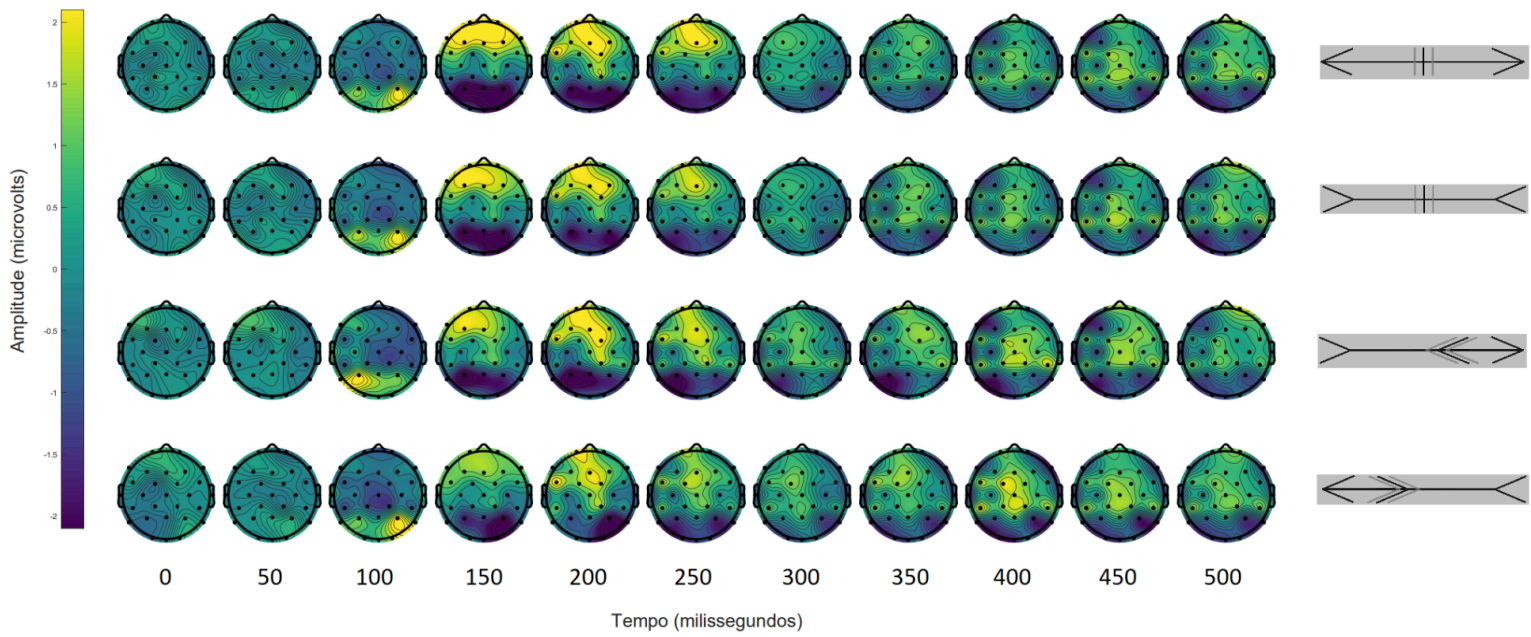


Figura 32. Mapa de superfície médio para todas apresentações de estímulos de todos participantes representando a ativação dos eletrodos ao longo do período de exibição das imagens com marcação das posições do meio para cada modalidade de retas (espelhadas e alinhadas).

