



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

KAMILLA PAIXÃO CASTRO

**ANÁLISE ESPECTRAL E DE CONECTIVIDADE FUNCIONAL DO EEG NA
VIGILÂNCIA ATENCIONAL NO TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA**

**Belém/PA
2025**


KAMILLA PAIXÃO CASTRO

**ANÁLISE ESPECTRAL E DE CONECTIVIDADE FUNCIONAL DO EEG NA
VIGILÂNCIA ATENCIONAL NO TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Pereira Jr
Coorientador(a): Prof. Msc. Suzana Cescon


Data da avaliação: 03/09/2025
Conceito: EXCELENTE

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO PEREIRA JUNIOR**
Data: 09/09/2025 11:23:29-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof. Dr. Antônio Pereira Jr.
(Orientador – Universidade Federal do Pará)

Documento assinado digitalmente
 **SUZANA CESCON DE SOUZA**
Data: 08/09/2025 23:09:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Msc. Suzana Cescon
(Coorientador – Universidade Federal do Pará)

Documento assinado digitalmente
 **ELINE MESQUITA MELO**
Data: 09/09/2025 08:07:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Msc. Eline Mesquita Melo
(Membro – Universidade Federal do Pará)

Documento assinado digitalmente
 **THAISSE DIAS PAES**
Data: 08/09/2025 23:18:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Msc. Thaisse Dias
Membro – Universidade Federal do Pará)

**Belém/PA
2025**

Dedico este trabalho aos meus avós, que, mesmo sem acesso ao ensino superior, sempre valorizaram a educação e dedicaram suas vidas para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter estado ao meu lado nos momentos mais inimagináveis, manifestando-se de diversas formas ao longo da minha graduação. Aos meus avós maternos, responsáveis pela minha criação e por dedicarem suas vidas ao meu crescimento. Em especial, ao meu avô, que, mesmo tendo perdido grande parte das suas memórias para o Alzheimer, jamais se esqueceu de mim.

À minha companheira, Izabela Pacheco, que esteve ao meu lado incansavelmente nos últimos meses que antecederam este trabalho. Agradeço não apenas pelo apoio emocional, mas também pela ajuda fundamental no contato com os voluntários e por todo o suporte oferecido nesse processo. Aos meus amigos — em especial àqueles que estiveram presentes nas aulas, nas vivências dentro e fora da Universidade, nas madrugadas em claro e nas revisões em grupo — minha gratidão. A todos que finalizaram este ciclo comigo, como Jackeline e Josinelma, meu sincero reconhecimento.

À Universidade Federal do Pará e ao Laboratório de Processamento de Sinais, que me acolheu por três anos e me permitiu aprender e desbravar novos horizontes, minha profunda gratidão. Em especial, ao Charles Ferreira Lobão, que compartilhou comigo seu conhecimento em eletrônica e me preparou para qualquer eventualidade. Ao Laboratório de Neuroprocessamento e seus integrantes, agradeço pelas incontáveis reuniões e discussões de artigos, que foram essenciais para a construção deste trabalho. Ao meu dedicado grupo de voluntários do TEA, que foram extremamente pontuais e comprometidos com esta pesquisa.

Meu agradecimento especial ao Prof. Dr. Antonio Pereira Jr., que me acolheu desde o início, mesmo diante dos desafios pessoais e profissionais. Sua dedicação, apoio e preocupação foram fundamentais. Peço desculpas pelos contratempos ao longo do caminho — sem sua iniciativa, este trabalho não teria sido concretizado. Agradeço à minha coorientadora, Profa. Me. Suzana Cescon, que não permitiu que eu desistisse desta pesquisa, incentivando-me a seguir até o fim. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta trajetória: meu muito obrigada.

Kamilla P. Castro

***" O cérebro humano é o
verdadeiro criador do universo."
(Miguel Nicolelis)***

RESUMO

O Transtorno do Espectro Autista (TEA) é um distúrbio do neurodesenvolvimento que afeta a comunicação, a cognição e a capacidade de manter vigilância atencional por longos períodos. A vigilância atencional é uma função cognitiva fundamental para a aprendizagem e para a adaptação social, sendo frequentemente comprometida em indivíduos com TEA. Este estudo teve como objetivo investigar os padrões eletroencefalográficos relacionados à vigilância atencional em adultos com TEA durante a execução de uma tarefa visual contínua. Para isso, foi desenvolvido um teste de cancelamento visual computacional, com base em ferramentas de código aberto, sincronizado ao registro EEG multicanal. A amostra foi composta por indivíduos neurotípicos e adultos diagnosticados com TEA nível 1 de suporte. Foram analisadas a Potência Espectral (PSD), a Perturbação Espectral Relacionada ao Evento (ERSP) e a Coerência Funcional, comparando-se os grupos nas condições de repouso e tarefa. Os resultados indicaram que o grupo TEA apresentou maior potência nas bandas delta e teta em repouso, além de menor dessincronização alfa durante a tarefa, o que sugere lentificação cortical. Observou-se também hiperconectividade funcional em repouso e queda significativa da coerência na tarefa. As análises de ERSP revelaram baixa responsividade neural no grupo TEA, principalmente no período pré-tarefa. Conclui-se que o EEG é uma ferramenta sensível para identificar alterações neurofuncionais relacionadas à vigilância atencional no TEA e que o paradigma computacional desenvolvido será promissor para futuras aplicações clínicas e tecnológicas na área da neuroengenharia.

Palavras-chave: Transtorno do espectro autista, vigilância atencional, EEG, análise espectral, tarefa contínua.

ABSTRACT

Autism Spectrum Disorder (ASD) is a neurodevelopmental condition characterized by difficulties in social interaction, communication, and cognitive processing, including attentional vigilance. Attentional vigilance is a critical function for daily tasks and learning, and its impairment can significantly impact adaptive behavior in individuals with ASD. This study aimed to investigate the neurophysiological patterns associated with attentional vigilance using electroencephalographic (EEG) analysis during a continuous visual task in adults with ASD. A computerized visual cancellation task was developed using open-source tools and synchronized with a multichannel EEG recording system. The sample included neurotypical adults and individuals clinically diagnosed with ASD (level 1 support). Spectral power density (PSD), Event-related spectral perturbation (ERSP), and functional coherence were analyzed under resting-state and task conditions. The findings revealed that individuals with ASD exhibited increased power in slow-frequency bands (delta and theta) during resting state and reduced alpha desynchronization during task execution, suggesting cortical slowing and difficulty in attentional engagement. Functional hyperconnectivity was observed at rest, followed by a marked decrease in coherence during the task, indicating possible deficits in adaptive network reconfiguration. Additionally, ERSP results showed low stimulus-related reactivity, especially in the pre-task period among ASD participants. The EEG-based approach proved effective in detecting differences in brain dynamics associated with attentional vigilance in ASD. Furthermore, the computational paradigm developed in this research demonstrated technical viability and applicability in broader neuroengineering contexts. These results highlight the importance of electrophysiological biomarkers for individualized assessment and the development of personalized interventions for individuals on the autism spectrum.

Keywords: Autism spectrum disorder, attentional vigilance, EEG, spectral analysis, continuous task

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conectividade efetiva.....	15
Figura 2 – Posição dos eletrodos do sistema 10-20	17
Figura 3 – Registro do eletroencefalograma.....	18
Figura 4 – Ilustração do gráfico em “U”	19
Figura 5 – Tela do teste de cancelamento.....	21
Figura 6 – Fluxograma teste de cancelamento	22
Figura 7 – Setup do experimento	23
Figura 8 – Eletroencefalógrafo de 26 a 54 canais.....	24
Figura 9 – Fluxograma das etapas.....	25
Figura 10 – Potência média em dB por condição e ROI’s (banda Delta)	28
Figura 11 – Potência média em dB por condição e ROI’s (banda Teta)	28
Figura 12 – Potência média em dB por condição e ROI’s (banda Alfa)	29
Figura 13 – Potência média em dB por condição e ROI’s (banda Beta)	29
Figura 14 – Gráfico de linhas entre condições (linha de base e teste, Delta)	30
Figura 15 – Gráfico de linhas entre condições (linha de base e teste, Teta)	30
Figura 16 – Gráfico de linhas entre condições (linha de base e teste, Alfa)	31
Figura 17 – Gráfico de linhas entre condições (linha de base e teste, Beta)	31
Figura 18 – ERSP médio	32
Figura 19 – Boxplot com coerência média entre condição e teste	33

LISTA DE SIGLAS

ABA	Applied Behavior Analysis
ACC	Anterior Cingulate Cortex
APA	American Psychological Association
ASD	Autism Spectrum Disorder
CEN	Central Executive Network
CPT	Continuous Performance Task
DLPFC	Dorsolateral Prefrontal Cortex
DMN	Default Mode Network
DSP	Digital Signal Processing
EEG	Electroencephalography
ERPs	Event-Related Potentials
ERSP	Event-Related Spectral Perturbation
FFT	Fast Fourier Transform
FIC	Fronto-Insular Cortex
FDR	False Discovery Rate
ICA	Análise dos Componente Independentes
IFCN	International Federation of Clinical Neurophysiology
PCC	Posterior Cingulate Cortex
PPC	Posterior Parietal Cortex
PSD	Power Spectral Density
ROIs	Regions of Interest
SN	Saliency Network
TEA	Transtorno do Espectro Autista
VMPFC	Ventromedial Prefrontal Cortex

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 NEUROCIÊNCIA COMPORTAMENTAL NO TEA	15
2.2 ELETROENCEFALOGRAMA E APLICAÇÕES NA INVESTIGAÇÃO NO TEA	16
2.3 ANÁLISES ESPECTRAIS E CONECTIVIDADE FUNCIONAL.....	18
2.4 OSCILAÇÕES E CONTROLE COGNITIVO.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 METODOLOGIA.....	23
3.2 SEGMENTO TEMPORAL	23
3.3 ANÁLISE ESPACIAL DO EEG.....	24
3.4 MÉTRICAS E EXTRAÇÃO DE DADOS DOS GRUPOS.....	25
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
4 RESULTADOS	27
5 DISCUSSÃO	32
6 CONCLUSÃO.....	34
6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS	35
7 REFERÊNCIAS.....	35
8 ANEXOS.....	38

1. INTRODUÇÃO

O Transtorno do Espectro Autista (TEA) é um transtorno do neurodesenvolvimento caracterizado por déficits na comunicação social, interação e presença de padrões restritos e repetitivos de comportamento — com manifestação nos primeiros anos de vida e impacto significativo nas esferas social, educacional e ocupacional (APA, 2022). Entre as funções cognitivas frequentemente afetadas no TEA, a vigilância atencional é destacada, pois dificulta a capacidade de manter o foco em estímulos ou tarefas ao longo do tempo. Essa função é vital para aprendizagem, autorregulação e desempenho em atividades sociais e acadêmicas — mas é comumente prejudicada em pessoas com TEA (Russo-Ponsar et al., 2021; Sandin et al., 2022). Abordagens como a Análise do Comportamento Aplicada (ABA) continuam sendo uma intervenção baseada em evidências para TEA, utilizando reforço positivo, modelagem e controle de estímulos para desenvolver habilidades cognitivas e adaptativas (Cooper, Heron & Heward, 2020; Leifer et al., 2021).

O uso de ferramentas pela abordagem ABA, como jogos sérios, plataformas interativas e tarefas computacionais, tem se expandido. Paradigmas de *continuous performance task* (CPT) — nos quais o participante identifica estímulos-alvo entre estímulos concorrentes — vêm se mostrando eficazes para treinar vigilância atencional, com aumento de estímulo-resposta e coleta automática de dados (Li et al., 2022; Franco et al., 2023). Além disso, a adoção de ferramentas digitais de baixo custo, construídas em ambientes de código-aberto (por exemplo, Python), permite interfaces acessíveis, coleta de dados automática e personalização de relatórios, ampliando o acesso à avaliação cognitiva no TEA (Reis et al., 2021).

