



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Faculdade de Letras

Evidência neuronal de processamento morfossintático via *parsing*: um estudo de MMN

Leonardo Cabral

Rio de Janeiro
2026



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Faculdade de Letras

EVIDÊNCIA NEURONAL DE PROCESSAMENTO MORFOSSINTÁTICO VIA *PARSING*:
UM ESTUDO DE MMN

Leonardo Cabral

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Linguística da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Linguística.

Orientadora: Profa. Doutora Marije Soto

Rio de Janeiro
Março de 2026

EVIDÊNCIA NEURONAL DE PROCESSAMENTO MORFOSSINTÁTICO VIA *PARSING*:
UM ESTUDO DE MMN

Leonardo Cabral
Orientadora: Professora Doutora Marije Soto

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Linguística da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Linguística.

Examinada por:

Presidente, Profa. Doutora Marije Soto

Profa. Doutora Aniela Imbrota França – UFRJ

Profa. Doutora Juliana Novo Gomes – U.Porto

Profa. Doutora Mailce Mota – UFSC

Prof. Doutor Daniel Silva – UEMG

Profa. Doutora Marília Lott – UFRJ, suplente

Profa. Doutora Adriana Tavares Lessa – UFRRJ, suplente

Rio de Janeiro
Março de 2026

CIP - Catalogação na Publicação

C117e Cabral, Leonardo
Evidência neuronal de processamento
morfofossintático via parsing: um estudo de MMN /
Leonardo Cabral. -- Rio de Janeiro, 2026.
184 f.

Orientadora: Marije Soto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Faculdade de Letras, Programa de Pós
Graduação em Linguística, 2026.

1. Neurociência da linguagem. 2. Processamento
morfofossintático. 3. EEG. I. Soto, Marije, orient.
II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha família, imediata e estendida, que em nenhum momento da minha vida soltou minha mão quando eu mais precisei, e que eu sei que estará comigo em todas as conquistas e obstáculos. A vocês, meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Como a pessoa emocionada que eu sempre fui, esta parte da tese talvez seja a mais trabalhosa de escrever e pensar sobre. Eu fui abençoado na vida com muitas pessoas que me amam, que me apoiam e que contribuíram, todas, para eu chegar aonde cheguei. Caso eu tenha deixado algum nome de fora, não é por falta do sentimento pela pessoa ou por sua importância, e sim pelos neurônios que, a essa altura, já não colaboram tanto. “Te faltam sinapses!”, o EEG provavelmente o diria.

Começarei pela minha mãe, Audrey Cabral, e pelo meu pai, Luciano Gouvinhas (não poderia ser diferente). Mãe, você é tudo na minha vida, meu motivo para ser meu melhor. Você é luz, é meu Norte, meu exemplo do que existe de melhor na humanidade. Seu trecho é curto, mas não por falta do que dizer, e sim pelo excesso. Meu maior presente é você, e obrigado por ter transmitido a mim o dom do estudo e do desejo pelo conhecimento, sem os quais eu não poderia ser cientista.

E pai, com todas as diferenças entre nós, eu sei o quanto você sacrificou na sua vida para que eu sempre tivesse o melhor. Graças a isso tive conquistas tão importantes. Mas obrigado também por me transmitir os valores de dedicação, comprometimento e responsabilidade que me acompanharam em todo o meu percurso acadêmico e garantiram qualidade do meu trabalho.

Pulo temporariamente o resto da minha família – a quem amo muito, a ponto de tê-los no coração ao decidir pela dedicatória – pois há primeiras menções ainda que merecem alguns destaques, estando no cerne da minha existência acadêmica.

Marije Soto, esse não é o nome de uma orientadora. É o nome de uma mulher inteligente, sagaz e, acima de tudo, humana. Eu creio firmemente que, com outra orientadora, não teria sido capaz de chegar aqui. Pelo carinho e pela empatia nos momentos difíceis, mas também pelo encorajamento constante quando o mundo parecia tentar me restringir. Para com você, tenho uma grande dívida.