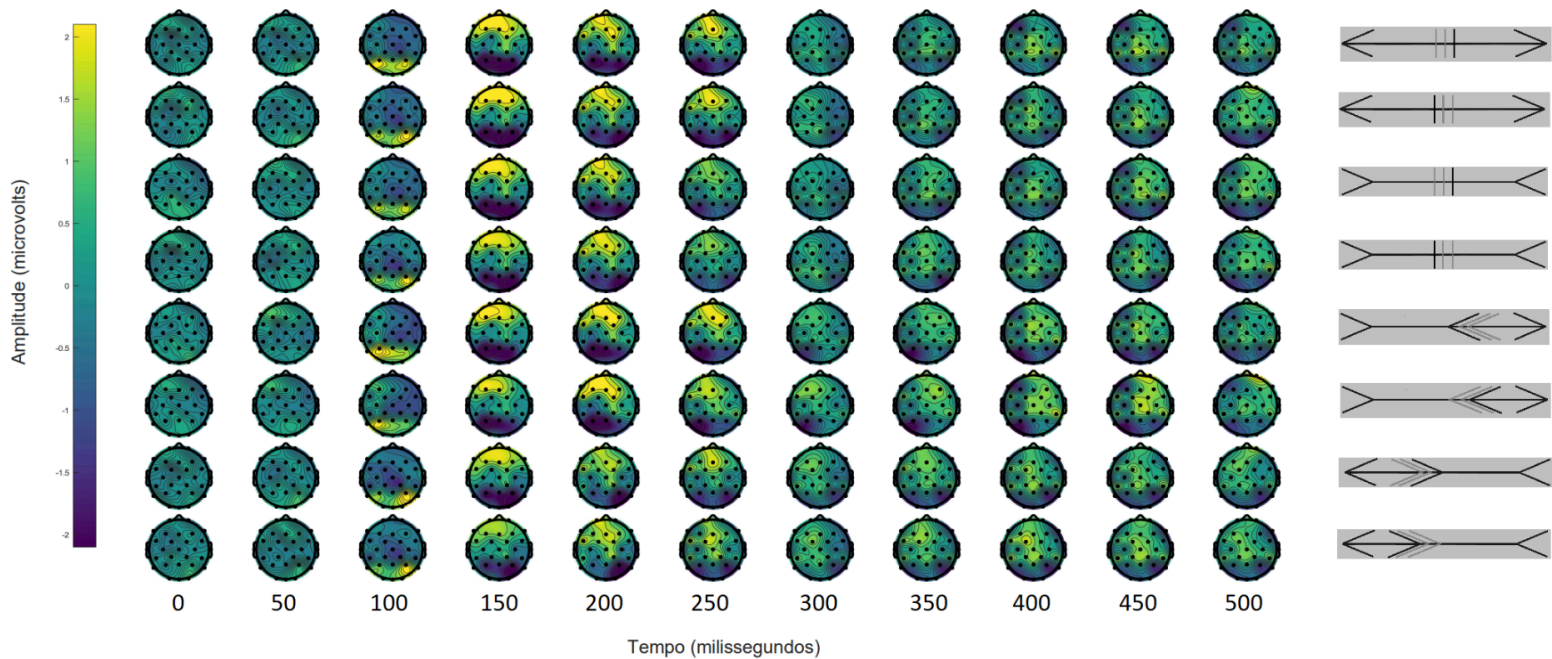


Figura 33. Mapa de superfície médio para todas apresentações de estímulos de todos participantes para representando a ativação dos eletrodos ao longo do período de exibição das imagens com marcação das posições fora do meio de cada modalidade de retas (espelhadas e alinhadas).

As Figuras 32 e 33 ilustram a distribuição da ativação topográfica de cada imagem apresentada após a apresentação do estímulo.

Vimos que as curvas de ERPs evidenciaram um comportamento global muito parecido entre si, sendo que algumas imagens apresentaram um comportamento local diferente que pode significar uma discrepância em questão de extração/processamento de informações no processamento visual destas imagens. Para melhor isolar essas diferenças, foram feitas subtrações dos sinais de ERP (Figura 34 a 37, ilustradas a seguir).

3.3.3 Subtração de ERPs

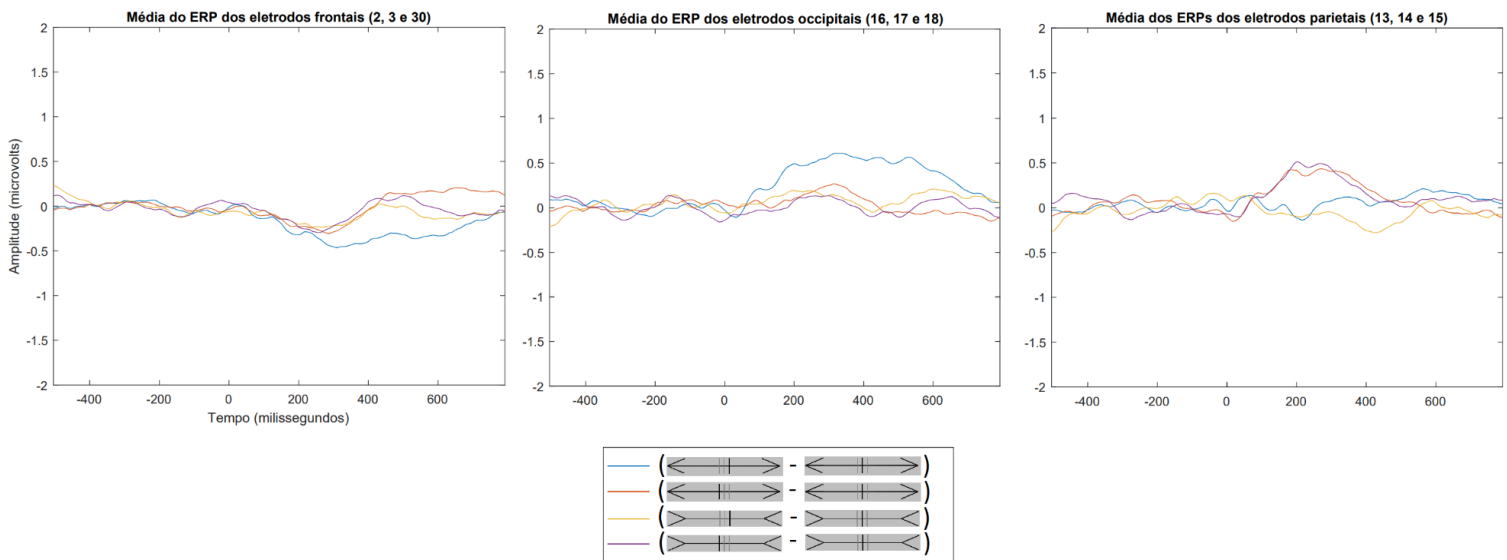


Figura 34. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as diferentes posições das retas com setas espelhadas em relação as mesmas retas seccionadas ao meio. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