O TEA frequentemente apresenta diferenças na vigilância atencional e seletiva. A aquisição e interpretação de EEG, incluindo análise de potência espectral (PSD), Perturbação Espectral Relacionada ao Evento (ERSP) e coerência, oferecem perspectivas para entender diferenças neurofisiológicas associadas a tarefas cognitivas em indivíduos com TEA. Neste sentido, este estudo tem como proposta analisar a PSD, ERSP e coerência EEG durante uma tarefa visual contínua com foco em vigilância atencional.

1.1. OBJETIVO GERAL

Investigar os padrões do eletroencefalograma (EEG) associados à vigilância atencional em indivíduos com TEA, por meio de um teste de cancelamento visual adaptado, com o objetivo de compreender os mecanismos neurofisiológicos subjacentes às alterações cognitivas nesse transtorno.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Desenvolver um teste computacional de cancelamento visual utilizando ferramentas de código aberto;
- b) Coletar e processar sinais de EEG durante a execução do teste, com foco na vigilância atencional;
- c) Analisar a Potência Espectral (PSD), a sincronização relacionada a eventos (ERSP) e a coerência entre regiões cerebrais envolvidas na atenção;
- d) Comparar os padrões de atividade neural entre participantes com e sem TEA durante a realização do teste.

1.3. JUSTIFICATIVA

Entre as habilidades cognitivas frequentemente afetadas no TEA, a atenção sustentada se destaca pelo seu papel central no desempenho escolar, social e em atividades da vida diária (Corbett et al., 2023; Wang et al., 2013). A avaliação objetiva da vigilância atencional nesse público ainda enfrenta desafios importantes. Muitos instrumentos disponíveis são importados, têm alto custo ou não se adaptam às particularidades comportamentais do público-alvo (Lyall et al., 2017; Baribeau et al., 2019).

Além disso, há carência de ferramentas que integrem estímulos visuais significativos e que sejam fundamentadas em princípios da ABA — abordagem amplamente adotada na intervenção com indivíduos com TEA (Sanders, 2009; Smith, 2010). Neste contexto, a presente pesquisa propõe o desenvolvimento de um teste de cancelamento visual adaptado para o público com TEA, utilizando recursos tecnológicos acessíveis e análise neurofisiológica complementar. A proposta busca preencher uma lacuna entre as demandas clínicas e educacionais e as possibilidades reais de avaliação personalizada, contribuindo para o avanço científico e prático na área do neurodesenvolvimento.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado de forma a possibilitar uma compreensão gradual e integrada do problema de pesquisa, dos fundamentos teóricos e metodológicos, bem como da análise dos resultados. No primeiro capítulo, é apresentada uma revisão sobre a neurociência TEA destacando-se as alterações neurobiológicas e cognitivas associadas à vigilância atencional. São discutidas as principais redes neurais envolvidas nesse processo, como a rede de saliência (SN), a rede executiva central (CEN) e a rede em modo padrão (DMN), bem como

sua relação com as dificuldades comportamentais observadas em indivíduos com TEA.

O segundo capítulo aborda o EEG e suas aplicações na investigação do TEA. Nesse contexto, são descritos os fundamentos do registro eletrofisiológico, as bandas de frequência e suas funções neurocognitivas, bem como as metodologias quantitativas que permitem analisar os sinais cerebrais em termos espectrais e de conectividade funcional. No terceiro capítulo, são discutidas as análises espectrais e a conectividade funcional enquanto potenciais biomarcadores neurocomportamentais no TEA. O capítulo apresenta métricas como a PSD, e a coerência funcional, destacando sua relevância para a identificação de alterações cognitivas e sociais no transtorno.

O quarto capítulo é dedicado às oscilações cerebrais e à regulação cognitivo-comportamental, explorando como diferentes bandas de frequência, como delta, teta, alfa e beta, refletem processos relacionados à atenção, ao controle executivo, à flexibilidade cognitiva e à regulação comportamental. No quinto capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados no estudo, incluindo a caracterização da amostra, o ambiente experimental, a tarefa computacional de cancelamento visual adaptada ao público com TEA, o sistema de registro EEG e os procedimentos de pré-processamento e análise dos sinais.

Por fim, os capítulos seguintes apresentam os resultados obtidos, a discussão dos achados à luz da literatura científica, e as conclusões, que sintetizam as contribuições da pesquisa, apontando suas limitações e sugerindo caminhos para investigações futuras.

2. Fundamentação teórica

O estudo fundamenta-se na relação entre alterações neurofuncionais do TEA e sua manifestação em processos atencionais. O uso do EEG, aliado a métricas como PSD, ERSP e coerência funcional, permite identificar padrões oscilatórios atípicos que servem como biomarcadores da regulação cognitivo-comportamental que serão descritos nessa seção.

2.1. Neurociência comportamental no TEA

A abordagem integrativa na área da neurociência comportamental busca elucidar as complexas interações entre circuitos neurais e manifestações comportamentais observadas no TEA (Cacioppo & Decety, 2023). Nesse contexto, o TEA configura-se como um distúrbio de neurodesenvolvimento caracterizado por alterações persistentes em processos sociais, comunicativos e cognitivos, que refletem disfunções em níveis fundamentais da organização cerebral. A análise dos déficits sob a perspectiva neurobiológica é crucial para compreender os mecanismos que determinam o perfil comportamental atípico observado, uma vez que alterações em circuitos neurais específicos impactam diretamente as funções cognitivas e sociais

características do transtorno (Lombardo, LAI & Baron-Cohen, 2023 e Uddin, Supekar & Menon, 2023).

Um dos aspectos centrais da disfunção está relacionado à vulnerabilidade dos sistemas neurais responsáveis pela vigilância atencional, a qual remete à capacidade sustentada de monitorar e responder a estímulos ambientais relevantes (Keehn, Müller & Townsend, 2013). Evidências convergentes oriundas de estudos de neuroimagem funcional e eletrofisiológicos têm demonstrado alterações estruturais e funcionais nas redes fronto-parietais dorsais, na rede de saliência e na rede em modo padrão (default Mode Network – Dmn), cuja integridade e dinâmica são fundamentais para o controle adaptativo da atenção e do comportamento (Uddin, Supekar & Menon, 2015; Padmanabhan ET Al., 2017; Bathelt & Geurts, 2025). Na figura a seguir, o estudo apresentado reflete sobre a conectividade efetiva no autismo, especialmente na tarefa de atenção social.

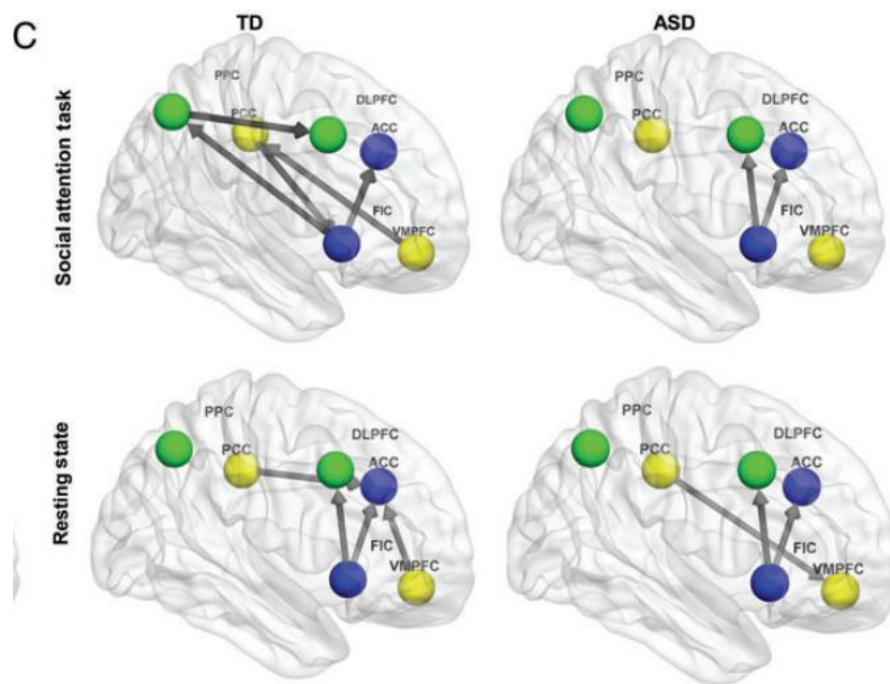


Figura 1 - Conectividade efetiva entre os nós principais das redes de saliência (SN), executiva central (CEN) e modo padrão (DMN) em crianças típicas (TD) e com TEA. A imagem mostra a redução da conectividade no TEA durante a tarefa de atenção social, evidenciando alterações na vigilância atencional. Fonte: Adaptado, 2025.

A atenção social sugerida na tarefa do presente estudo reflete um processo neurocognitivo essencial que permite a monitorização contínua do ambiente para a detecção e resposta a estímulos relevantes. (Uddin, et al., 2015). Tal processo depende da interação funcional entre três redes neurais centrais: a rede de saliência (SN), a rede executiva central (CEN) e a rede de modo padrão (Dmn), (Menon, Vinod 2015). A SN, formada principalmente pelo córtex cingulado anterior (ACC) e córtex frontoinsular (FIC), atua como sistema de

detecção de estímulos significativos, direcionando a atenção para informações sociais e emocionais cruciais. (Uddin, Et Al., 2015) e a CEN, que envolve o córtex pré-frontal dorsolateral (DLPFC), enquanto o córtex parietal posterior (PPC), responde pelo controle executivo e pela manutenção da atenção orientada à tarefa. (Seeley, William W. Et Al) A DMN, constituída pelo córtex cingulado posterior (PCC) e córtex pré-frontal ventromedial (VMPFC), relaciona-se a processos internos, como autorreflexão e memória autobiográfica (Raichle, Marcus E. et al 2001).

Em termos comportamentais, essas alterações refletem um padrão característico de dificuldades na regulação da atenção, com prejuízo na seleção e priorização de estímulos, menor capacidade de manter o foco por períodos prolongados, e rigidez na adaptação às demandas ambientais, impactando diretamente nas habilidades sociais e cognitivas (Keehn et al., 2013; Wang et al., 2023). A neurociência do comportamento visa mapear essas relações complexas, buscando identificar os padrões neurais que fundamentam os déficits observados, com vistas a oferecer subsídios para intervenções terapêuticas direcionadas.

2.2. O Eletroencefalograma e aplicações na investigação no TEA

O EEG constitui uma metodologia neurofisiológica não invasiva, capaz de capturar a atividade elétrica cerebral com elevada resolução temporal por meio de eletrodos dispostos na superfície do couro cabeludo (Niedermayer, et al., 2005). Essa atividade elétrica é resultante da soma da atividade sincronizada de grandes populações neuronais, permitindo a análise dinâmica dos processos neurocognitivos subjacentes a estados mentais e comportamentais (Makeig et al., 2004). O EEG no contexto do TEA revelou-se como uma ferramenta imprescindível para elucidar as alterações neurofisiológicas que comprometem as funções cognitivas e sociais. A partir do registro eletrofisiológico, conhecido internacionalmente pelo sistema 10-20, é possível caracterizar padrões específicos de oscilação cerebral, que refletem a integridade funcional das redes neurais responsáveis pela regulação da atenção, processamento sensorial e controle executivo — aspectos centrais no perfil neurocomportamental do TEA. A seguir, a figura apresenta a montagem do sistema reconhecido.

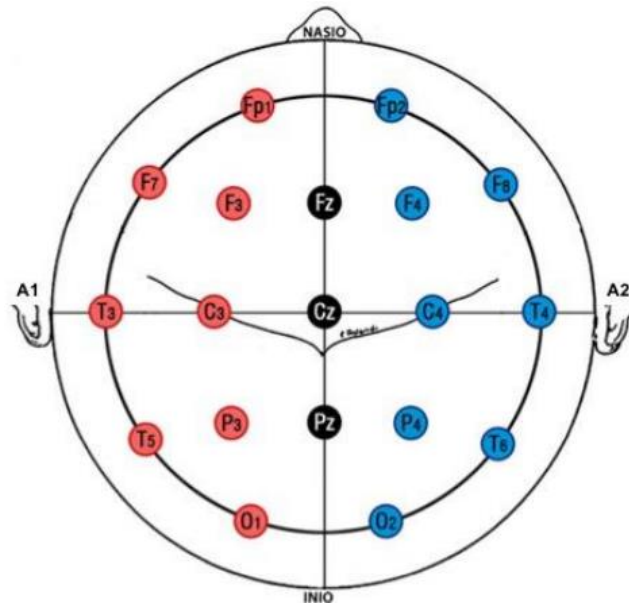


Figura 2 – Posição dos eletrodos do sistema 10-20. Fonte: Sociedade Brasileira de Neurofisiologia Clínica, 2025.