Aniela Improta França, sustento que deveria haver uma função oficial de “inspirientadora”. Tal qual Marije, você via minha fogueira e tacava gasolina: nunca me constrangeu a pensar algo, e sempre me incentivou a pensar e questionar o que eu desejasse (sempre me dando o trabalho de me defender, claro, para meu prazer!). Sua capacidade de fazer da adversidade um detalhe (e ainda crescer imensamente em terreno pouco fértil!), de criar otimismo onde imperam os obstáculos, me deu forças quando elas me faltaram, por isso sou grato.

Claudia Rebello, sei nem onde começo. Eu era o professor de inglês na graduação da Rural que inventou de estudar “dados de cérebro na neurolinguística”, uma área da qual ninguém lá falava, e você foi lá e profetizou: assim o fará! E assim o fiz! Uma das coisas mais inesperadas que consegui daquela graduação foi uma das minhas melhores amigas, uma docente da instituição que atendeu a ligação de um aluno às 10 da noite (*give or take*) e ficou com ele por duas horas e meia no telefone, até o surto passar. Isso sem nem mesmo ser minha orientadora! O mais engraçado é que a aproximação ocorreu sem eu saber que estava encontrando alguém que se alinhava a mim enquanto pessoa e enquanto professora. Só poderia ter dado certo. Cá estamos, quase dez anos depois, tendo compartilhado gargalhadas e lágrimas e gargalhadas e gargalhadas, às vezes com um drink na mão, às vezes com um rockzinho tocando de fundo.

Adriana Lessa, a rainha de cabelos loiros que roubou meu coração acadêmico de uma certa outra área de estudo (obrigado por isso, diga-se de passagem!). Academicamente e pessoalmente encantadora, eu senti nossa afinidade intelectual já na primeira aula, na disciplina de Inglês II. Me introduziu ao prazer da Linguística e ao prazer em pesquisar linguística. Desde que me conheceu, me viu em diferentes fases (cada uma caracterizada por um surto diferente) e mesmo assim continuou em minha vida. E espero que continue, sua presença faz toda a diferença.

Escrevo agora sobre o professor que me introduziu no meio científico, com a minha primeira bolsa de iniciação científica: professor Marcos José de Araújo Caldas. Nosso contato agora é pouco, mas preciso que ele saiba o quão importante é nisso tudo. Me ensinou a dar os primeiros passos enquanto pesquisador. Me mostrou a diferença entre saber e sabedoria. Foi – e ainda é – meu exemplo de pesquisador, e um dos meus exemplos de pessoa: extremamente dedicado ao conhecimento, extremamente conhecedor, sem perder o senso de humildade e humanidade.

Para finalizar esta parte, deixo meus agradecimentos aos demais membros da banca examinadora ainda não mencionados. Professores Juliana Gomes, Mailce Mota, Daniel Silva e Marília Lott, tenho um imenso respeito pelo trabalho de todos vocês. Todos que foram convidados tiveram, em algum momento, um grande impacto em minha formação e no desenvolvimento da minha pesquisa, por isso sou muito honrado por estarem em minha banca.

Prossigo com outros agradecimentos às pessoas que vieram comigo e tem tanto mérito quanto eu pelo meu trabalho.

Meu amirmão, Diogo Coutinho. Quando eu penso em “por quem fazer as coisas”, é ele que me vem à mente. É ele para quem mais quero contar tudo, com quem mais quero

compartilhar tudo. Não consigo visualizar uma vida sem você, sem a gente falando de tecnologia, sem a gente rindo de Todo Mundo em Pânico e sem a gente jogando Mario no Super Nintendo. Poder reclamar da vida e dos outros ao seu lado é uma honra e um privilégio!