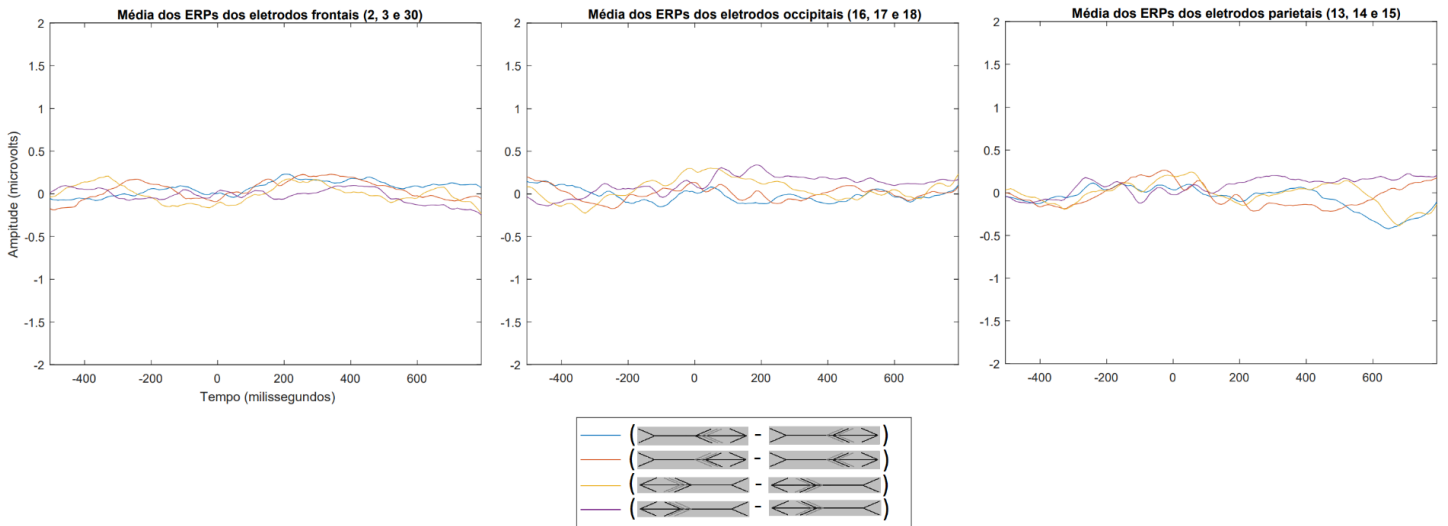


Figura 35. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as diferentes posições das retas com setas alinhadas em relação as mesmas retas seccionadas ao meio. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