As oscilações registradas pelo EEG são classificadas em bandas de frequência distintas — delta (1–4 Hz), teta (4–8 Hz), alfa (8–12 Hz), beta (13–30 Hz) e gama (>30 Hz) — cada qual associada a processos neurofisiológicos específicos, os quais modulam estados de vigília, atenção, controle inibitório e integração sensório-motora (Harmony, T., 2013). A análise da distribuição espectral dessas frequências possibilita a compreensão dos mecanismos neurais subjacentes ao desempenho cognitivo e adaptativo, (Başar, E., 2012). Além da análise do sinal bruto, o EEG permite a aplicação de técnicas quantitativas avançadas, como a densidade espectral de potência (PSD), a Perturbação Espectral Relacionada a Eventos (ERSP) e a coerência funcional, que permitem avaliar, respectivamente, a distribuição da energia espectral, as dinâmicas temporais da resposta neural e a sincronização funcional entre regiões cerebrais distintas (Makeig Et Al., 2004; Cohen, 2014; Friston, 2011). Essas métricas constituem biomarcadores neurofisiológicos robustos, essenciais para a caracterização das disfunções cognitivas e sociais observadas nesse grupo. Abaixo, a imagem ilustra as interpretações das frequências de banda, a onda cerebral e seu estado durante um registro de EEG.

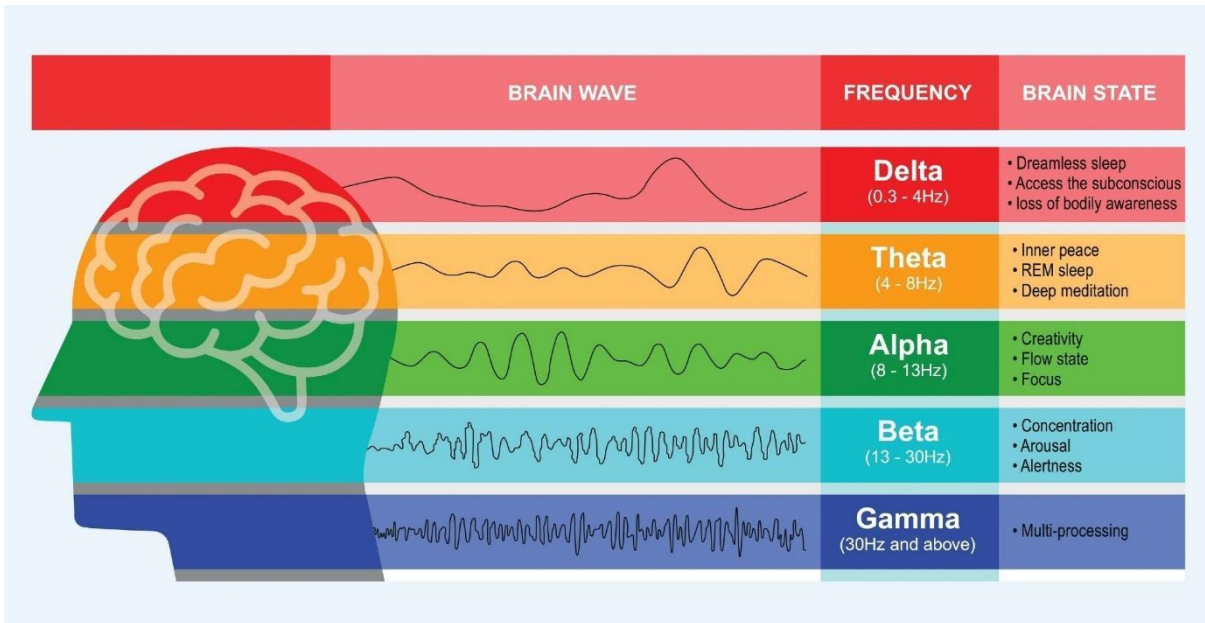


Figura 3 – O registro do eletroencefalograma. Fonte: ADAMS, Matthew, adaptado, 2025.

Dessa forma, o EEG não somente fornece uma janela privilegiada para a compreensão dos padrões no TEA, mas também oferece subsídios cruciais para o desenvolvimento e monitoramento de intervenções terapêuticas direcionadas, promovendo avanços significativos na neurociência comportamental aplicada ao transtorno.

2.3. Análises espectrais e conectividade funcional

A PSD é uma medida que quantifica a distribuição da energia do sinal elétrico cerebral em diferentes bandas de frequência, como delta, teta, alfa, beta e gama. Essa distribuição é crucial para compreender os padrões de ativação neural relacionados a processos cognitivos e emocionais, sendo de diferentes estados mentais associados a distintas faixas de frequência em seus processos cognitivos. (Makeig et al., 2004). Já a métrica ERSP, avalia as mudanças temporais na potência espectral provocadas por estímulos específicos ou eventos, permitindo o acompanhamento dinâmico das respostas neurais durante tarefas cognitivas ou sensoriais. (Delorme, A., et al, 2004). O ERSP permite identificar padrões dinâmicos de ativação cerebral que não seriam perceptíveis em análises estáticas, evidenciando, por exemplo, déficits na sincronização e no processamento temporal de estímulos.

Além disso, a métrica de coerência funcional é um índice que mede a sincronização das oscilações neurais entre diferentes regiões cerebrais, refletindo a comunicação funcional entre redes neurais durante a execução de tarefas ou em estado de repouso (Ho et al., 2024). Alterações na coerência funcional podem indicar disfunções na conectividade cerebral, que têm sido associadas a déficits sociais e atencionais no TEA. Recentemente, estudos têm evidenciado que

essas três métricas — PSD, ERSP e coerência funcional — funcionam como biomarcadores sensíveis para identificar e caracterizar as disfunções cognitivas e sociais presentes no TEA, contribuindo para o avanço no diagnóstico e no monitoramento de intervenções terapêuticas (Hudac et al., 2023; Ke et al., 2024).

Contudo, a hiperpotência nas bandas de frequência delta e teta em repouso, associada à redução da dessincronização alfa durante a execução de tarefas, reflete dificuldades na ativação e supressão das redes neurais envolvidas nos processos atencionais (Höller et al., 2023). Adicionalmente, a redução da coerência funcional entre regiões frontoparietais durante o desempenho cognitivo tem sido consistentemente relacionada à rigidez funcional e à menor flexibilidade adaptativa em TEA, (Schwartz et al., 2024). Na figura 2, é apresentado um gráfico em formato U, e que, no EEG, representa um padrão em que há aumento da potência nas frequências baixas (delta e teta) e redução nas frequências intermediárias em alfa, (Wang, Juan et al., 2013). Esse padrão é comum em TEA e indica disfunções na ativação e regulação das redes neurais associadas à atenção e ao processamento cognitivo.

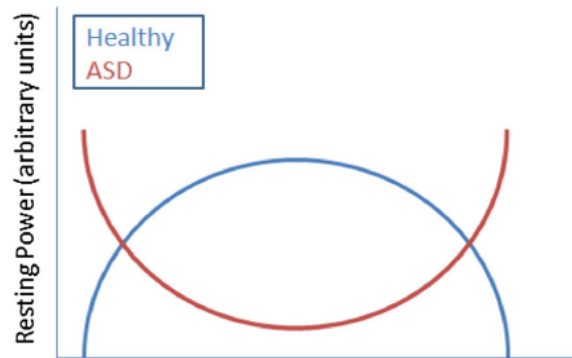


Figura 4 – Ilustração do gráfico em “U”. Fonte: WANG, adaptado, 2025.

2.4. Oscilações e controle cognitivo

As oscilações neurais registradas pelo EEG são indicativas da atividade sincronizada de populações neuronais e refletem diferentes processos neurofuncionais essenciais para o comportamento adaptativo (Cavanagh, James F. et al., 2014). A banda delta (1–4 Hz), comumente associada a estágios profundos do sono, quando elevada em vigília é interpretada como sinal de lentificação cortical e diminuição da ativação neural, o que prejudica a eficiência da alocação atencional (Harmony, T., 2013). Além disso, evidências recentes com amostras clínicas indicam que o aumento da potência delta em indivíduos com TEA, observado durante o estado de vigília, reflete uma lentificação cortical associada à hipoativação de redes frontoparietais e possíveis disfunções nos circuitos tálamo-corticais. (Zhou et al., 2023). Essas

alterações comprometem a eficiência dos mecanismos de manutenção atencional, dificultando a sustentação de estados neurocognitivos estáveis necessários para o processamento adaptativo da informação.

A banda teta (4–8 Hz) está fortemente vinculada a processos de atenção sustentada, monitoramento de erros e controle executivo, especialmente durante tarefas cognitivas que exigem alta demanda (Cavanagh, James F. et al, 2014). Em contextos clínicos, níveis elevados de atividade na banda teta, particularmente sobre regiões frontocentrais, têm sido associados à sobrecarga cognitiva e à ativação de mecanismos compensatórios mediados por redes de controle executivo e monitoramento de desempenho, (Anguera, A. et al., 2013). Esse aumento pode refletir uma maior demanda sobre circuitos pré-frontais e cingulados para sustentar a atenção e o processamento de erros diante de déficits nos mecanismos atencionais primários.

A banda alfa (8–12 Hz) exerce uma função reguladora essencial na coordenação da atividade cortical, atuando por meio da inibição funcional de regiões neurais irrelevantes para a tarefa em curso, o que facilita a atenção seletiva e a alocação eficiente de recursos cognitivos (Klimesch, W., 2012). A dessincronização da banda alfa, caracterizada pela redução da sua potência, é amplamente reconhecida como um marcador neurofisiológico de engajamento cortical e processamento ativo da informação sensorial (Pfurtscheller, G. et al, 1999). No entanto, a manutenção elevada da potência alfa em indivíduos com TEA, conforme observado em nossos resultados, sugere déficits na supressão da rede de modo padrão (DMN), cuja ativação inadequada pode comprometer a capacidade de filtragem de estímulos distratores e o foco atencional (Nguyen; Smith; Johnson, 2023). Esses achados corroboram evidências recentes que associam o aumento da potência alfa em TEA a dificuldades no processamento sensorial e na regulação da atenção, possivelmente decorrentes de disfunções na dinâmica de acoplamento e desacoplamento entre redes neurais relevantes para a cognição (Nguyen et al., 2023).

Além disso, a banda beta (13–30 Hz) está associada à integração sensório-motora e ao controle inibitório, desempenhando papel crucial na flexibilidade cognitiva e na regulação do comportamento adaptativo (Engel et. Al., 2010). Reduções na potência beta têm sido frequentemente observadas em populações com déficits no controle executivo e regulação comportamental, sugerindo dificuldades na adaptação às demandas ambientais e nos processos de inibição motora (Müller et al., 2023). Nossos dados indicam uma diminuição da potência beta nas regiões frontais, reforçando o quadro de comprometimento no controle motor e atencional. Portanto, essas alterações oscilatórias compõem um perfil neurofisiológico consistente com as dificuldades comportamentais observadas em TEA, evidenciando que a regulação cognitivo-comportamental depende da interação equilibrada entre diferentes bandas de frequência, cuja disfunção pode comprometer a vigilância atencional.

3. Materiais e métodos

Baseado e validado em Cascaes et. al, 2019., o objetivo consiste na adaptação e automatização do teste de cancelamento de carros (voitures test), tradicionalmente aplicado em papel, para uma versão digital interativa em tela sensível ao toque. Logo, na etapa experimental desse trabalho, a matriz apresentada na tela continha estímulos-alvo intercalados com distratores, dispostos aleatoriamente a cada tentativa. Os participantes deveriam clicar exclusivamente sobre os alvos utilizando o mouse, na figura 5. Cada acerto resultava na reorganização aleatória dos estímulos, garantindo exploração visual contínua e impedindo estratégias baseadas em localização.

