

“À CONVERSA COM O CÉREBRO: COMO MONTAR UM ESTUDO DE ERPs?”

RICARDO FRANCISCO, AFONSO SALGADO, SOFIA FRADE & RITA JERÓNIMO

Iscte-Instituto Universitário de Lisboa

Palavras-chave: EEG; ERPs; Desenho Experimental; Metodologia; Neurociência Cognitiva.

OBJETIVO

Este capítulo visa:

- (a) apresentar e compreender o conceito de potenciais evocados (ERPs), explicando a sua importância para a investigação em psicologia;
- (b) descrever os passos fundamentais para a construção de um estudo com ERPs;
- (c) identificar quais os principais desafios metodológicos associados à investigação com ERPs;
- (d) identificar e explicar os principais obstáculos em estudos com ERPs e propor soluções práticas e baseadas na literatura para a sua resolução.

ELETOENCEFALOGRAFIA (EEG)²

O eletroencefalograma é um método não-invasivo que capta a atividade elétrica do cérebro, gerando um traçado geral e contínuo da atividade elétrica cerebral, especificamente a corrente gerada pela sincronização da ativação sináptica de neurónios piramidais. O sinal elétrico é resultante da soma de potenciais pós-sinápticos, que originam campos elétricos amplos e de maior duração, cuja intensidade varia de acordo com a força do estímulo, podendo ser excitatórios ou inibitórios, ao contrário dos potenciais de ação de neurónios individuais, que apresentam curta duração, de menor amplitude e que seguem uma natureza “tudo ou nada” (Brienza & Mecarelli, 2019). Os neurónios do córtex, organizados em colunas com diferentes orientações,

² A técnica de eletroencefalografia foi já descrita no primeiro volume do Caderno de Laboratório por Souza, Ennahli e Garrido (2024). Como tal, fizemos apenas uma breve descrição da mesma, para, posteriormente, apresentar e explicar o conceito de Potenciais Evocados (ERPs).

geram dipolos elétricos com polaridades opostas, sendo que o EEG capta a atividade de dipolos alinhados perpendicularmente ao escalpe (Read & Innis, 2017).

ERPs

O QUE SÃO?

Os Potenciais Evocados Relacionados a Eventos – *Event-Related Potentials* (ERPs) – são respostas neurais a eventos sensoriais, cognitivos e/ou motores que podem ser extraídas do sinal contínuo de EEG (Luck, 2014). São pequenas mudanças de voltagem concomitantes com um determinado evento, e trata-se de uma medida (quase) direta e instantânea da atividade cognitiva implícita, com uma resolução temporal de milissegundos (Penny et al., 2002; Read & Innis, 2017; Souza, Ennahli & Garrido, 2024).

COMO SÃO CLASSIFICADOS?

Atualmente, há registo de dezenas de diferentes componentes de ERPs, sendo que cada componente é definido como a atividade de um módulo neuroanatômico que contribui para uma tarefa funcional específica (Luck, 2014). Estes componentes são classificados através da valência, latência e amplitude (mV). Em termos gerais, a *valência* diz respeito à deflexão da onda do sinal elétrico, em relação à sua baseline, podendo ser positiva ou negativa; a *latência* diz respeito ao tempo (em ms) em que o pico ou a deflexão do potencial elétrico ocorre, após o evento/estímulo; e a *amplitude* diz respeito à magnitude de voltagem (mV) do potencial elétrico, representando a intensidade ou grau de envolvimento dos processos cognitivos para o evento/estímulo em questão (Luck, 2014). Por exemplo, o N400 é um componente de deflexão negativa que ocorre cerca de 400 milissegundos após o estímulo (Kutas & Federmeier, 2011). Neste componente, a amplitude da resposta é a característica mais suscetível a mudanças através da manipulação dos estímulos. Esta manipulação, frequentemente, diz respeito à relação semântica entre itens. Itens relacionados semanticamente apresentam menor amplitude de N400 em relação a itens não-relacionados. A sua latência, por outro lado, é bastante estável. Se compararmos com outro componente, como a MMN (*Mismatch Negativity*), que ocorre, geralmente, após violação de padrões de regularidade acústica, o seu pico ocorre, de modo geral, cerca de 100 – 250 ms após o estímulo, mas pode variar de acordo com o paradigma específico ou o tipo de violação de um padrão, como a frequência, duração, intensidade ou intervalo entre estímulos (Näätänen et al., 2004), em que, por exemplo, tons quase indistinguíveis provocam um pico mais tardio, de 200–300 ms pós-estímulo (Näätänen & Alho, 1995).