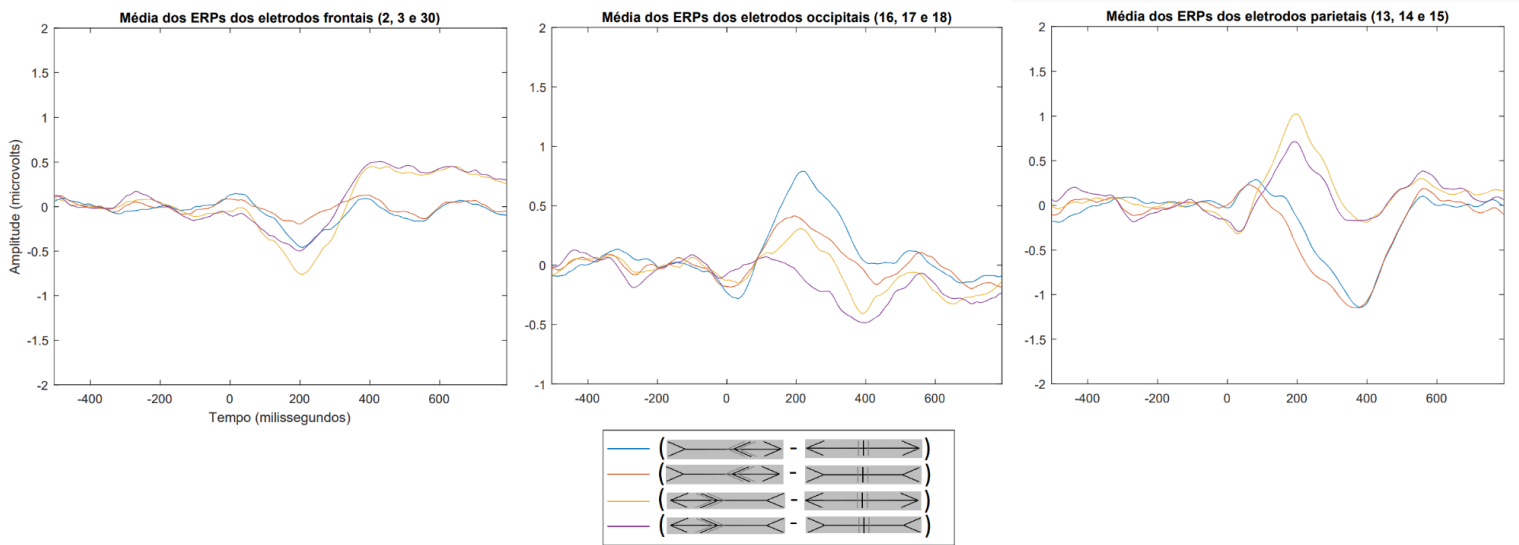


Figura 36. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as posições do meio das retas com setas alinhadas em relação a mesma posição das retas com setas espelhadas. As imagens correspondem, respectivamente às medias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

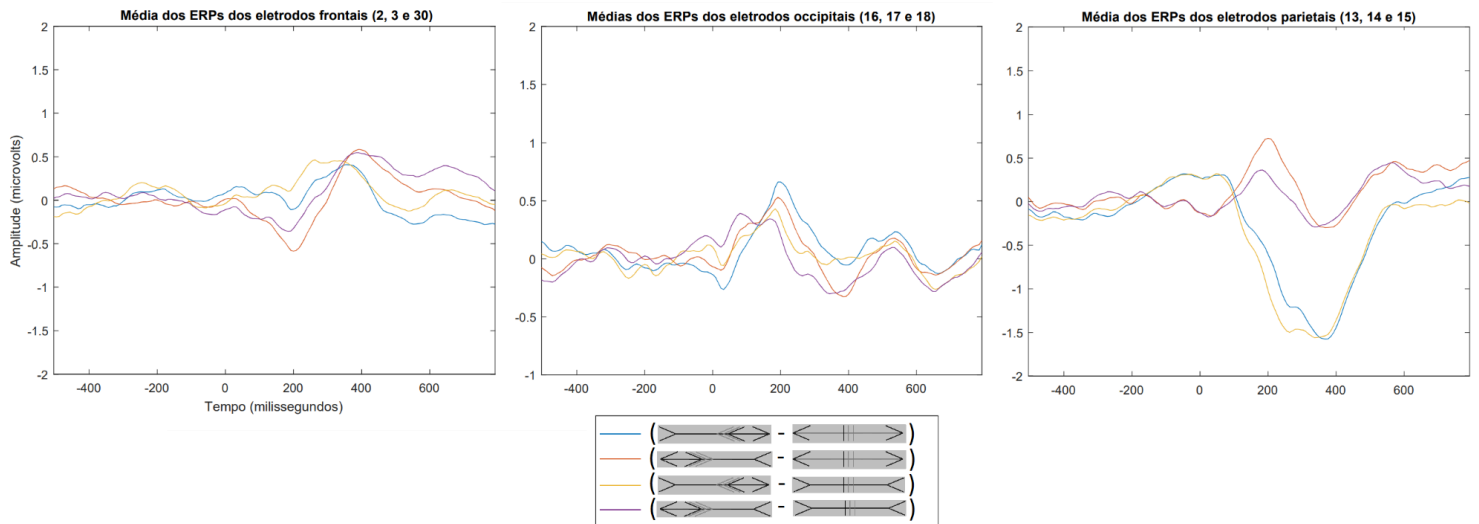


Figura 37. Subtração dos sinais de ERP médios dos participantes ao verem as posições a mesma posição fora do meio (equivalente ao ponto: $M + C/20$) das retas com setas alinhadas em relação a mesma posição das retas com setas espelhadas. As imagens correspondem, respectivamente às médias dos eletrodos frontais (F2, Fz e F4), occipitais (O1, Oz e O2) e parietais (P2, Pz e P4).

As subtrações evidenciaram uma possível diferença no quesito do processamento de informações para interpretação de posição das imagens para os eletrodos parietais e occipitais e uma possível diferença no quesito de interpretação de diferentes aspectos físicos das imagens (considerando as mesmas posições) para os eletrodos parietais.

3.2 DISCUSSÃO

Considerando os resultados obtidos para os ERPs brutos, em todas as modalidades de imagens foi elicitado um pequeno componente do tipo N100 e um considerável P170 no eletrodo Fz, bem como um N170 no eletrodo Pz. Visto que a tarefa apresentada aos participantes é de natureza visual, já era esperando observar a presença dos componentes N100 e P170, visto que eles estão relacionados ao processamento das informações básicas do sistema visual e são considerados os primeiros componentes de ERP modulados pela atenção a aparecerem (Magnun, 1993).