A tarefa teve duração fixa de 7 minutos e 30 segundos, com número ilimitado de respostas e encerramento automático. Os participantes não receberam instruções sobre velocidade de resposta ou acurácia, a fim de preservar um padrão de busca espontâneo. Antes da tarefa principal, foi oferecida uma etapa de familiarização sem feedback. Na figura 6, é ilustrado o fluxograma e o funcionamento do teste.

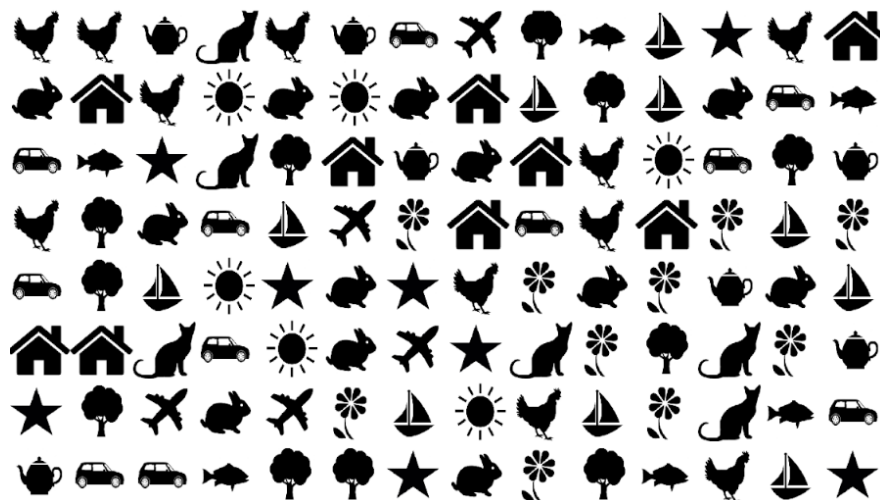


Figura 5 – Tela do teste de cancelamento. Fonte: Autora, 2025.

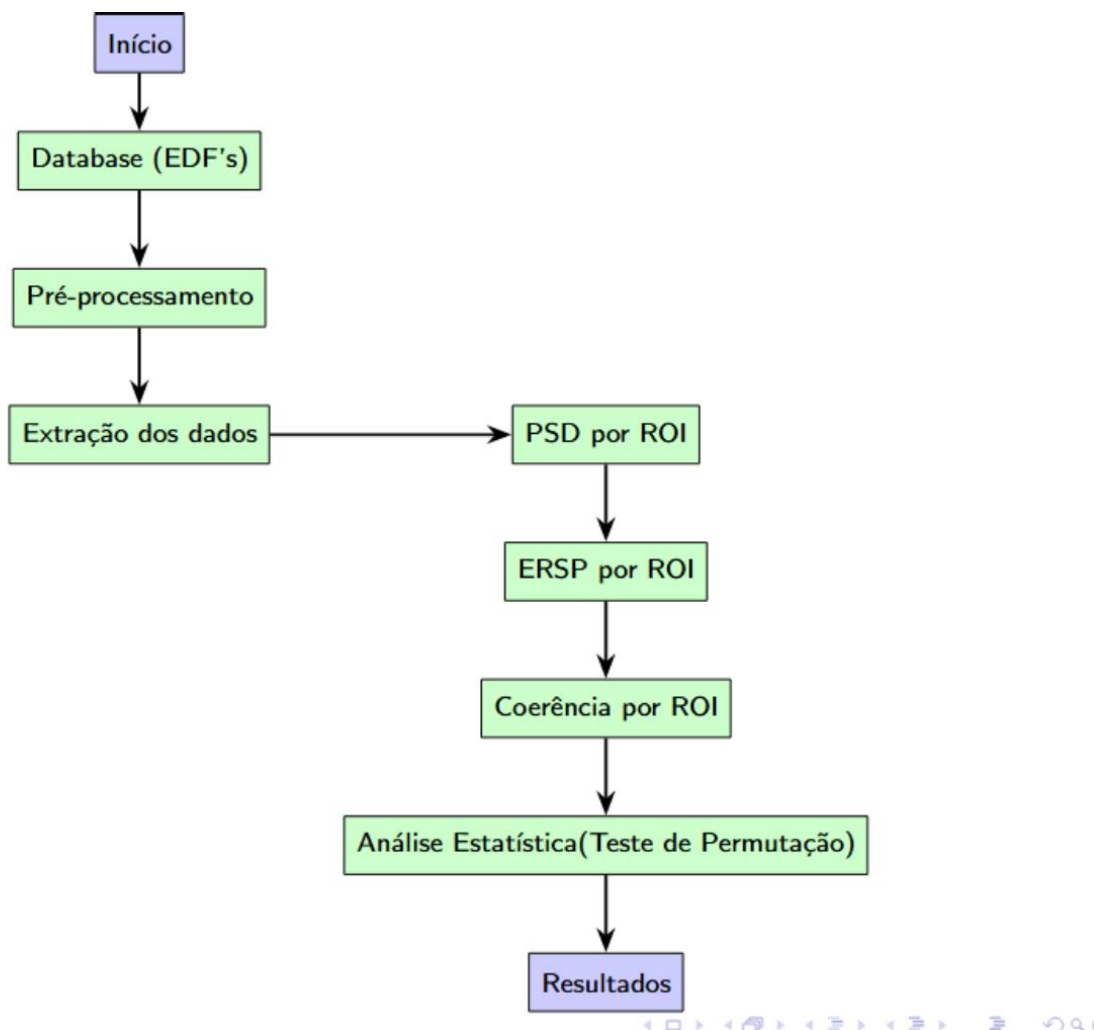


Figura 6 – Fluxograma do teste. Fonte: Autora, 2025.

3.1. Banco de dados

A amostra foi composta por 11 voluntários, do grupo TEA e nível de suporte 1, 3 do sexo feminino e 3 do sexo masculino e do grupo controle, 3 do sexo masculino e 2 do sexo feminino com idades entre 20 e 28 anos. Os critérios de inclusão foram: ter entre 18 e 30 anos, visão normal ou corrigida, e capacidade de seguir instruções. Foram excluídos indivíduos com histórico de patologias neurológicas ou psiquiátricas graves, uso de substâncias psicoativas, ou que não consentiram formalmente (TCLE). O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFPA (CAAE 56365722.9.0000.0018).

3.2. Ambiente controlado

Os experimentos ocorreram individualmente em ambiente controlado, com iluminação indireta, temperatura ambiente e isolamento acústico. Os participantes foram posicionados a 60 cm de um monitor de 21,5", sentados em cadeira ajustável, conforme ilustrados nas figuras 7 e

8. A tarefa foi executada com mouse convencional e apresentada por meio do software NeuroMap®, com o sistema internacional 10–20 e taxa de amostragem de 256 Hz, com tecnologia DSP. O equipamento possibilitou o controle preciso da apresentação dos estímulos, a marcação temporal dos eventos experimentais e a integração direta com o registro neurofisiológico, garantindo alta confiabilidade na associação entre desempenho comportamental e atividade cerebral.



Figura 7 – Setup do experimento no laboratório de Neuroprocessamento – UFPA. Fonte: Autora, 2025.

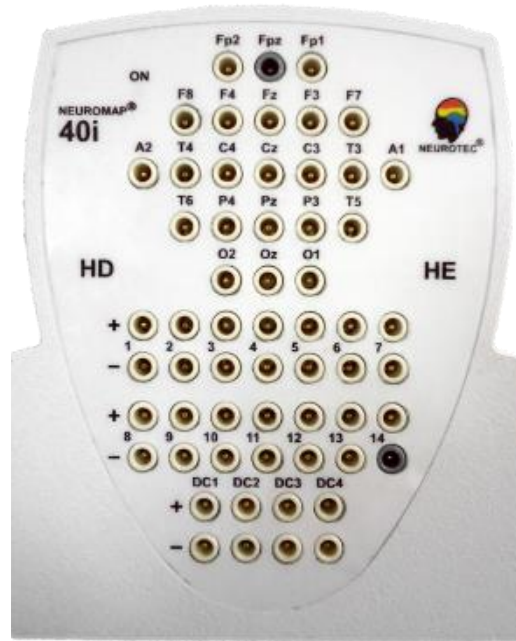


Figura 8 – Eletroencefalógrafo de 26 a 54 canais que utiliza as mais modernas técnicas de processamento digital de sinais (DSP). Fonte: Adaptado, 2025.

3.3. Metodologia

Cada participante teve suas gravações armazenadas em pastas individuais, com arquivos no formato EDF, padrão amplamente adotado em pesquisas neurofisiológicas devido à sua capacidade de armazenar múltiplos canais e eventos temporais de forma consistente, conforme configuração do equipamento NeuroMap® e sistema internacional 10–20. Essa organização permitiu análises comparativas entre indivíduos com e sem TEA, mantendo a integridade dos dados e facilitando o processamento automatizado por meio de programação aberta em Python. O pré-processamento dos sinais EEG seguiu um protocolo automatizado, implementado utilizando a biblioteca MNE-Python, visando a máxima qualidade do sinal e a remoção de artefatos fisiológicos e não fisiológicos, como interferências elétricas.

No mapeamento topográfico, os canais com sufixo “-Ref” foram renomeados para padronização, e a disposição espacial dos eletrodos foi ajustada de acordo com o sistema 10–20, garantindo consistência anatômica entre os participantes. Para reduzir ruídos de baixa frequência, provenientes de deriva de linha de base, e de alta frequência, relacionados a interferências musculares, aplicou-se uma filtragem passa-banda de 1 a 40 Hz, complementada por um filtro notch em 60 Hz para eliminar ruídos da rede elétrica. O EEG foi re-referenciado à média dos canais, estratégia reconhecida por reduzir o viés de referência e melhorar a comparabilidade espacial entre regiões cerebrais (Delorme & Makeig, 2004).

Para a remoção de artefatos específicos, aplicou-se a Análise de Componentes Independentes (ICA), com extração de 15 componentes e ajuste automático de convergência.

Essa abordagem permitiu identificar e remover atividades não neurais, como piscadas, movimentos oculares e interferências musculares. Canais identificados como ruins foram interpolados, preservando a integridade do conjunto de dados e evitando perda de informações relevantes. O fluxograma figura 9, ilustra as etapas do processo.

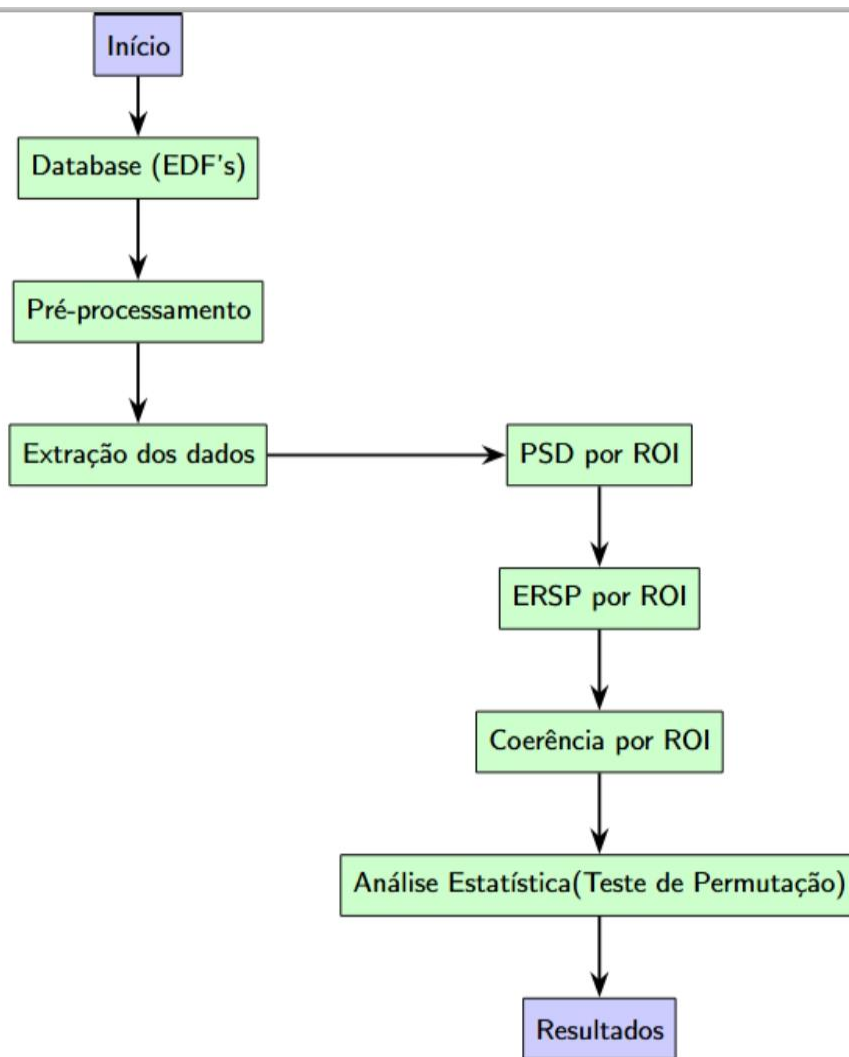


Figura 9 – Fluxograma das etapas de análise e interpretação do database. Fonte: Autora, 2025.