FOCO: ESTÍMULO VS. RESPOSTA

Dependendo do evento de referência, os componentes de ERPs podem estar associados a um estímulo (*stimulus-locked ERP*) ou a uma resposta (*response-locked ERP*). Os primeiros (*associados ao estímulo*), são alinhados no tempo e têm como início o surgimento do evento/estímulo (e.g., um som ou imagem). São exemplos: a MMN (*Mismatch Negativity*), uma resposta neural associada às violações de uma regra estabelecida por uma sequência de estímulos sensoriais, geralmente auditivos (Garrido

et al., 2009); ou o N400, componente relacionado com a manipulação semântica de um estímulo (Kutas & Federmeier, 2011), geralmente em frases escritas, mas também em sequências narrativas de imagens (e.g., Cohn et al., 2012). Nos estudos em que estes potenciais são analisados, procura-se estudar o processamento (de atenção, percepção, linguagem, etc.) neural que está associada à condição de um conjunto de estímulos. Já os ERPs *associados a uma resposta* estão alinhados com o início da resposta comportamental do participante (e.g., após pressionar um botão), e servem para estudar processos relacionados com a resposta, como a tomada de decisão ou processamento do erro/acerto (Zhang, 1998). São exemplo o LRP (*Lateralized Readiness Potential*) e o ERN (*Error-related negativity*).

QUAIS AS DIFERENTES MODALIDADES SENSORIAIS?

Consensualmente, os ERPs de curta latência têm origem em áreas sensoriais primárias e refletem predominantemente componentes unimodais, i.e., atividades neurais provocadas por estímulos pertencentes a uma modalidade sensorial específica, seja ela visual, auditiva, olfatória ou somatossensorial. Ademais, estão geralmente relacionados com a localização (direita ou esquerda) da origem do estímulo, ou seja, se surge um estímulo somatossensorial ou visual numa região lateral do corpo ou de um campo visual, é esperado que surja um ERP de maior amplitude na região contralateral do córtex responsável pelo processamento desse estímulo (Ito et al., 1992; Luck et al., 1990).

Em contraste, os ERPs de maior latência têm origem em múltiplas áreas corticais, independentes da localização da origem do estímulo, e refletem uma combinação de componentes unimodais e multimodais, i.e., atividades neurais provocadas por estímulos pertencentes a diferentes modalidades sensoriais, geralmente associadas a processos cognitivos de maior complexidade (Liang et al., 2010), ou mais exigentes (Demirayak et al., 2023), tais como a integração de informação ou atualização da memória (e.g., Harper et al., 2017; Soares et al., 2023).

VANTAGENS E POTENCIALIDADES NO USO DE ERPs

Os ERPs representam uma ferramenta valiosa no estudo da cognição humana, através da capacidade de decomposição temporal dos processos mentais. Devido à elevada resolução temporal, esta técnica possibilita medir mudanças pequenas e transitórias na atividade cerebral em milissegundos (Ibanez et al., 2012). Por essa razão, os ERPs têm a capacidade de revelar a sequência temporal dos processos cognitivos, possibilitando a discriminação entre processos mentais que ocorrem em intervalos extremamente curtos, desde intervalos temporais iniciais, que refletem geralmente processamento em áreas sensoriais primárias e processos atencionais básicos, até mudanças dinâmicas sucessivas ao longo do tempo, culminando em processos superiores mais complexos. A resolução espacial do EEG é, contudo, inferior quando comparada com técnicas de neuroimagem funcional mais sofisticadas, como a ressonância magnética funcional (fMRI), não possibilitando localizar de forma precisa a origem estrutural dos processos evidenciados pela assinatura de ERPs, sobretudo os mais profundos e subcorticais.

O estabelecimento de padrões de atividade eletrofisiológica cerebral em indivíduos neurotípicos permite o estudo de processos cognitivos, como, por exemplo, na cognição social, processos de atribuição de intenções (e.g., Fernandes et al., 2023); no domínio da linguagem, a deteção de incongruência ou da expectativa (e.g., Frade et al., 2021; Jerónimo et al., 2017; Soares et al., 2023) ou processos do processamento léxico-fonológico e léxico-semântico (Lu et al., 2018; Silva et al., 2019).

Permitem, ainda, a identificação de possíveis défices nos diversos processos cognitivos. Por exemplo, na Perturbação do Espectro de Autismo (PEA), verificam-se diferenças comportamentais e na assinatura de ERPs no processo de atribuição de intenções (Fernandes et al., 2022; Vistoli et al., 2015).

Assim, além de elucidarem sobre diversas funções cognitivas, os ERPs permitem a identificação de marcadores biológicos que poderão auxiliar no diagnóstico de algumas perturbações.