Tais resultados dos ERPs brutos são similares ao encontrado por Qiu e colaboradores (Qiu et al., 2008), que caracterizaram o sinal de EEG evocado pela apresentação da forma clássica da ilusão de Müller-Lyer (Figura 4). É interessante observar que os ERPs brutos evocados em ambos estudos são bastante semelhantes, sugerindo que não há diferenças expressivas no processamento cortical entre as modalidades das ilusões utilizadas em ambos os estudos. Este resultado pode ter relação com o fato dos componentes físicos das imagens utilizadas por Qiu e colaboradores ser muito semelhante ao utilizado no nosso estudo, sendo que a mudança de comprimento das secções da reta (ocasionado pela mudança de posicionamento da seta central) não correspondeu ao resultado encontrado por Qiu e colaboradores após alterar o comprimento das retas nas modalidades de imagens utilizadas. Tal diferença pode indicar que o resultado encontrado por Qiu, na realidade, refletiria uma alteração de ERP resultante simplesmente da variação de área da imagem captada pela retina, e não uma variação de processamento da informação visual em si (Busch, 2004; Bayer, 2012; Pfabigan, 2015).

Existem evidências de que o P100 reflita o processamento computacional local das características visuais no processamento tipo bottom-up (Sadanori, 2001). Este componente parece ser modulado pela atenção seletiva do participante - especialmente quando a imagem-alvo está posicionada na região do campo visual que o participante está prestando atenção, e sua amplitude máxima costuma acontecer na região occipital lateral, contralateral ao campo visual no qual o estímulo se apresenta (Magnun, 1993). Esta última característica, em especial, pode ser uma explicação possível para o resultado encontrado nos mapas de superfície (scalp-maps) deste estudo, onde ocorreu uma inversão do direcionamento das setas alinhadas com relação à lateralidade da região occipital (ou seja: quando foi apresentada uma reta com as setas alinhadas apontando para a esquerda, a região occipital direita possuía maior ativação, e vice-versa). Considerando o exposto, acreditamos que a presença do componente P1 nos resultados encontrados no presente estudo reflitam o processamento local das informações visuais mais básicas da ilusão visual. Entretanto, tendo em vista que tal componente ainda pode sofrer influência da modulação atencional dos participantes, acreditamos que o este componente reflita predominantemente o processamento do tipo bottom-up com interações do tipo top-down.

Os resultados encontrados para o componente N1, por sua vez, estão de acordo com o encontrado por Weidner et al (2010), em que foi descrito um componente negativo ao redor de 200ms após a apresentação do estímulo no córtex occipito-temporal. Partindo da proposta da teoria de Charles D. Gilbert e Aniruddha Das, este componente indicaria o envolvimento do processamento de identificação do objeto na geração da ilusão de Müller-Lyer (Weidner et al, 2010). No presente estudo, obtivemos um componente negativo por volta de 100ms (resultado obtido tanto para os ERPs brutos quanto para os resultados de *scalp-maps*), e acreditamos que a diferença de tempo entre um resultado e outro pode ser devida à diferença de precisão temporal entre as técnicas. Importante notar que o resultado encontrado para o componente N1 pode ter se apresentado com baixa amplitude por conta de um efeito chamado *ERP Refractoriness* (refratariedade do ERP, em tradução livre), onde os primeiros componentes sensoriais e perceptivos (como é o caso do componente N1) são reduzidos em amplitude quando o estímulo eliciador segue logo após outro estímulo (Woodman, 2010); existe a proposta de que o período refratário do N1 auditivo pode durar dezenas de segundos (Nelson & Lassman, 1973), e acreditamos que possa existir a mesma característica para o N1 visual.

Ainda sobre os sinais de ERP brutos, obtivemos um componente positivo evocado por volta de 400ms que é consistente com o resultado encontrado tanto por Qiu et al. (2008) quanto por Weidner et al (2010), utilizando EEG e Magnetoencefalografia (MEG), respectivamente. Em seu artigo, Qiu e colaboradores afirmam que o resultado encontrado apontava para um sinal de natureza cognitiva (*top-down*) e localizado no córtex cingulado anterior e em regiões frontais, e sugeriu que tal componente seria relacionado a processos cognitivos de julgamento da tarefa. Weidner e colaboradores encontraram o mesmo resultado sem aplicar uma tarefa de demanda cognitiva (na modalidade da tarefa com gravação do sinal de MEG) e apresentando uma modalidade de ilusão visual muito semelhante. Ainda, Weidner e colaboradores encontraram um sinal localizado no giro frontal inferior do córtex posterior direito, que é consistente com o encontrado por Vossel et al. (2009) e que também foi elicitado por um estímulo visual sem demanda cognitiva. Nos resultados do presente estudo, não houve uma ativação diferencial relevante de eletrodos, nos mapas de superfície (*scalp maps*), a partir dos 300ms após a apresentação do estímulo - o que pode ter sido resultado de limitações da própria técnica, visto que o EEG não possui uma localização espacial muito

acurada. Ainda assim, considerando os resultados dos ERPs brutos, a possível maior amplitude do sinal ao redor de 400ms no eletrodo Cz está mais próximo com os resultados encontrados por Weidner et al (2010), que sugerem que existe uma influência da ativação do giro frontal inferior e que esta reflete processos relacionados à percepção (ou identificação) consciente da ilusão.