Minha cara família. Começo pelo meu irmão, Serginho, em quem penso todo dia, pois quero ser o melhor exemplo possível para ele, a quem amo muito. Meus avós paternos, Isbelda e Aparício, e meus avós maternos, José de Andrade e Lizete, cujo amor eu sinto comigo todos os dias. Meus muitos primos: pelo lado do meu pai, Mariana, Guilherme, José Victor, Ana Clara, Virgínia, Marquinhos, Mario, Beatriz, Ana Luíza, Lara, Matheus, Tatiana, Felipe, César, João Victor; pelo lado da minha mãe, Nathalia, Maria Clara, Giovanni, Isabela, Rafael e Ana Paula. Eu me gabo sempre de ter, em meus primos, meus maiores amigos. Um adendo, também tenho as melhores primunhadas e primunhados: Laura, Débora, Kel, Rennan, Filipe e Stefany, vocês são parte importante do que há de tão bom na minha vida. Minhas muitas tias e tios: pelo lado paterno, tia Emília (sempre em meus pensamentos), tia Rosa, tio Zeca, tia Rachel, tio Fabinho, tio Alexandre, tia Sara, tia Ana Emília, tia Luciana, tio Rubens, tia Patrícia, tia Andrea, tia Sheila, tio Sérgio e tio Vitinho; pelo lado materno, tia Andrea (com quem sou tão parecido, e de quem sou tão diferente), tia Sandrinha, tio Andradinho, tio Marcello, tia Lourdes, obrigado por serem essa presença tão positiva na minha vida, desde que sou criança me ajudando a ser melhor e a ser feliz. Meus sobrinhos queridos: Malu, Clarinha, Serena, Luna, Nina, Maitê, Elisah e Nuno, vocês aquecem o coração do tio!

Não poderia deixar de enfatizar meus agradecimentos a uma certa tia, irmã do meu pai: tia Adriana. Você é uma coisa que ninguém pode negar ou questionar: guerreira, e com isso aprendo muito com você. O que eu faria da minha vida sem você nela? Te amo, obrigado por estar junto comigo no pior e no melhor.

Há outras duas pessoas que, por muitos anos, foram família sem laços de sangue, mas que estiveram comigo em muitos momentos cruciais: Adriana, minha madrastra, e minha irmã, Maria Eduarda. A vida não é perfeita, mas vocês duas ajudaram a deixá-la melhor em muitos momentos dos últimos 10 anos desse meu percurso acadêmico. Obrigado por tudo.

Por mais repetitivo que possa soar, tem três nomes que não poderiam faltar nestes agradecimentos, e que foram meus pilares de sustentação em muitos momentos e permitiram que eu me tornasse alguém de quem eu posso me orgulhar. Marcelle Dinis Castro, Daniela Feijó e, mais recentemente, Grace Aragão. Suas contribuições são inestimáveis, sou incrivelmente sortudo de ter tido vocês nesse percurso. Graças a vocês, o que tenho de melhor está tão mais à mostra, tão mais na superfície. Se todos tivessem uma Marcelle, uma Daniela e uma Grace em suas vidas, o mundo certamente seria um lugar melhor. Obrigado.

Se alguém ainda tem dúvidas se de fato sou tão mais abençoado do que a média das pessoas, mesmo já tendo visto quanta gente fantástica eu tenho ao meu redor, saiba que não acabou: nem falei dos meus amigos. Mariana e Matheus Chuff, sempre tão companheiros, que sorte a minha! Thais e Salvador, o melhor que tirei da minha adolescência. Paulo, Yudy e Giovanna, os presentes que ganhei de São Paulo. Jéssica Tostes, a vida não ajuda para termos uma vivência mais próxima, mas você sempre foi fundamental. Roberta, Lorena, Ana Clara e Thamires, quatro pessoas que mostram que o benefício de dar aulas não é apenas o salário, mas as pessoas que você conhece no caminho. Lili, minha amiga dos tempos de Ciência da Computação que eu vejo de anos em anos e que, sempre que aparece, me traz um grande sorriso ao rosto.

Aproveito para engatar os agradecimentos a quem, possivelmente, deveriam ter sido os primeiros: meus colegas de laboratório e da pós! Não tem a mínima graça um mestrado ou doutorado que não tenha sido cursado com colegas tão incríveis. Diane, Wellington Almeida, Pedro, Larissa Pessoa, Renata, Ana Letícia, Stefanie, Maria, Laryssa, Lara, Mayda, Julia Cataldo, Emily, Isadora, Matheus Alves, Jean Gomes, Mayara, Julia Pimenta, Flora, Gustavo, Olívia, Larissa Lilge, Moíra, Eliandra, Fernanda Machado, Iuri Sizo, Bernardo e quem mais eu tiver esquecido, mas que está comigo em sentimento (me deem uma folga, já que eu estou em final de doutorado!). Obrigado pelo companheirismo e carinho em ao longo desses 6 anos de pós, pelas risadas no laboratório, pelas longas discussões teóricas via Whatsapp (hein, Pedro e Matheus) e, acima de tudo, por não terem me agredido após minhas, digamos, participações excessivamente entusiasmadas e incessantes nas aulas e reuniões de laboratório.