DO PLANEAMENTO À ANÁLISE: COMO MONTAR UMA EXPERIÊNCIA DE ERPs

Na investigação com ERPs existe uma grande variabilidade de desenhos experimentais. No entanto, os princípios básicos são semelhantes na grande maioria das experiências que pretendem analisar estes componentes (Luck, 2014).

Nesta secção, iremos apresentar estes princípios básicos e explicar as razões subjacentes à preparação do estudo. Adicionalmente, discutiremos os desafios que tendem a surgir durante o desenho experimental e sugerimos possíveis soluções, com base na literatura e experiência prática. Neste capítulo, não iremos abordar questões relacionadas com administração da técnica do EEG relativamente aos materiais, preparação do espaço, montagem, dado que essa informação já se encontra disponível num capítulo da edição anterior do Caderno de Laboratório (ver Souza, et al., 2024)

Para efeitos ilustrativos, utilizaremos dois componentes frequentemente estudados: O MMN (*Mismatch Negativity*) e o N400. Estes componentes são frequentemente analisados em pesquisas de ERPs devido à sua capacidade de ilustrar diferentes fases do processamento de informação. O MMN é associado ao processamento sensorial pré-atencional, enquanto o N400 está associado a processos mais tardios relacionados com o processamento semântico e à resposta a incongruências, especialmente linguísticas (e.g., Van Petten, Barry & Duncan, 2009; Zhao et al., 2016).

SELEÇÃO DE ESTÍMULOS E TIPO DE RESPOSTA

A escolha dos estímulos é crítica para garantir a validade do estudo. Os estímulos devem ser controlados em termos de duração, intensidade, frequência e outros parâmetros. Deste modo, evitando que diferenças nos resultados dos ERPs reflitam diferenças físicas do estímulo, ao invés de processos cognitivos relevantes (Kappenman & Luck, 2010). Por exemplo, num estudo que investiga a resposta semântica em frases congruentes e

incongruentes, através do N400, é importante garantir que palavras em ambas as condições tenham comprimentos e familiaridades lexicais semelhantes. Deste modo, garantindo que as diferenças observadas se devem ao efeito que queremos estudar (Luck, 2014). É igualmente importante garantir que os estímulos sejam apropriados ao objetivo experimental, adequados para a população estudada, e culturalmente compreensíveis (Kutas & Federmeier, 2011).

Quanto ao tipo de resposta, pode-se optar por respostas comportamentais (e.g., pressionar teclas) ou tarefas passivas, onde o participante apenas observa, ou ouve estímulos, sem uma resposta explícita (Luck, 2014). A escolha depende dos objetivos do estudo e do componente selecionado para a análise. Por um lado, respostas comportamentais são úteis para associar a atividade cerebral ao desempenho numa determinada tarefa, ou, se for pertinente, o tempo de reação. Por outro lado, para o MMN, por exemplo, tarefas passivas são adequadas, pois este componente reflete processamento automático e pré-atencional. I.e., antes de haver um comportamento (Zhao, 2016).

NÚMERO DE PARTICIPANTES E ENSAIOS

Em estudos de ERPs, é crucial decidir quantos ensaios incluir no design experimental, assim como a quantidade de participantes a recrutar. Estudos recentes tentam definir o número mínimo de ensaios e participantes para obter um efeito estatístico significativo. Contudo, não existe um consenso (Boudewyn, Luck, Farrens & Kappenman, 2018). Ainda assim, existe um conjunto de critérios-chave a considerar na seleção do número de participantes e ensaios.

O primeiro critério relaciona-se com o **poder estatístico**. Estudos com poucos participantes correm maior risco de produzir resultados pouco viáveis. Deste modo, deve realizar-se uma análise de poder a priori, utilizando estimativas de tamanho de efeito retiradas da literatura (Cohen, 1998; Jensen & MacDonald, 2022).

A **amostra** poderá variar consoante as características dos participantes. Por exemplo, em grupos homogéneos, como adultos saudáveis a executar tarefas simples, a variabilidade interindividual é reduzida. Logo a amostra não precisará de ser aumentada. No entanto, em populações clínicas ou em comparações intergrupais, onde a variabilidade é maior, a amostra deverá conter mais participantes para manter o poder estatístico e assegurar que as diferenças se devem ao efeito estudado (Clayson et al., 2019).

O **objetivo do estudo** também impacta a escolha da amostra. Em investigações exploratórias, cujo propósito é identificar padrões novos sem hipóteses específicas, amostras mais pequenas podem ser aceitáveis, desde que se reconheça como uma limitação do estudo. Por outro lado, em estudos confirmatórios, nos quais se testam hipóteses específicas, é essencial recrutar participantes suficientes para garantir robustez e replicabilidade dos resultados (Keil et al., 2014).