A subtração dos ERPs, por sua vez, nos informa sobre a atividade elétrica cerebral diferencial relativa às tarefas de discriminação do comprimento das retas. Em outras palavras, torna-se possível isolar tanto o componente *top-down* do julgamento da tarefa quanto o componente *bottom-up* do processamento das características visuais das retas, sendo que cada subtração isola um componente específico das imagens, por exemplo: ao subtrairmos o sinal do participante ao enxergar a reta com setas espelhadas pelo sinal ao enxergar as setas alinhadas e considerando a mesma posição da marcação central, isolamos o sinal referente ao processamento diferencial entre os tipos de retas apresentadas (setas espelhadas vs setas alinhadas) - e o resultado desta subtração está mais voltado, provavelmente, para um processamento do tipo *bottom-up*, visto que existem apenas aspectos visuais diferentes para serem julgados. É importante considerar que não foi realizada uma apresentação de imagens sem a presença da ilusão de Müller-Lyer para que fosse possível isolar esta informação do sinal - visto que as setas das pontas do estímulo sempre causam a ilusão, mesmo parcialmente, fazendo o estímulo parecer maior (setas apontando para dentro) ou menor (setas apontando para fora). Assim, é importante destacar que não estamos comparando uma condição com uma ilusão com uma condição sem ilusão, mas sim sobre quais condições e quais componentes da ilusão interferem com o processo cognitivo de julgamento e qual nível de influência destes componentes para gerar o efeito completo da ilusão.

Ainda sobre os resultados da subtração dos ERPs: ao isolarmos o processamento diferencial do julgamento de uma mesma reta sob diferentes marcações centrais (Figuras 34 e 35), não houve um processamento diferencial em nenhum dos eletrodos - resultado que sugere que não houve diferença do processamento do tipo *top-down* entre as modalidades das imagens. Já nos resultados do processamento diferencial do julgamento de uma mesma posição da marcação central para as diferentes retas (Figuras 36 e 37), vemos que houve diferença entre os sinais comparados - em especial, nos eletrodos parietais e occipitais;

resultado este que já era esperado, visto que a região parietal é conhecidamente responsável pelo processamento perceptual no geral e a região occipital é predominantemente responsável pelo processamento das informações visuais (Kropf, 2019; Gardner; Gardner, 2021).

Este trabalho apresentou uma proposta experimental com vistas a melhor entender a dinâmica do processamento de informações visuais presentes na ilusão de Müller-Lyer e entender qual tipo de processamento predominante para geração desta ilusão no cérebro humano, bem como quais possíveis vias estão envolvidas no seu processamento (especialmente considerando as vias extra-estriatais), tendo em vista uma lacuna na literatura atual sobre o tema e possíveis inconsistências apresentadas entre estudos que se propuseram estudar a ilusão de Müller-Lyer e a dinâmica cerebral envolvida na geração desta ilusão. Foram apresentadas muitas modalidades de imagens aos participantes e, apesar o tempo longo para realização da tarefa devido à grande quantidade de estímulos, foi possível verificar que não houve prejuízo no aspecto de esforço cognitivo por parte dos participantes - o que garante que tivemos um resultado consistente, e com um grande número amostral para geração dos ERPs com grande confiança nos resultados encontrados - sobretudo ao comparar tais resultados aqui apresentados com a literatura científica de estudo semelhantes. Apesar disso, ainda é preciso que sejam feitas as medidas estatísticas dos resultados encontrados para garantir que os resultados foram significativamente diferentes entre si.

3.2.1 Próximos passos

Como próximos passos planejamos continuar as análises das diferenças entre os sinais a partir de outras subtrações de modalidades de imagens para evidenciar aspectos do sinal que não foram percebidos até o momento da apresentação deste trabalho. O grupo de pesquisa irá seguir explorando, por exemplo, possíveis subtrações a fim de tentar isolar elementos cognitivos que ocorrem apenas quando os participantes são iludidos pela ilusão de Müller-Lyer e utilizando como controle estímulos com setas espelhadas.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho replicamos em nosso grupo de pesquisa uma tarefa de discriminação visual da ilusão de Müller-Lyer adequada para a aquisição de ERPs. Os resultados comportamentais demonstraram que houve diferença na percepção das imagens apresentadas (tendo em vista os resultados de taxas de acerto dos participantes) ao mesmo tempo que não houve prejuízo no aspecto de julgamento da tarefa (considerando os resultados de tempo de resposta dos participantes), o que indica que a tarefa proposta foi adequada para o experimento proposto de discriminação visual da ilusão. Considerando isso, os resultados eletrofisiológicos mostraram a presença de ERPs conhecidamente relacionados a eventos visuais e que possivelmente ocorre uma diferença importante no processamento das imagens apresentadas - o que reforça, portanto, que a tarefa apresentada obteve sucesso em isolar alguns dos aspectos visuais responsáveis pelo efeito da Ilusão de Müller-Lyer. Novas análises dos dados coletados e apresentados nesta dissertação podem melhor elucidar onde e quando ocorrem as etapas de processamento cortical que causam a ilusão de Müller-Lyer.