3.4. Segmento temporal

As gravações EEG de cada participante foram segmentadas automaticamente em três blocos temporais distintos: repouso pré-tarefa, tarefa de vigilância atencional e repouso pós-tarefa. O bloco de repouso pré-tarefa compreendeu os primeiros três minutos da gravação, representando o estado basal; o bloco de tarefa, de 3 a 10,5 minutos, correspondeu ao período de execução da tarefa de vigilância atencional, projetada para avaliar seletividade e sustentação da atenção, com estímulos apresentados em matriz visual e interação via mouse; e o bloco de repouso pós-tarefa, de 10,5 a 13,5 minutos, possibilitou observar efeitos de recuperação ou persistência de alterações induzidas pela tarefa. O código utilizado incluiu

funções que garantiram a limitação segura do corte temporal, evitando erros caso a gravação fosse menor que o esperado.

3.5. Análise espacial com EEG

Para análise espacial, os eletrodos foram agrupados em cinco regiões de interesse (ROIs): frontal, central, parietal, occipital e temporal. Essa definição considerou a especialização funcional de cada área: os frontais associados à atenção e execução; os centrais ao processamento sensorio-motor; os parietais à integração sensorial; os occipitais à percepção visual; e os temporais ao processamento auditivo e memória (Cohen et al., 2014). Segundo Delorme & Makeig (2004), a abordagem regional permite investigar padrões específicos de atividade e conectividade, alinhando-se ao objetivo de diferenciar respostas cerebrais entre grupos.

3.6. Métricas e técnicas incorporadas para dados

A extração de métricas espectrais foi conduzida de forma automatizada para cada ROI e bloco experimental. A PSD foi calculada utilizando o método de Welch, com transformada Rápida de Fourier (FFT) de 1024 pontos, no intervalo de 1 a 40 Hz, e convertida para escala logarítmica (dB) para garantir normalização e comparabilidade. Para análise de alterações dinâmicas, a ERSP foi estimada utilizando o método multitaper, com frequências de 2 a 40 Hz, quatro ciclos por frequência e largura de banda temporal ajustada, permitindo avaliar mudanças de energia no domínio tempo-frequência durante a tarefa. Cada ERSP foi exportado em arquivos CSV individuais para posterior análise. Além disso, a coerência funcional entre todos os pares de canais EEG foi calculada utilizando a função “*scipy.signal.coherence*”, considerando o intervalo de 1 a 40 Hz e segmentando por bloco experimental. As matrizes de coerência foram registradas em CSVs e representadas em mapas de calor, permitindo a interpretação de padrões de sincronização funcional entre regiões cerebrais. Para padronização interindividual, todos os valores foram normalizados por z-score, garantindo comparabilidade entre sujeitos.

3.7. Análise estatística

A etapa de análise estatística foi delineada para garantir robustez frente ao tamanho amostral reduzido e à natureza complexa dos dados EEG. Considerando que as séries apresentam distribuições frequentemente não gaussianas e são influenciadas por variabilidade intersujeitos e intercanal, optou-se pelo uso de procedimentos não paramétricos, menos sensíveis a desvios estatísticos. Foi implementado o teste de permutação, amplamente

recomendado em neurociência cognitiva por sua flexibilidade e capacidade de gerar distribuições nulas empíricas a partir da própria amostra.

Para as comparações entre condições (repouso vs. tarefa) e entre grupos (Controle vs. TEA), foram realizadas 10.000 permutações estratificadas por participante, preservando a estrutura dependente dos dados. Em cada iteração, os rótulos foram reordenados e recalculou-se a estatística-t empírica, construindo uma distribuição nula contra a qual os valores observados foram contrastados. Esse procedimento possibilitou estimar valores de significância robustos, particularmente em amostras pequenas, e reduzir o risco de falsos positivos decorrentes de pressupostos incorretos.

A PSD foi estimada por Welch, método que reduz a variância das estimativas e equilibra resolução espectral com robustez frente a ruídos. Para variações dinâmicas, utilizou-se o multitaper na análise de ERSP, técnica que confere maior estabilidade frente à variabilidade do sinal. A coerência funcional foi estimada por “*scipy.signal.coherence*”, restrita às bandas de interesse (delta, teta, alfa, beta e gama). Para reduzir o risco de inflar o erro tipo I, aplicou-se o procedimento de *False Discovery Rate (FDR)* sempre que aplicável, especialmente nas análises envolvendo grande número de canais e pares de eletrodos.

Em síntese, a estratégia metodológica combinou um pipeline completo de pré-processamento automatizado, segmentação em blocos, extração de métricas espectrais e de conectividade, normalização em z-score e análise estatística não paramétrica baseada em permutação com correção FDR. Esse conjunto de procedimentos permitiu explorar de forma robusta e reprodutível as diferenças entre grupos e condições, fornecendo subsídios sólidos para as interpretações discutidas nas seções seguintes.

4. Resultados

O grupo TEA apresentou maior potência média nas regiões central, frontal e temporal em comparação ao grupo controle, com valores entre aproximadamente -120 dB e -100 dB na banda delta. A Figura 10 ilustra esse aumento consistente, evidenciando que, mesmo em repouso, o grupo TEA apresenta um perfil oscilatório distinto. Este achado está de acordo com estudos prévios que associam ondas lentas à lentificação cortical e à hipoativação de redes frontoparietais (Harmony, 2013; Zhou et al., 2023).

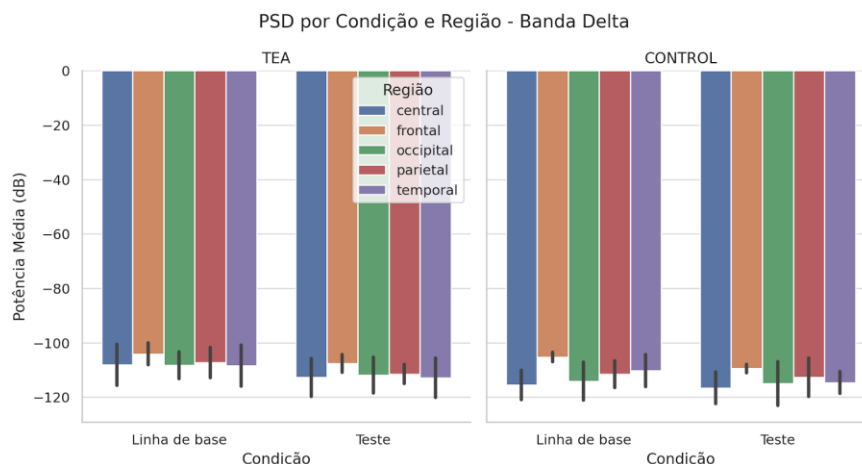


Figura 10 - Potência média em dB por condição e região (banda Delta)

Na banda teta, o grupo TEA apresentou maior potência nas regiões central, frontal e occipital em comparação ao grupo controle. A Figura 11 evidencia esse aumento, mostrando variabilidade entre os participantes TEA. Observa-se que, embora ambos os grupos apresentem redução da potência durante a execução da tarefa em relação ao repouso, o grupo controle apresenta queda mais homogênea, enquanto o grupo TEA apresenta maior dispersão, indicando heterogeneidade interindividual (Cavanagh et al., 2014; Anguera et al., 2013; Wang et al., 2013; Orekhova et al., 2007).

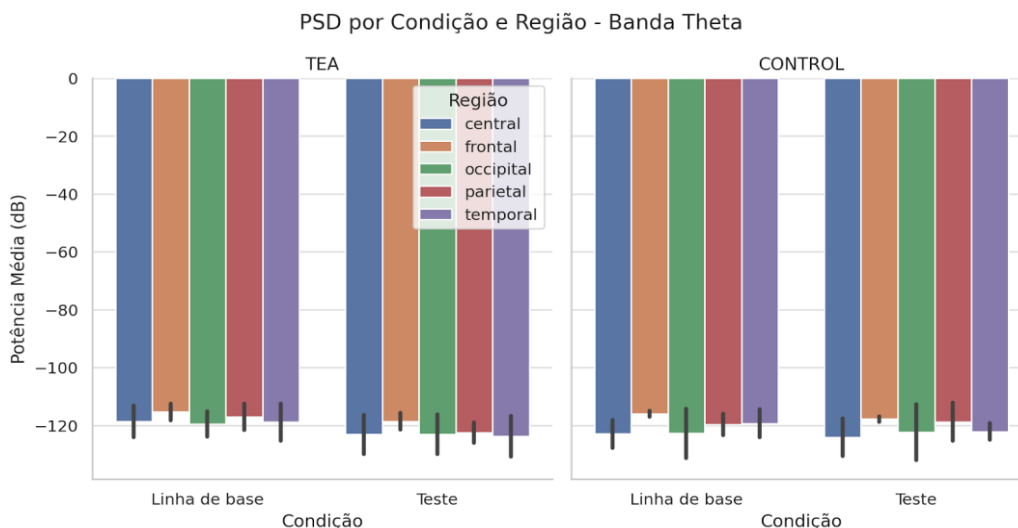


Figura 11 - Potência média em dB por condição e região (Banda Teta)

Na banda alfa, o grupo TEA apresentou dessincronização reduzida nas regiões frontal, central e occipital, mantendo potência relativamente maior em comparação ao grupo controle. A Figura 12 apresenta esse padrão, mostrando que a redução da potência alfa durante a tarefa é menos acentuada no grupo TEA, com maior variabilidade entre participantes (Klimesch, 2012; Pfurtscheller et al., 1999; Nguyen et al., 2023; Wang et al., 2013).

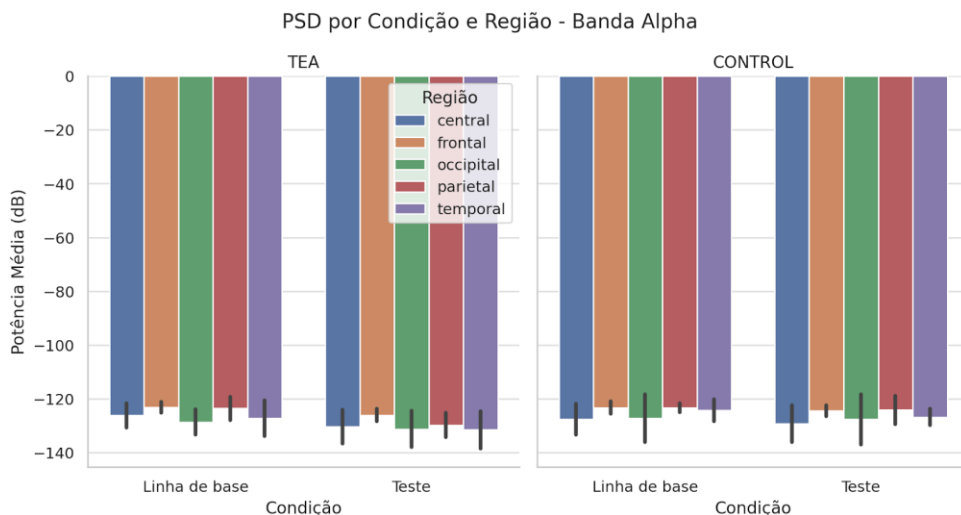


Figura 12 – Potência média em dB por condição e ROI's na frequência de banda alfa. Fonte: Autora, 2025.