Quanto ao **número de ensaios** (trials), o princípio fundamental é a relação sinal-ruído. Cada ensaio adicional deverá reforçar o ERP de interesse e reduzir o ruído, melhorando a clareza das componentes de interesse (Boudewyn et al., 2019). No entanto, é importante referir um número demasiado elevado de ensaios poderá não ser adequado. Isto levará a sessões longas que promovem fadiga, aborrecimento e aumento de artefactos musculares, assim reduzindo a qualidade dos dados (Handy, 2005). Para contornar este problema, convém dividir o protocolo em blocos com pausas regulares. Assim, mantém-se o desempenho dos participantes e minimizam-se artefactos decorrentes do cansaço.

É também crucial equilibrar o número de ensaios entre as condições experimentais. Qualquer desequilíbrio na quantidade de repetições por condição pode enviesar a média dos ERPs e comprometer comparações diretas entre condições (Luck, 2014).

Por fim, o poder global de um estudo de ERPs resulta da interação entre o número de participantes e de ensaios. Muitos ensaios não compensam uma amostra pequena, assim como muitos participantes não substituem ensaios insuficientes. Desta maneira, é necessário definir um equilíbrio que maximize a robustez e a fiabilidade dos resultados (Jensen & MacDonald, 2022; Boudewyn et al., 2019).

SINCRONISMO E MARCADORES (*TRIGGERS*)

Nos estudos de ERPs, o objetivo principal é isolar a atividade cerebral evocada por eventos específicos. Por exemplo, um evento pode ser a apresentação de um som ou uma imagem que provoca uma resposta no cérebro. Este processo só é possível quando garantimos duas condições: um controle temporal rigoroso, e um número suficiente de estímulos. Assim, é necessário o sistema de EEG registar vários eventos, e marcar o período temporal de cada um desses eventos, para que a resposta cerebral seja corretamente alinhada.

O EEG (Eletroencefalograma) é uma técnica que regista a atividade elétrica do cérebro de forma contínua, sendo que nos estudos de ERPs o objetivo principal é isolar a atividade cerebral evocada por eventos específicos. Deste modo, é necessário inserir marcadores, ou *triggers*, que são sinais digitais enviados pelo software de apresentação da tarefa experimental para o sistema de aquisição de EEG. Estes sinais indicam o momento exato da ocorrência de um evento experimental, como a apresentação de um estímulo visual ou a resposta do participante. A utilização destes *triggers* permite segmentar o sinal do EEG em janelas temporais alinhadas aos eventos de interesse, deste modo facilitando a extração e análise de ERPs (Luck., 2014; Hu & Zhang et al., 2020).

Um dos principais desafios na utilização de *triggers* é garantir que a marcação temporal seja precisa e consistente. Isto significa que o *trigger* deve ser enviado no momento exato em que o estímulo é apresentado ao participante. Se existirem atrasos (latência) ou variações ("jitter") temporais no envio do marcador os eventos ficarão desalinhados

com a atividade no EEG. Este desalinhamento poderá comprometer a análise, dado que os ERPs dependem da associação precisa entre estímulo e resposta cerebral. Assim, para evitar este problema, é necessário testar previamente o sistema para verificar a latência dos *triggers*. Adicionalmente, é recomendável utilizar hardware e software compatíveis na apresentação dos estímulos (e.g., E-Prime; Presentation, ou PsychoPY – secção de recursos) e registo da informação EEG (Luck., 2014).

NÚMERO DE ENSAIOS E RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (*SIGNAL TO NOISE RATIO*)

A análise de ERPs depende de uma técnica fundamental: o sinal ser computado através da média de múltiplas respostas a eventos semelhantes. Sendo o EEG um sinal naturalmente ruidoso, afetado por diferentes fontes de ruído, incluindo fontes fisiológicas (e.g., batimento cardíaco, movimentos oculares) e ambientais (e.g., ruído elétrico), a média de várias repetições permite que o sinal consistente do ERP sobressaia sobre o ruído, uma vez que este deverá ser aleatório (Woodman., 2010). Este processo é conhecido como a relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) (Luck, 2014).

Conseguir um SNR aceitável está dependente, entre outros aspetos, do número de ensaios usados. O número ideal de ensaios depende do componente de ERP em estudo. Componentes precoces e de maior amplitude, como o MMN, podem exigir menos ensaios do que componentes de menor amplitude e mais tardios, como o N400. Contudo, em componentes de maior variabilidade inter-individual pode ser necessário mais estímulos por condição (Clayson et al., 2019).