Os resultados do presente trabalho replicaram parcialmente os encontrados por outros grupos que caracterizaram a atividade neural durante a exposição à ilusão de Müller-Lyer, e apontam para uma possível predominância do processamento do tipo *bottom-up* como responsável pela geração desta ilusão. Nossos resultados vão ao encontro dos estudos de Weidner e colaboradores (2010), apresentando indícios de que esta ilusão é provavelmente gerada nas regiões ligadas à via de processamento visual dorsal.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] Bastos, N. S., Adamatti, D. F., & Billa, C. Z. (2016). Discovering Patterns in Brain Signals Using Decision Trees. *Computational intelligence and neuroscience*, 2016, 6391807. <https://doi.org/10.1155/2016/6391807>
- [2] Bayer, M., Sommer, W., & Schacht, A. (2012). Font size matters--emotion and attention in cortical responses to written words. *PloS one*, 7(5), e36042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036042>
- [3] Bulatov, A., & Bertulis, A. (1999). Distortions of length perception. *Biological cybernetics*, 80(3), 185–193. <https://doi.org/10.1007/s004220050516>
- [4] Busch, N. A., Debener, S., Kranczioch, C., Engel, A. K., & Herrmann, C. S. (2004). Size matters: effects of stimulus size, duration and eccentricity on the visual gamma-band response. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 115(8), 1810–1820. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.03.015>
- [5] Busey, T. A., & Vanderkolk, J. R. (2005). Behavioral and electrophysiological evidence for configural processing in fingerprint experts. *Vision Research*, 45, 431–448.
- [6] Carmel, D., & Bentin, S. (2002). Domain specificity versus expertise: factors influencing distinct processing of faces. *Cognition*, 83(1), 1–29. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(01\)00162-7](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(01)00162-7)
- [7] Costa, A. L. L., Silva, R. C., Coelho-Cordeiro, P. H., da Silveira, F. S., Barros, M., Caixeta, F. V., & Maior, R. S. (2021). The Perception of the Müller-Lyer Visual Illusion in Schizophrenics and Non-human Primates: A Translational Approach. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 15, 641776. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.641776>
- [8] Chaumon, M., Bishop, D. V., & Busch, N. A. (2015). A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *Journal of neuroscience methods*, 250, 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.025>
- [9] Dawson, G., Carver, L., Meltzoff, A. N., Panagiotides, H., McPartland, J., & Webb, S. J. (2002). Neural correlates of face and object recognition in young children with autism spectrum disorder, developmental delay, and typical development. *Child Development*, 73, 700–717.
- [10] Dawson, G., Webb, S. J., Wijsman, E., Schellenberg, G., Estes, A., Munson, J., & Faja, S. (2005). Neurocognitive and electrophysiological evidence of altered face processing in parents of children with autism: implications for a model of abnormal development of social brain circuitry in autism. *Development and psychopathology*, 17(3), 679–697. <https://doi.org/10.1017/S0954579405050327>
- [11] Deroy, O. (2015). 'Modularity of Perception', in Mohan Matthen (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Perception*. 10.1093/oxfordhb/9780199600472.013.028.

- [12] Dragoi, V., & Lockhead, G. (1999). Context-dependent changes in visual sensitivity induced by Müller-Lyer stimuli. *Vision research*, 39(9), 1657–1670. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(98\)00198-9](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(98)00198-9)
- [13] Gardner, E. P.; Gardner, D. Sensory Coding. In: Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2021). *Principles of neural science* (4th ed.). McGraw-Hill, Health Professions Division.
- [14] Gentaz, E., Camos, V., Hatwell, Y., & Jacquet, A.-Y. (2004). The Visual and the Haptic Müller-Lyer Illusions: Correlation Study. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, 13(2).
- [15] Gilbert, C. D; Das, A. The Constructive Nature of Visual Processing. In: Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2021). *Principles of neural science* (4th ed.). McGraw-Hill, Health Professions Division.
- [16] Gibbs, F. A., Davis, H., & Lennox, W. G. (1935). The electro-encephalogram in epilepsy and in conditions of impaired consciousness. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 34, 1133–1148.
- [17] Jackson, A. F., & Bolger, D. J. (2014). The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: a review for the rest of us. *Psychophysiology*, 51(11), 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/psyp.12283>
- [18] Jadhav, C., Kamble, P., Mundewadi, S., Jaiswal, N., Mali, S., Ranga, S., Suvvari, T. K., & Rukadikar, A. (2022). Clinical applications of EEG as an excellent tool for event related potentials in psychiatric and neurotic disorders. *International journal of physiology, pathophysiology and pharmacology*, 14(2), 73–83.
- [19] Jasper, H. H., & Carmichael, L. (1935). Electrical potentials from the intact human brain. *Science (New York, N.Y.)*, 81(2089), 51–53. <https://doi.org/10.1126/science.81.2089.51>
- [20] Jonas, J. (2016). Bases neurophysiologiques de la perception des visages: potentiels évoqués intracérébraux et stimulation corticale focale. *Automatique / Robotique*. Université de Lorraine.
- [21] Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2021). *Principles of neural science* (4th ed.). McGraw-Hill, Health Professions Division.
- [22] Kang, E., Keifer, C. M., Levy, E. J., Foss-Feig, J. H., McPartland, J. C., & Lerner, M. D. (2018). Atypicality of the N170 Event-Related Potential in Autism Spectrum Disorder: A Meta-analysis. *Biological psychiatry. Cognitive neuroscience and neuroimaging*, 3(8), 657–666. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2017.11.003>
- [23] King, D. J., Hodgekins, J., Chouinard, P. A., Chouinard, V. A., & Sperandio, I. (2017). A review of abnormalities in the perception of visual illusions in schizophrenia. *Psychonomic bulletin & review*, 24(3), 734–751. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1168-5>
- [24] Kropf, E., Syan, S. K., Minuzzi, L., & Frey, B. N. (2019). From anatomy to function: the role of the somatosensory cortex in emotional regulation. *Revista brasileira de psiquiatria (Sao Paulo, Brazil : 1999)*, 41(3), 261–269. <https://doi.org/10.1590/1516-4446-2018-0183>