Na banda beta, observa-se redução da potência nas regiões frontal, central e occipital no grupo TEA em comparação ao grupo controle. A Figura 13 evidencia a tendência geral de redução, embora alguns participantes apresentem estabilidade ou aumento de potência, indicando heterogeneidade intra-grupo (Engel et al., 2010; Müller et al., 2023).

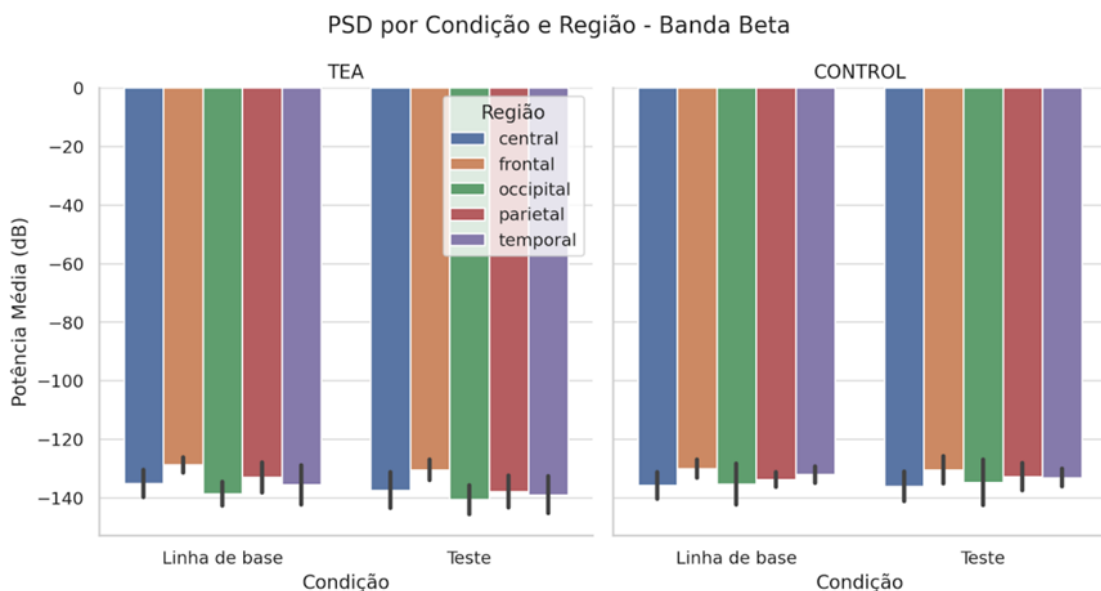


Figura 13 – Potência média em dB por condição e ROI's na frequência de banda Beta. Fonte: Autora, 2025.

A análise de variação entre linha de base (repouso pré-tarefa) e execução da tarefa foi detalhada para as bandas delta, teta, alfa e beta. Na banda delta, cada participante é representado por uma curva no gráfico da Figura 14. Observa-se redução de potência durante a tarefa em ambos os grupos, mais homogênea no grupo controle, enquanto o grupo TEA apresenta dispersão maior.

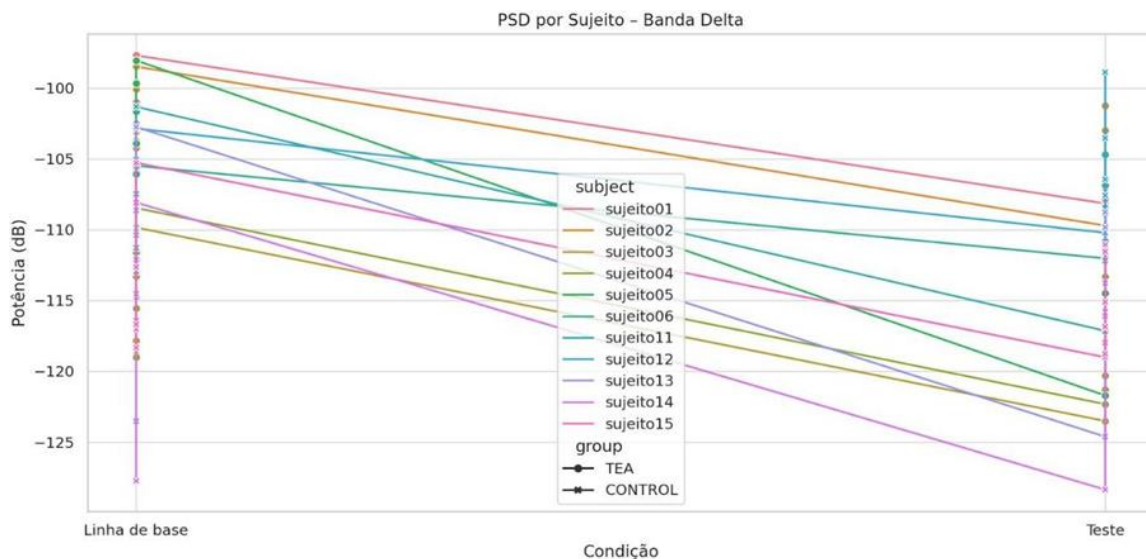


Figura 14 – Gráfico de linhas entre as condições da linha de base e teste, banda delta. Fonte: Autora, 2025.

Na banda teta, a Figura 15 evidencia redução média durante a tarefa para ambos os grupos, mas com comportamento mais uniforme no grupo controle. O grupo TEA apresenta variabilidade interindividual acentuada.

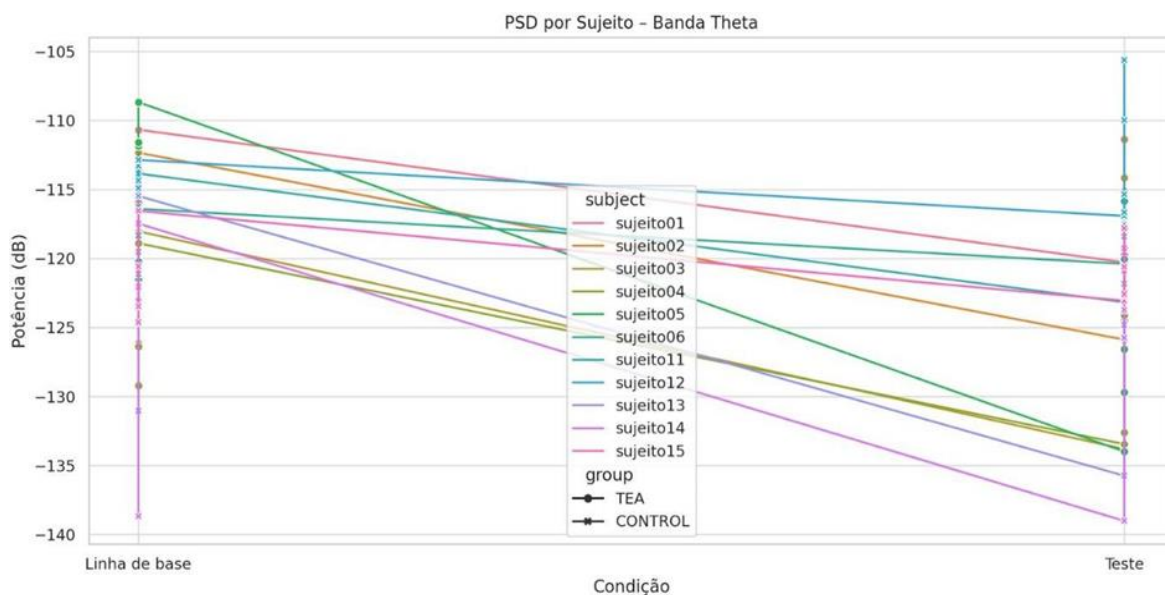


Figura 15 – Gráfico de linhas entre as condições da linha de base e teste, banda teta. Fonte: Autora, 2025.

Por seguinte, na figura 16, há a redução mais expressiva da potência em dB dentre todas as bandas, especialmente no grupo controle, onde o padrão é uniforme e acentuado. No TEA, embora haja queda média, alguns participantes mantêm níveis altos de alfa mesmo durante a tarefa, o que sugere dificuldade em suprimir a atividade da rede de modo padrão (DMN) e focar recursos atencionais (Klimesch, 2012).

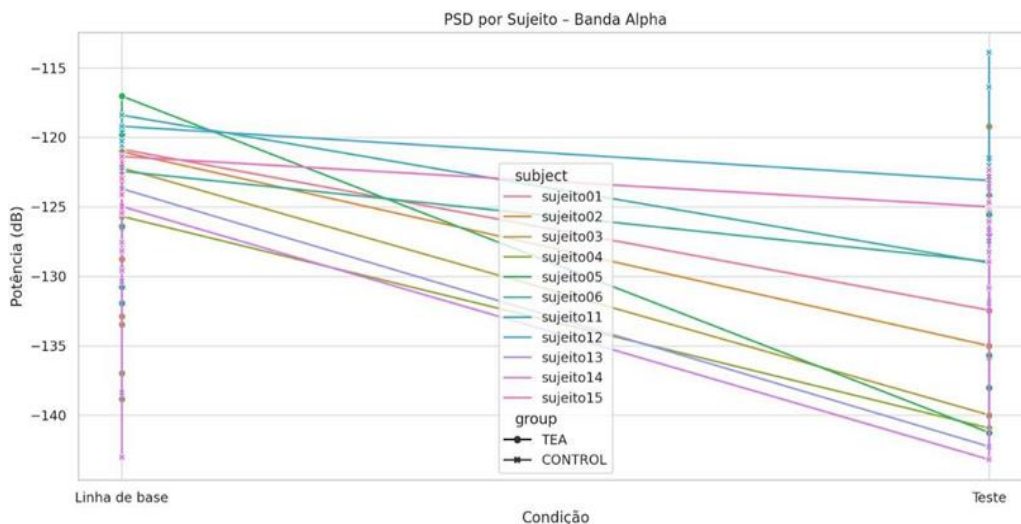


Figura 16 – Gráfico de linhas entre as condições da linha de base e teste, banda alfa. Fonte: Autora, 2025.

A banda beta, representada na figura 17, apresenta o padrão mais heterogêneo. No controle, há leve redução ou estabilidade, enquanto no TEA há dispersão acentuada: alguns aumentam, outros mantêm ou reduzem a potência. Isso indica instabilidade nos mecanismos de integração sensorio-motora e no controle inibitório (Engel et al., 2010; Müller et al., 2023), podendo refletir diferentes perfis funcionais dentro do espectro.

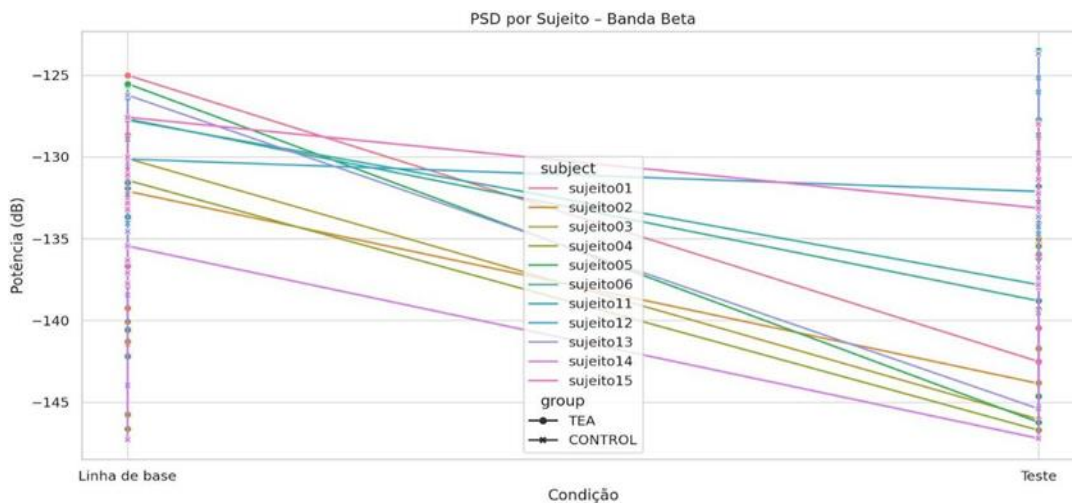


Figura 17 – Gráfico de linhas entre as condições da linha de base e teste, banda beta. Fonte: Autora, 2025.