De salientar, novamente, que aumentar o número de ensaios pode levar uma extensa duração da experiência, a uma maior fadiga do participante, e a um aumento da probabilidade de artefactos. Estes artefactos irão constituir ruído e diminuir o SNR. Assim, torna-se importante equilibrar o número de ensaios com a tolerância e conforto dos participantes, especialmente em populações mais sensíveis (e.g., clínicas ou infantis)

SEGMENTAÇÃO (*SEGMENTATION PROCESS*)

A segmentação (*epoching*) é o processo através do qual o sinal EEG é dividido em pequenos segmentos de tempo centrados nos *triggers* (Luck. 2014). Este processo permite analisar a atividade cerebral que ocorre imediatamente antes e depois de um evento específico.

Cada segmento, também chamado de *epoch*, consiste então numa janela temporal alinhada aos eventos de interesse e contém dois períodos: o período pré-estímulo, conhecido como a linha de base (*baseline*), e o período pós-estímulo (Woodrow., 2010). A *baseline* refere-se a um intervalo de tempo antes da apresentação do estímulo (tipicamente entre -200 ms e 0 ms) que serve como ponto de referência para a atividade cerebral "normal" do participante. Esta *baseline* é usada para corrigir o sinal EEG e remover variações lentas ou constantes que possam contaminar a resposta evocada ao estímulo (Duncan et al., 2009). Apesar da correção da linha de base ser um

passo amplamente utilizado nos estudos de EEG, é importante referir que tem sido alvo de debate (Alday, 2019). Alguns autores sugerem que a correção da *baseline* pode, em determinados casos, introduzir distorções adicionais aos dados. Nomeadamente, se existirem diferenças prévias entre condições experimentais. Para uma discussão aprofundada sobre qual a melhor solução mediante o tipo de estudo recomendam-se as leituras Luck (2014) e Alday (2019).

Adicionalmente, é importante definir a duração total da janela de segmentação. Esta janela depende do tipo de componente ERP que se pretende estudar. Por exemplo, componentes precoces como a MMN, que surgem tipicamente entre 100 e 250 ms após o estímulo, podem ser analisadas com janelas relativamente curtas (por exemplo, -200 ms a 500 ms) (e.g., Bishop & Hardiman, 2010). Já componentes mais tardias, como a N400, associadas ao processamento semântico, requerem janelas mais longas – tipicamente 250 ms a 800 ms ou mais – para capturar toda a resposta (Kutas & Federmeier, 2014).

A escolha adequada da duração da janela e da *baseline* é essencial para garantir a validade dos resultados. Uma segmentação inadequada pode levar à perda de informação relevante (quando a janela é demasiado curta) ou à introdução de ruído indesejado (quando a janela é demasiado longa).

MÉDIA (AVERAGING)

Após o processo de segmentação do sinal EEG em *epochs*, calcula-se a média (*averaging*) desses segmentos dentro de cada condição experimental (Luck, 2014).

Como introduzido já, a propósito do SNR, o sinal de EEG contém uma mistura de diferentes fontes de atividade elétrica, umas relacionadas com ruído, como as que decorrem de processos espontâneos e fisiológicos, e outras relacionadas com as respostas neuronais que ocorrem de forma consistente e previsível em resposta a um estímulo específico. São estas últimas que nos interessam. Mas estes sinais são *time-locked*, i.e., ocorrem sempre aproximadamente no mesmo ponto temporal após a apresentação do estímulo (Luck, 2014).

A média dos ensaios resolve este problema aproveitando o seguinte princípio: como o sinal ERP é constante entre ensaios e o ruído é aleatório, ao calcular a média de múltiplas respostas, o ruído tende a anular-se e o ERP é mais visível. Por esta razão, o processo de *averaging* permite observar com mais clareza as componentes de interesse (Handy, 2005; Cohen, 2014).

Para assegurar a qualidade da média, é necessário garantir alguns aspetos fundamentais: a) todos os segmentos (*epochs*), pertencentes à mesma condição experimental, devem estar alinhados no tempo e associados aos marcadores corretos; b) estes segmentos devem ser somados e divididos pelo número total de ensaios, garantindo uma onda média representativa; c) garantir que o ruído (e.g., artefactos fisiológicos) é reduzido, progressivamente, com cada ensaio adicional incluído na média. Ou seja, durante o processo do cálculo da média, os elementos ruidosos tendem

a anular-se, enquanto a resposta consistente ao estímulo torna-se mais evidente; d) a quantidade e qualidade dos ensaios incluídos no processamento por média são determinantes para a viabilidade do ERP evocado. Ensaios contaminados com ruído ou não sincronizados podem comprometer o resultado.