- [25] Maddaluno, O., Facchin, A., Zavagno, D., Bolognini, N., Gianoli, E., Curreri, E. M., & Daini, R. (2019). Evidence of top-down modulation of the Brentano illusion but not of the glare effect by transcranial direct current stimulation. *Experimental brain research*, 237(8), 2111–2121. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05577-0>
- [26] Mangun, G. R., Hillyard, S. A., & Luck, S. J. (1993). Electrocortical substrates of visual selective attention. In D. E. Meyer & S. Kornblum (Eds.), *Attention and performance 14: Synergies in experimental psychology, artificial intelligence, and cognitive neuroscience* (pp. 219–243). The MIT Press.
- [27] Marconi, M. de A., Lakatos, E. M. (2003). *Fundamentos de Metodologia Científica*. Editora Atlas S. A., São Paulo, SP, 5ª edição.
- [28] Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (Eds.). (2012). *The Oxford handbook of event-related potential components*. *Oxford University Press*.
- [29] Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. 2nd edition. *MIT Press*, 2014.
- [30] Oka, S., van Tonder, G., & Ejima, Y. (2001). A VEP study on visual processing of figural geometry. *Vision research*, 41(28), 3791–3803. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(01\)00239-5](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(01)00239-5)
- [31] Onton, J., & Makeig, S. (2006). Information-based modeling of event-related brain dynamics. *Progress in brain research*, 159, 99–120. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)59007-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)59007-7)
- [32] Pessoa, V. F., Monge-Fuentes, V., Simon, C. Y., Suganuma, E., & Tavares, M. C. (2008). The Müller-Lyer illusion as a tool for schizophrenia screening. *Reviews in the neurosciences*, 19(2-3), 91–100. <https://doi.org/10.1515/revneuro.2008.19.2-3.91>
- [33] Pfabigan, D. M., Sailer, U., & Lamm, C. (2015). Size does matter! Perceptual stimulus properties affect event-related potentials during feedback processing. *Psychophysiology*, 52(9), 1238–1247. <https://doi.org/10.1111/psyp.12458>
- [34] Qiu, J., Li, H., Zhang, Q., Liu, Q., & Zhang, F. (2008). The Müller-Lyer illusion seen by the brain: an event-related brain potentials study. *Biological psychology*, 77(2), 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.10.002>
- [35] Srinivasan, R., Nunez, P. L., & Silberstein, R. B. (1998). Spatial filtering and neocortical dynamics: estimates of EEG coherence. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 45(7), 814–826. <https://doi.org/10.1109/10.686789>
- [36] Tanaka, J. W., & Curran, T. (2001). A neural basis for expert object recognition. *Psychological science*, 12(1), 43–47. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00308>
- [37] Ungerleider, L. G., Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & R.J.W. Mansfield (Eds.) *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549–586). Cambridge, MA: MIT Press.
- [38] Van Essen, D.C., Visual, I., Neurosciences, Chalupa, L., & Werner, J. (2002). *Organization of Visual Areas in Macaque and Human Cerebral Cortex*.
- [39] Vossel, S., Weidner, R., Thiel, C. M., & Fink, G. R. (2009). What is "odd" in Posner's location-cueing paradigm? Neural responses to unexpected location and feature

changes compared. *Journal of cognitive neuroscience*, 21(1), 30–41. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21003>

- [40] Weidner, R., & Fink, G. R. (2007). The neural mechanisms underlying the Müller-Lyer illusion and its interaction with visuospatial judgments. *Cerebral cortex* (New York, N.Y. : 1991), 17(4), 878–884. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhk042>
- [41] Widmann, A., Schröger, E., & Maess, B. (2015). Digital filter design for electrophysiological data--a practical approach. *Journal of neuroscience methods*, 250, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.08.002>
- [42] Woodman G. F. (2010). A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention. *Attention, perception & psychophysics*, 72(8), 2031–2046. <https://doi.org/10.3758/APP.72.8.2031>