A análise de ERSP, representada na Figura 18, mostra a variação relativa da potência espectral ao longo do tempo da tarefa. No grupo controle, observa-se padrão estável próximo do baseline (linha azul ≈ 1). No grupo TEA, há aumento inicial significativo seguido de retorno aos níveis basais, refletindo reatividade variável ao estímulo (Larrain-Valenzuela et al., 2017).

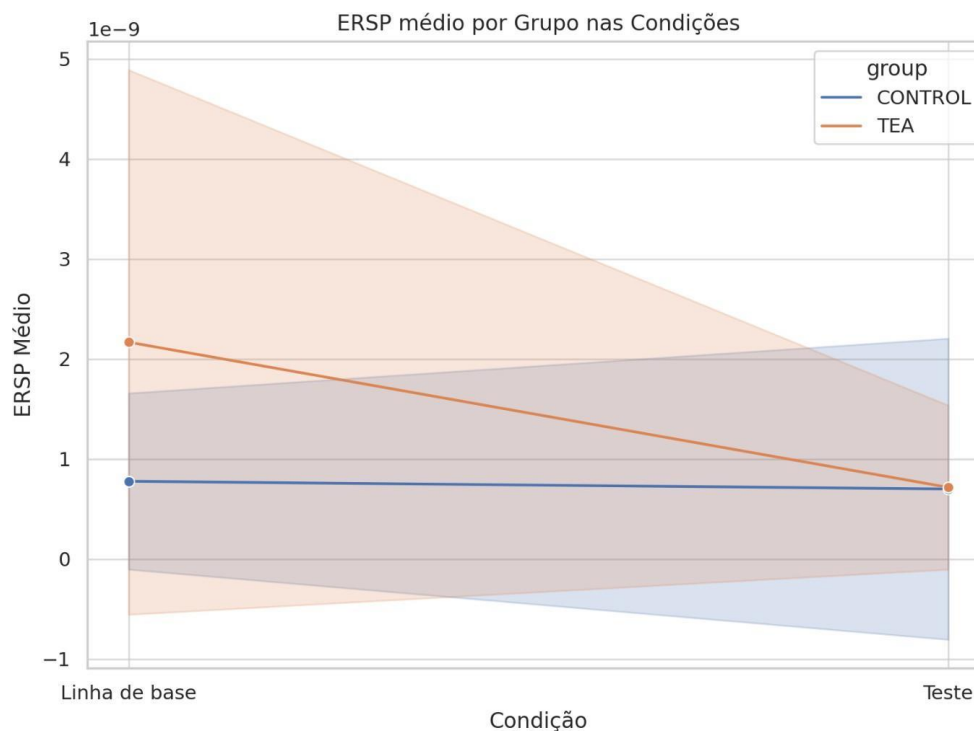


Figura 18 – ERSP médio. Fonte: Autora, 2025.

Por fim, o boxplot da figura 19 compara a coerência funcional média entre as condições (baseline e tarefa) para cada grupo. Em repouso, o TEA apresenta mediana mais alta ($\sim 0,17$) e maior dispersão dos valores, indicando hiperconectividade funcional e variabilidade interindividual acentuada. No controle, a mediana é menor ($\sim 0,08$) e os valores mais homogêneos. Durante a tarefa, ambos reduzem a coerência, mas no TEA a queda é mais acentuada e a variabilidade permanece alta. Segundo a fundamentação, esse padrão de hiperconectividade em repouso e dificuldade de modulação durante tarefa é um marcador recorrente em estudos de conectividade no TEA (O'Reilly et al., 2017) e pode refletir rigidez funcional e menor adaptabilidade das redes cerebrais.

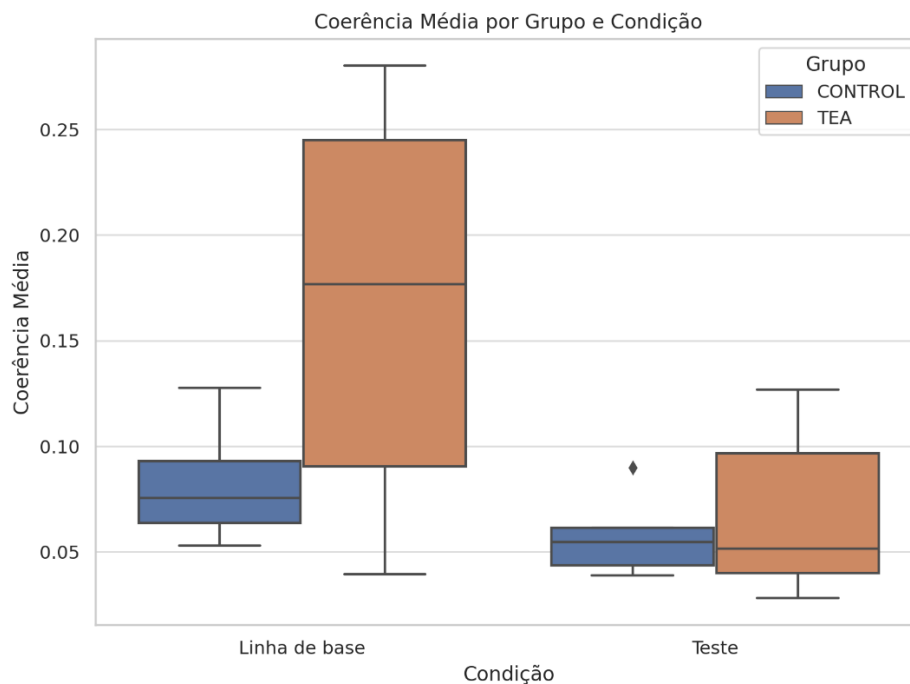


Figura 19 – Boxpot com coerência média entre condição x teste. Fonte: Autora, 2025.

5. Discussão

Os achados deste estudo fornecem evidências consistentes de que indivíduos com TEA apresentam padrões oscilatórios e de conectividade funcional atípicos, em consonância com modelos neurobiológicos que associam o transtorno a disfunções em redes neurais de larga escala (Cornew et al., 2012). A análise evidenciou alterações na coerência funcional tanto em repouso quanto durante a execução de tarefas (Cornew et al., 2012), sugerindo que o autismo envolve não apenas diferenças estáticas na organização cerebral (Falahlpour et al., 2019; Weng et al., 2010), mas também modificações na dinâmica adaptativa das redes neurais frente a demandas cognitivas (Yao et al., 2022).

Em condições de repouso, observou-se que o grupo TEA apresentou valores de coerência funcional medianos mais elevados, acompanhados de maior dispersão entre os participantes. Esse achado pode refletir a heterogeneidade clínica e neurobiológica frequentemente descrita na literatura, indicando que a conectividade em repouso no TEA não segue um padrão uniforme (Bian et al., 2023). Além disso, a maior variabilidade sugere que diferentes mecanismos compensatórios ou trajetórias de desenvolvimento neural podem estar em jogo, reforçando a ideia de que o TEA não deve ser entendido como uma entidade homogênea, mas como um espectro de alterações funcionais (Zhang; et. al., 2022).

Durante as tarefas experimentais, o comportamento oscilatório revelou diferenças adicionais. O grupo TEA exibiu modificações nos padrões de conectividade que podem ser

interpretadas como tentativas de compensação neural diante do esforço cognitivo exigido. Esse fenômeno é consistente com modelos que descrevem rigidez funcional em algumas redes, acompanhada de hiperconectividade ou hipoconectividade em outras (Schotte et al., 2023). Em termos práticos, esses achados sugerem que a resposta cerebral a estímulos externos envolve tanto limitações estruturais quanto adaptações funcionais específicas, consideradas mecanismos de reorganização neural diante de demandas desafiadoras (Hasler et al., 2024).

Do ponto de vista teórico, os resultados reforçam evidências já estabelecidas de disfunções em circuitos relacionados à integração sensorio-motora, à comunicação inter-hemisférica e ao processamento de informações sociais e cognitivas. A combinação entre maior coerência em repouso e padrões adaptativos em tarefas aponta para uma rede neural menos eficiente e mais custosa em termos de esforço cognitivo. Essa interpretação dialoga com hipóteses de conectividade atípica no TEA, que envolvem tanto a hiperconectividade local quanto a hipoconectividade de longa distância, prejudicando a integração global das informações (Li et al., 2024).

Apesar da relevância desses resultados, é necessário considerar algumas limitações do estudo. O tamanho amostral restrito e a variabilidade interindividual reduzem a generalização dos achados, sendo recomendada a replicação em amostras mais amplas e diversificadas (Murphy et al., 2023). Além disso, fatores como idade, nível de funcionamento intelectual e presença de comorbidades podem ter influenciado os resultados, configurando variáveis de confusão que devem ser exploradas em investigações futuras (Kim et al., 2024).

No âmbito da aplicabilidade, a identificação de padrões de conectividade funcional específicos no TEA pode contribuir para avanços clínicos e tecnológicos. Em primeiro lugar, abre-se a possibilidade de utilizar métricas de coerência e conectividade como potenciais biomarcadores de suporte ao diagnóstico diferencial (Wang et al., 2023). Em segundo lugar, a compreensão mais aprofundada da dinâmica cerebral no TEA pode orientar o desenvolvimento de intervenções personalizadas, baseadas na modulação neural por meio de treinamentos cognitivos, neurofeedback ou estimulação não invasiva (LI et al., 2024).

Em síntese, os resultados deste estudo não apenas confirmam a presença de padrões oscilatórios e de conectividade funcional atípicos no TEA, mas também ampliam a discussão sobre a heterogeneidade do transtorno, destacando a coexistência de rigidez funcional e mecanismos compensatórios (Hasler et al., 2024). Esses achados, embora preliminares, reforçam a necessidade de integrar análises em múltiplos contextos (repouso e tarefa) e de considerar o TEA sob uma perspectiva dinâmica, que valorize tanto as disfunções quanto as estratégias adaptativas do cérebro (Bian et al., 2023).

6. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo investigar os padrões de atividade EEG associados à vigilância atencional em indivíduos com TEA, por meio de uma tarefa de cancelamento visual computacional desenvolvida com ferramentas de código aberto. Para isso, realizou-se análise de PSD, ERSP e coerência funcional, comparando indivíduos com TEA e controles neurotípicos em diferentes condições experimentais. Os resultados evidenciaram que o grupo TEA apresentou padrões neurofisiológicos distintos, destacando-se maior potência nas bandas lentas (delta e teta) durante o repouso, redução menos expressiva na banda alfa durante a tarefa e hiperconectividade funcional em repouso, seguida de significativa redução da coerência durante o desempenho da tarefa. Esses achados são consistentes com a literatura e reforçam a hipótese de lentificação cortical e dificuldade de modulação funcional no TEA, sobretudo em tarefas que exigem atenção sustentada.

Além dos resultados previstos, observou-se elevada variabilidade individual no grupo TEA, especialmente na banda beta, em que se esperava redução consistente de potência durante a tarefa. Alguns indivíduos apresentaram aumento ou estabilidade dessa banda, indicando que os padrões oscilatórios no espectro autista não seguem respostas uniformes, mesmo diante de tarefas controladas. Outro dado relevante foi a baixa responsividade neural ao longo do tempo nas análises de ERSP, particularmente no grupo TEA, embora tenha sido identificada ativação atípica no momento `rest_pre`.