LIMITAÇÕES E DIFICULDADES

Os ERPs são particularmente vantajosos para investigar, com alta resolução temporal, processos cognitivos, como atenção, percepção, memória e linguagem (Woodrow., 2010) e outros processos complexos como aspetos do comportamento social (Amodio, 2008). Contudo, é importante mencionar as limitações dos ERPs. Existem várias dificuldades metodológicas que podem, no entanto, comprometer a validade dos resultados. Entre os erros metodológicos mais comuns estão a má colocação dos elétrodos, interferências elétricas externas, e sobretudo, problemas relacionados com a sincronização dos marcadores (triggers). De facto, marcadores mal definidos podem desalinhar os eventos com a atividade cerebral registada, distorcendo os ERPs (Luck., 2010).

Outro erro comum é a contaminação do sinal com artefactos fisiológicos, como piscadelas, movimentos oculares ou contrações musculares. A ausência de controlo destes artefactos pode comprometer a validade dos resultados, uma vez que os padrões observados podem não refletir a atividade cerebral evocada pelos estímulos, mas sim atividade motora ou artefactos externos. Para minimizar esta contaminação, é fundamental instruir os participantes a evitar movimentos bruscos e a piscar nos intervalos entre ensaios, bem como monitorizar os canais dos elétrodos durante a recolha dos dados. Adicionalmente, durante a fase de processamento de dados, existem técnicas automatizadas que auxiliam na remoção destes artefactos, como a Análise de Componentes Independentes (ICA), frequentemente presentes nos softwares modernos de análise de EEG (e.g., Brain Vision Analyzer, EEGLab, Let'sWave).

Adicionalmente, é necessário ter em atenção problemas no desenho experimental, tais como um número insuficiente de ensaios, desequilíbrio entre condições, ou tarefas demasiado complexas. Qualquer um destes aspetos pode reduzir o poder estatístico do estudo (Clayson et al., 2019).

Outra limitação dos ERPs, como já referido, é a sua reduzida resolução espacial. Isto dificulta a localização exata da atividade neuronal registada (Luck, 2014). Técnicas de estimativa da fonte, como a LORETA (Low Resolution Eletromagnetic Tomography – Pascual-Marqui, Micel & Lehmann, 1994) vêm colmatar esta limitação. Este é um tipo de análise que nos permite estimar a distribuição tridimensional da atividade neuronal associando-a a regiões próximas de atividade elétrica semelhante (Pascual-Marqui, Micel & Lehmann, 1994). No entanto, é importante referir que estas técnicas tem uma resolução espacial reduzida, nomeadamente quando comparadas com métodos de imagem (e.g., Ressonância Magnética).

ERPs também podem não ser o método ideal para estudos exploratórios, nos quais não há hipóteses temporais claras, já que a análise destes componentes depende da definição prévia de janelas temporais e regiões de interesse (Kappenman & Luck, 2012).

RECURSOS

Plataformas de formação:

- | “ERP Boot Camp” ([The ERP Boot Camp — ERP Info](#)): Oferece cursos e Workshops organizados por Steve Luck e Emily Kappenman específicos para EEG.
- | BrainVision (<https://www.brainvision.com/>): Oferece webinars e workshops focados na análise de dados de EEG, incluindo a análise de ERPs com software BrainVision Analyzer.

Ferramentas de Programação:

- | PsychoPy (<https://www.psychopy.org/>)
- | E-Prime [E-Prime® Stimulus Presentation Software | Psychology Software Tools](#)
- | Presentation (<https://www.neurobs.com/>)

Ferramentas de Análise de Dados:

- | EEGLab ([EEGLAB](#)): Software open-source para a análise de dados de EEG e ERPs, desenvolvido no MATLAB. Oferece ferramentas para filtragem, segmentação, análise de componentes e remoção de artefactos, incluindo ICA.
- | BrainVision Analyzer (<https://www.brainvision.com/>): Software especializado para análise de EEG, incluindo ERPs.
- | FieldTrip (<http://www.fieldtriptoolbox.org/>): Biblioteca open-source em MATLAB para análise de dados de EEG e MEG.

Publicações (Leituras Recomendadas)

- | Cohen, M. X. (2014). *Analyzing neural time series data: Theory and practice*. MIT Press.
- | Handy, T. C. (2005). *Event-Related Potentials: A methods handbook*. MIT Press.
- | Luck, S. J. (2014). *An introduction to the Event-Related Potential technique* (2nd ed.). MIT Press.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Construir uma experiência de ERPs pode parecer intimidante. No entanto, com o conhecimento dos princípios-chave metodológicos, é uma técnica promissora.

O sucesso metodológico do estudo é definido por uma marcação temporal precisa, um número adequado de ensaios e participantes (com o objetivo de melhorar a relação sinal-ruído), e uma segmentação alinhada com os componentes em análise.

Recomendamos, para cada estudo, o foco em apenas um ou dois componentes de interesse, com base nas propriedades temporais e funcionais de cada componente. A seleção adequada dos componentes permite uma melhor adequação do desenho experimental à hipótese do estudo.