Fecho os agradecimentos com mais três parágrafos enormes, que não poderiam faltar. Nada somos sem nossos professores. E eu tive muitos, mas muitos que me impactaram e fizeram da minha formação algo de que tenho orgulho. Graças a vocês me torno doutor em Linguística. A começar pelos tempos de escola: tia Valéria, minha primeira grande professora, a quem todos amavam (e com motivos); tia Edna, que me remete a imagem de uma professora que tem carinho por o que faz sempre que penso nela; Élica Rios, minha querida *teacher* do Brasas e uma das razões pelas quais eu me apaixonei pelo ensino de inglês (e, logo, causa importante de eu ter ido fazer Letras!); Ana Christina, uma outra grande influência para eu amar as aulas de inglês; Deborah Moraes, que quando entrava na sala de aula fazia dezenas de alunos gritarem desesperadamente de alegria (e eu no meio!); Sergio Trajano, Norma, Morel, Marcio Azevedo e Henrique Gaio, assim como os queridos Elson e Chiquinho (ambos, agora, luz para o universo).

Quanto ao início da minha formação acadêmica, sigo a cronologia. Sou grato aos professores de Ciência da Computação que me deram uma excelente introdução ao meio acadêmico, e que seguem como exemplos de excelência: Paula Takatsuka, Adria Lyra e Leandro Alvim. Um agradecimento especial cabe ao professor Leandro, que não largou de mim mesmo após eu migrar de área, com quem ainda aprendo bastante e espero poder continuar a aprender! Já referente à época em que cursei História (outro curso do qual evadi), deixo registrado meu agradecimento às professoras Mônica Martins e Flávia Naethe, ambas que deixaram marcas positivas em minha trajetória. Quanto aos professores de Letras da Rural, responsáveis pela minha formação inicial na área, registro meus agradecimentos aos professores Claudia Barbieri, João Carlos Lopes, Elisa Abrantes, Simone Batista, Anderson Gomes, Roza Palomanes, Angela Bravin, Gerson Rodrigues, Maria das Graças Salgado, Mikaela Roberto, Marli Pereira, Roberto Bozzetti, Luiza Alves, Marcos Pasche, Wagner Costa, Alex e Mario. Tem muito de vocês no professor e no linguista que hoje sou.

Encerro estes agradecimentos com os professores que tanto me influenciam enquanto pesquisador em Linguística (e, em parte, em ensino de línguas, algo que sempre fará parte de mim). Professores Adriana Leitão Martins (obrigado por me aguentar e não se esconder de mim na faculdade!), Daniela Garcia, Aléria Lage, Isabela Pederneira, Marcus Maia, Alessandro Boechat, Gean Damulakis, Diogo Pinheiro, Thiago Sampaio, Marcio Leitão, Gustavo Estivalet, Ana Calindro, Marcello, Cíntia Rabello (UFF) e Paula Tavares (UNESP). Toda minha experiência nestes anos de pós-graduação foi diferenciada, de uma excelência que não há como medir, e isso é graças a vocês.