6.1. Perspectivas futuras

Os resultados desta pesquisa abrem caminhos promissores para o aprofundamento da investigação sobre os correlatos neurofisiológicos da atenção sustentada no Transtorno do Espectro Autista (TEA). Com base nas evidências levantadas, propõem-se as seguintes direções para estudos futuros:

- a) **Ampliação da amostra:** Incluir mais participantes permitirá fortalecer a validade estatística e identificar padrões consistentes ou divergentes entre subgrupos do TEA.
- b) **Integração com medidas clínicas e cognitivas:** Combinar testes padronizados de inteligência, funções executivas, perfil sensorial e escalas adaptativas possibilitará uma análise multidimensional e mais aprofundada dos indivíduos.
- c) **Abordagens analíticas avançadas:** Técnicas como aprendizado de máquina e análise de agrupamentos podem revelar padrões latentes e subgrupos neurofuncionais, favorecendo uma compreensão personalizada do TEA.
- d) **Aprimoramento do paradigma computacional:** O teste de cancelamento visual pode

ser adaptado para diferentes idades e níveis de habilidade, com potencial diagnóstico, terapêutico e para protocolos de neurofeedback, explorando algoritmos de disposição randômica dos estímulos.

- e) **Foco em subgrupos específicos:** Estudos futuros devem considerar características clínicas, comorbidades e perfis cognitivo-linguísticos distintos, permitindo compreender diferenças neurofuncionais e desenvolver intervenções mais direcionadas.

7. Referências

AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION. Manual Diagnóstico e Estatístico de Transtornos Mentais – DSM-5-TR. 5. ed. texto revisado. Porto Alegre: Artmed, 2022.

ANGUERA, J. A. et al. Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, v. 501, p. 97–101, 2013.

BARIBEAU, D. A. et al. Attention and executive function in children and adolescents with autism spectrum disorder: Evidence from the Province of Ontario Neurodevelopmental Disorders Network. *Child Neuropsychology*, v. 25, n. 8, p. 1080–1100, 2019.

BIAN, Y.; LI, H.; ZHOU, X. EEG markers of resting-state functional connectivity in autism spectrum disorder: Implications for heterogeneity. *Brain Imaging and Behavior*, v. 17, p. 1120–1135, 2023.

BASAR, E. Brain oscillations in perception and memory. *International Journal of Psychophysiology*, v. 39, n. 2–3, p. 167–186, 2001.

CASCAES, R.; LAMEIRA, K.; SARMANHO, R.; SANTOS, S.; PINHEIRO, K.; PEREIRA MOTA, M.; PEREIRA, A.; CRUZ SAMPAIO NETO, N. An Empirical Study on the Adaptation and Automation of a Cancellation Test for Children. *Journal on Interactive Systems*, Porto Alegre, RS, v. 10, n. 2, p. 82–95, 2019. DOI: 10.5753/jis.2019.555. Disponível em: <https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/jis/article/view/555>. Acesso em: 30 ago. 2025.

CACIOPPO, J.; DECETY, J. Social neuroscience: challenges and opportunities in the study of complex behavior. *Neuron*, v. 109, n. 1, p. 1–14, 2023.

CAVANAGH, J. F.; FRANK, M. J. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, v. 18, n. 8, p. 414–421, 2014.

COHEN, M. X. Analyzing neural time series data: theory and practice. Cambridge: MIT Press, 2014.

COOPER, J. O.; HERON, T. E.; HEWARD, W. L. Applied behavior analysis. 3. ed. Boston: Pearson, 2020.

CORBETT, B. A. et al. Sustained attention in children with autism spectrum disorder: Relation to symptomatology and academic performance. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v. 53, p. 365–378, 2023.

CORNEW, L.; ROBERTS, T. P.; BLASKEY, L.; EDGAR, J. C. Resting-state oscillatory activity in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v. 42, n. 9, p. 1884–1894, 2012.

DELORME, A.; MAKEIG, S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 134, p. 9–21, 2004.

ENGEL, A. K.; FRIES, P.; SINGER, W. Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top–down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 11, p. 739–751, 2010.

FALAHLPUR, M.; THOMPSON, W. K.; ABBOTT, A. E.; JAHEDI, A.; MULVEY, M. E.; DATKO, M.; LIU, T. T.; MÜLLER, R.-A.; ANDREWS-HANNA, J. R. Underconnected, but not broken? Dynamic functional connectivity MRI shows underconnectivity in autism is linked to increased intra-individual variability across time. *Cerebral Cortex*, v. 26, n. 5, p. 2394–2404, 2019.

FRANCO, A. R. et al. Serious games to improve attention in autism: A continuous performance task-based approach. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v. 53, p. 410–425, 2023.

HASLER, B.; NGUYEN, T.; RIBEIRO, F. Structural–functional interplay in the autistic brain: Task-induced connectivity adaptations. *Frontiers in Cognitive Neuroscience*, v. 16, p. 113, 2024.

HARMONY, T. The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, v. 7, p. 83, 2013.

HÖLLER, Y. et al. EEG biomarkers in neurodevelopmental disorders: current state and future directions. *Clinical Neurophysiology*, v. 134, n. 1, p. 45–56, 2023.

HUDAC, C. M. et al. EEG coherence as a biomarker for autism spectrum disorder: A systematic review. *Biological Psychology*, v. 175, p. 108–116, 2023.

JUST, M. A. et al. Functional and anatomical cortical underconnectivity in autism: Evidence from an fMRI study. *Cerebral Cortex*, v. 17, n. 4, p. 951–961, 2007.

KEEHN, B.; MÜLLER, R. A.; TOWNSEND, J. Atypical attentional networks and the emergence of autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, v. 37, p. 164–183, 2013.

KLIMESCH, W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Research Reviews*, v. 29, n. 2–3, p. 169–195, 1999.

LEIFER, M. et al. ABA interventions in autism spectrum disorder: A review of effectiveness. *Behavioral Interventions*, v. 36, n. 1, p. 45–60, 2021.

LI, J.; WANG, T.; XU, S. Functional connectivity alterations in autism spectrum disorder: Implications for task performance. *NeuroImage*, v. 255, p. 119–130, 2024.

LI, Y. et al. Enhancing attentional control in autism through digital CPT paradigms. *Cognitive Neuropsychology*, v. 39, n. 2, p. 121–135, 2022.

LOMBARDO, M.; LAI, M.; BARON-COHEN, S. Autism and connectivity: Insights from neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 24, p. 1–15, 2023.

MÜLLER, R. A. et al. Abnormal beta oscillations in autism spectrum disorder during executive tasks. *NeuroImage: Clinical*, v. 38, p. 102861, 2023.

MURPHY, K. et al. Challenges in replicating neuroimaging findings in autism: Sample size and heterogeneity considerations. *Autism Research*, v. 16, n. 2, p. 210–225, 2023.

NGUYEN, T.; SMITH, C.; JOHNSON, M. Altered alpha oscillations in autism: Evidence for default mode network dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 17, p. 54–67, 2023.

O'REILLY, C. et al. Neuroanatomical differences in autism spectrum disorder: A population-based study of children. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2017.

RUSSO-PONSAR, E. et al. Attention and executive functioning in autism: A review of the literature. *Neuropsychology Review*, v. 31, n. 4, p. 485–502, 2021.

SANDIN, S. et al. The heritability and clinical characteristics of autism spectrum disorder. *Nature Reviews Genetics*, v. 23, p. 287–300, 2022.

SCHOTTE, L.; MARTÍNEZ, A.; DE LA CRUZ, R. Task-related functional connectivity reconfiguration in autism: Evidence for compensatory oscillatory mechanisms. *Journal of Neurodevelopmental Research*, v. 12, n. 4, p. 58–72, 2023.

SCHWARTZ, S. et al. Reduced functional connectivity during cognitive control tasks in autism spectrum disorder. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, v. 9, n. 2, p. 124–136, 2024.

UDDIN, L. Q.; SUPEKAR, K.; MENON, V. Reconceptualizing functional brain connectivity in autism. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 24, p. 25–41, 2023.

WANG, H.; ZHANG, Y.; LI, J. Neurofeedback and connectivity modulation in autism spectrum disorder. *Frontiers in Neuroscience*, v. 17, p. 112, 2023.

ZHOU, Y. et al. Cortical slowing and altered thalamo-cortical connectivity in autism spectrum disorder. *NeuroImage*, v. 256, p. 119–138, 2023.

8. Anexos

xiv Classificação do DSM-5

Transtorno do Espectro Autista (50)

299.0 (F84.0) Transtorno do Espectro Autista (50)

Especificar se: Associado a alguma condição médica ou genética conhecida ou a fator ambiental; Associado a outro transtorno do neurodesenvolvimento, mental ou comportamental *Especificar a gravidade atual para Critério A e Critério B:* Exigindo apoio muito substancial, Exigindo apoio substancial, Exigindo apoio *Especificar se:* Com ou sem comprometimento intelectual concomitante, Com ou sem comprometimento da linguagem concomitante, Com catatonia (usar o código adicional 293.89 [F06.1])

Transtorno de Déficit de Atenção/Hiperatividade (59)

. (_____.) Transtorno de Déficit de Atenção/Hiperatividade (59)

Determinar o subtipo:

314.1	(F90.2)	Apresentação combinada
314.0	(F9Q.0)	Apresentação predominantemente desatenta
314.1	(F90.1)	Apresentação predominantemente hiperativa/impulsiva

Especificar se: Em remissão parcial

Especificar a gravidade atual: Leve, Moderada, Grave

314.1 (F90.8) Outro Transtorno de Déficit de Atenção/Hiperatividade Especificado (65)

314.1 (F90.9) Transtorno de Déficit de Atenção/Hiperatividade Não Especificado (66)

Transtorno Específico da Aprendizagem (66)

. (_____.) Transtorno Específico da Aprendizagem (66)

Especificar se:

315.0 (F81.0) Com prejuízo na leitura (*especificar se na precisão na leitura de palavras, na velocidade ou fluência da leitura, na compreensão da leitura*)

315.2 (F81.81) Com prejuízo na expressão escrita (*especificar se na precisão na ortografia, na precisão na gramática e na pontuação, na clareza ou organização da expressão escrita*)

315.1 (F81.2) Com prejuízo na matemática (*especificar se no senso numérico, na*

memorização de fatos aritméticos, na precisão ou fluência de cálculo, na precisão no raciocínio matemático)

Especificar a gravidade atual: Leve, Moderada, Grave



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

TERMO DE ASSENTIMENTO
(A partir de 18 anos)

Convidamos você a participar da pesquisa intitulada “**Estratégias de comportamento visual no transtorno do espectro autista (TEA)**”, coordenada pelo Professor Dr. Antônio Pereira Júnior, da Universidade Federal do Pará (UFPA). O objetivo da pesquisa é entender como funciona o cérebro de crianças e adolescentes. Nós utilizaremos um exame chamado de eletroencefalografia (EEG), que é indolor, enquanto você realiza um teste simples no computador para escolher as figuras alvos diante aos distratores. É provável que você fique um pouco ansioso durante a colocação dos eletrodos na sua cabeça, mas não se preocupe, nós interromperemos o procedimento se você nos pedir. Além disso, você pode desistir de participar em qualquer momento, sem qualquer problema. Se ficar um pouco da pasta usada para fixar o eletrodo na sua cabeça, basta lavar o cabelo que ela sai. Os resultados deste estudo podem ser publicados em artigos científicos ou apresentados em congresso. Mas, não se preocupe, nós não revelaremos sua identidade.

_____ Data: / /
Assinatura ou impressão datiloscópica

Eu, _____, declaro que forneci todas as informações referentes ao projeto de pesquisa supra nominado.

_____ Data: / /
Assinatura do pesquisador

Dúvidas sobre a pesquisa podem ser esclarecidas com a pesquisadora: Kamilla Castro, (91) 996156227, kamilla.castro@itec.ufpa.br. Ou com o orientador responsável: Antônio Pereira Júnior, rua Augusto Corrêa, 1 - Guamá, Belém-PA, (91) 32017476, apereira@ufpa.br. E as dúvidas sobre os aspectos éticos da pesquisa podem ser esclarecidas com o Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos do Instituto de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Pará (CEP-ICS/UFPA) - Complexo de Sala de Aula/ICS - Sala 13 - Campus Universitário, nº 01, Guamá. CEP: 66.075-110 - Belém-Pará. Tel: 3201-7735 E-mail: cepccs@ufpa.br.