Por fim, a atenção a potenciais fontes de erro comuns é fundamental, tais como artefactos, a escolha inadequada de estímulos, ou a quantidade reduzida de eventos. Considerar estes aspetos é fundamental para assegurar a fiabilidade e replicabilidade do estudo.

Esta secção pretendeu oferecer uma visão geral dos pontos-chave do desenho de estudos com ERPs. Com isto, esperamos ter “descomplicado” um pouco esta técnica interessante. Com prática, perseverança e curiosidade, tudo começará a fazer mais sentido. *Boa sorte para futuras investigações!*

REFERÊNCIAS

- Alday, P. M. (2019). How much baseline correction do we need in ERP research? Extended GLM model can replace baseline correction while lifting its limits. *Psychophysiology*, 56(12), e13451. <https://doi.org/10.1111/psyp.13451>
- Amodio, D. M., Master, S. L., Yee, C. M., & Taylor, S. E. (2008). Neurocognitive components of the behavioral inhibition and activation systems: Implications for theories of self-regulation. *Psychophysiology*, 45(1), 11-19. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00609.x>
- Bishop, D. V. M., & Hardiman, M. J. (2010). Measurement of mismatch negativity in individuals: a study using single - trial analysis. *Psychophysiology*, 47(4), 697-705. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00970.x>
- Boudewyn, M. A., Luck, S. J., Farrens, J. L., & Kappenman, E. S. (2018). How many trials does it take to get a significant ERP effect? It depends. *Psychophysiology*, 55(6), e13049. <https://doi.org/10.1111/psyp.13049>
- Brienza, M., & Mecarelli, O. (2019). Neurophysiological basis of EEG. In O. Mecarelli (Ed.), *Clinical electroencephalography* (pp. 9–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04573-9_2
- Clayson, P. E., Carbine, K. A., Baldwin, S. A., & Larson, M. J. (2019). Methodological reporting behavior, sample sizes, and statistical power in studies of event - related potentials: Barriers to reproducibility and replicability. *Psychophysiology*, 56(11), e13437. <https://doi.org/10.1111/psyp.13437>
- Cohen, M. X. (2014). Analyzing neural time series data: Theory and practice. MIT press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9609.001.0001>
- Cohn, N., Paczynski, M., Jackendoff, R., Holcomb, P. J., & Kuperberg, G. R. (2012). (Pea)nuts and bolts of visual narrative: Structure and meaning in sequential image comprehension. *Cognitive Psychology*, 65(1), 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2012.01.003>
- Demirayak, P., Kiyı, İ., İşbitiren, Y. Ö., & Yener, G. (2023). Cognitive load associates prolonged P300 latency during target stimulus processing in individuals with mild cognitive impairment. *Scientific Reports*, 13(1), 15956. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43132-8>
- Duncan, C. C., Barry, R. J., Connolly, J. F., Fischer, C., Michie, P. T., Näätänen, R., ... & Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clinical neurophysiology*, 120(11), 1883-1908. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.07.045>

- Fernandes, J. M., Soares, S., Lopes, R., Jerónimo, R., & Barahona-Corrêa, J. B. (2022). Attribution of intentions in autism spectrum disorder: A study of event-related potentials. *Autism Research*, 15(5), 847–860. <https://doi.org/10.1002/aur.2702>
- Frade, S., Pinheiro, A. P., Santi, A., & Raposo, A. (2021). Is second best good enough? An EEG study on the effects of word expectancy in sentence comprehension. *Language, Cognition and Neuroscience*, 37(2), 209–223. <https://doi.org/10.1080/23273798.2021.1955140>
- Garrido, M. I., Kilner, J. M., Stephan, K. E., & Friston, K. J. (2009). The mismatch negativity: A review of underlying mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, 120(3), 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.11.029>
- Giglio, A. C. A., Minati, L., & Boggio, P. S. (2013). Throwing the banana away and keeping the peel: Neuroelectric responses to unexpected but physically feasible action endings. *Brain Research*, 1532, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.08.017>
- Handy, T. C. (Ed.). (2005). *Event-related potentials: A methods handbook*. MIT press.
- Harper, J., Malone, S. M., & Iacono, W. G. (2017). Theta- and delta-band EEG network dynamics during a novelty oddball task. *Psychophysiology*, 54(11), 1590–1605. <https://doi.org/10.1111/psyp.12906>
- Hu, L., & Zhang, Z. (Eds.). (2019). *EEG signal processing and feature extraction*. Springer Nature.
- Ibanez, A., Melloni, M., Huepe, D., Helgiu, E., Rivera-Rei, A., Canales-Johnson, A., Baker, P., & Moya, A. (2012). What event-related potentials (ERPs) bring to social neuroscience? *Social Neuroscience*, 7(6), 632–649. <https://doi.org/10.1080/17470919.2012.691078>
- Ito, J., Shibasaki, H., & Kimura, J. (1992). Somatosensory Event-Related Potentials Following Different Stimulus Conditions. *International Journal of Neuroscience*, 65(1–4), 239–246. <https://doi.org/10.3109/00207459209003297>
- Jensen, K. M., & MacDonald, J. A. (2023). Towards thoughtful planning of ERP studies: How participants, trials, and effect magnitude interact to influence statistical power across seven ERP components. *Psychophysiology*, 60(7), e14245. <https://doi.org/10.1111/psyp.14245>
- Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2010). The effects of electrode impedance on data quality and statistical significance in ERP recordings. *Psychophysiology*, 47(5), 888–904. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01009.x>
- Keil, A., Debener, S., Gratton, G., Junghöfer, M., Kappenman, E. S., Luck, S. J., ... & Yee, C. M. (2014). Committee report: Publication guidelines and recommendations for studies using electroencephalography and magnetoencephalography. *Psychophysiology*, 51(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/psyp.12147>
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event related brain potential (ERP). *Annual Review Of Psychology*, 62, 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
- Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., & Nelson, C. A. (2007). An ERP study of emotional face processing in the adult and infant brain. *Child development*, 78(1), 232–245. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.00994.x>
- Liang, M., Mouraux, A., Chan, V., Blakemore, C., & Iannetti, G. D. (2010). Functional characterisation of sensory ERPs using probabilistic ICA: Effect of stimulus modality and stimulus location. *Clinical Neurophysiology*, 121(4), 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.12.012>
- Luck, S. J. (2005). Ten simple rules for designing and interpreting ERP experiments. *Event-related potentials: A methods handbook*, 4.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the Event-Related Potential technique* (2nd ed.). MIT Press.
- Luck, S. J., Heinze, H. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75(6), 528–542. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(90\)90139-B](https://doi.org/10.1016/0013-4694(90)90139-B)
- Luck, S. J., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 432–440. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01545-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01545-X)
- Näätänen, R., & Alho, K. (1995). Mismatch negativity—a unique measure of sensory processing in audition. *International Journal of Neuroscience*, 80(1–4), 317–337. <https://doi.org/10.3109/00207459508986107>
- Näätänen, R., Pakarinen, S., Rinne, T., & Takegata, R. (2004). The mismatch negativity (MMN): Towards the optimal paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 115(1), 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2003.04.001>
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., & Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology*, 18(1), 49–65. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(84\)90014-X](https://doi.org/10.1016/0167-8760(84)90014-X)
- Penny, W. D., Kiebel, S. J., Kilner, J. M., & Rugg, M. D. (2002). Event-related brain dynamics. *Trends in Neurosciences*, 25(8), 387–389. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(02\)02202-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(02)02202-6)

- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Miller, G. A., Ritter, W., Ruchkin, D. S., Rugg, M. D., & Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37(2), 127–152. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3720127>
- Read, G. L., & Innis, I. J. (2017). Electroencephalography (EEG). In *The International Encyclopedia of Communication Research Methods* (pp. 1–18). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118901731.iecrm0080>
- Soares, S., Frade, S., Jerónimo, R., & Kotz, S. A. (2023). The cheese was green with... envy: An EEG study on minimal fictional descriptions. *Brain and Language*, 236, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2022.105218>
- Souza, C., Ennahli, K., & Garrido, M. V. (2024). Eletroencefalografia: Procedimentos e significado psicológico. In M. Prada (Ed.), *Caderno de Laboratório* (Vol. I, pp. 85-95). LAPSO - Laboratório de Psicologia, Iscte-Instituto Universitário de Lisboa. <http://doi.org/10.15847/LAPSOCadLAB2024/eeg>
- Vanhaudenhuyse, A., Laureys, S., & Perrin, F. (2008). Cognitive event-related potentials in comatose and post-comatose states. *Neurocritical Care*, 8, 262–270. <https://doi.org/10.1007/s12028-007-9016-0>
- Vistoli, D., Passerieux, C., El Zein, M., Clumeck, C., Braun, S., & Brunet-Gouet, E. (2015). Characterizing an ERP correlate of intentions understanding using a sequential comic strips paradigm. *Social Neuroscience*, 10(4), 391–407. <https://doi.org/10.1080/17470919.2014.1003272>
- Zhang, J. (1998). Decomposing stimulus and response component waveforms in ERP. *Journal of Neuroscience Methods*, 80(1), 49–63. [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(97\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(97)00194-5)
- Zhao, T. C., & Kuhl, P. K. (2016). Musical intervention enhances infants' neural processing of temporal structure in music and speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603984113>