RESUMO

Esta tese objetivou responder à pergunta sobre a forma como representamos o conhecimento morfossintático e como o processamos. Para tal, realizamos um experimento de extração de potenciais cerebrais relacionados a eventos em que os participantes simultaneamente assistiram a uma série mutada e escutaram sintagmas que variaram em gramaticalidade e podiam ocorrer como estímulo “padrão” (repetição mais frequente) ou “desviante” (repetição rara). Este paradigma, conhecido como *multifeature*, é reconhecido por eliciar a resposta eletrofisiológica *mismatch negativity* (“negatividade por incompatibilidade”), reconhecida por ser automática e relativamente independente de atenção. Ela ocorre quando há detecção de um desvio de uma regularidade formada na memória sobre os estímulos repetidos. Quando modulável por fatores sintáticos, o efeito é conhecido como *syntactic MMN*. Os sintagmas neste experimento se encaixavam na condição “gramatical” (“eu adoto”), “1 violação” (“eu *adota”, violação de concordância de pessoa) ou “2 violações” (“eu *adotam”, violação de concordância de número e pessoa). A hipótese foi que, caso o processamento ocorresse via segmentação dos sintagmas, acesso aos traços morfossintáticos e combinação, então o MMN seria maior na condição “2 violações” do que na condição “1 violação”, refletindo maior custo de processamento. Os achados apontam para um efeito de amplitude negativa direto, cumulativo, sustentado e automático de processamento morfossintático, ainda que um efeito de MMN possa fazer parte das respostas encontradas. Assim, contribuímos para o debate sobre a natureza da linguagem quanto a sua representação e processamento pelo cérebro ao indicar que possuímos conhecimento morfossintático abstrato, empregado no curso da computação, e que o processamento da compreensão envolve *parsing* e mecanismos combinatórios.

Palavras-chave: processamento morfossintático; parsing; ERP.

ABSTRACT

This dissertation aimed to answer the question of how we represent morphosyntactic knowledge and how we process it. To this end, we conducted an experiment of event-related brain potentials extraction in which participants simultaneously watched a muted series and listened to phrases that varied in grammaticality and could occur as either a “standard” stimulus (more frequent repetition) or a “deviant” stimulus (rare repetition). This paradigm, known as the multifeature paradigm, is recognized for eliciting the electrophysiological response called mismatch negativity (MMN), which is known to be automatic and relatively independent of attention. The MMN occurs when a deviation from a regularity formed in memory about repeated stimuli is detected. When modulated by syntactic factors, this effect is known as syntactic MMN. The phrases in this experiment fit into the following conditions: “grammatical” (“I adopt.1p.sg”), “1 violation” (“I *adopt.2p.sg”, a person agreement violation), or “2 violations” (“I *adopt.2p.pl”, a violation of both number and person agreement). The hypothesis was that, if processing occurred via parsing of the phrases, access to morphosyntactic features and their combination, then the MMN would be larger in the “2 violations” condition than in the “1 violation” condition, reflecting a higher processing cost. The findings point to a negative amplitude effect that is a direct, cumulative, sustained and automatic effect of morphosyntactic processing, even though an MMN effect cannot be entirely ruled out. Thus, we contribute to the debate on the nature of language with respect to its representation and processing by the brain by indicating that we possess abstract morphosyntactic knowledge, employed in the course of computation, and that comprehension processing involves parsing and combinatorial mechanisms.

Keywords: morphosyntactic processing; parsing; ERP.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	17
Capítulo 2 – Segmentação, combinatorialidade e modelos de processamento.....	25
2.1 – Combinatorialidade, composicionalidade, segmentação e concatenação	26
2.2 Modelos de processamento de linguagem compatíveis com combinatorialidade ...	29
2.2.1 Modelo declarativo/procedural de Ullman	29
2.2.1 Modelo MUC de Hagoort	30
2.2.3 Modelo ventral-dorsal de Hickok e Poeppel (2007) e o modelo de organização cortical de Matchin e Hickok (2020)	31
2.2.4 Modelo de Friederici	32
2.2.5 Modelo de rede combinatória (Pylkkänen)	33
2.2.6 Modelo de Fedorenko, Ivanova e Regev (2024)	35
2.2.7 Modelo ROSE para sintaxe	37
2.2.8 Combinatorialidade nos modelos até aqui	38
2.3 Hipótese e alternativas ao processamento combinatório	38
2.4 Combinatorialidade nos modelos de processamento	41
Capítulo 3 – Eletrofisiologia do processamento de linguagem.....	43
3.1 EEG e ERPs.....	43
3.2 ERPs “linguísticos”	47
3.2.1 ELAN	47
3.2.2 LAN	51
3.2.3 N400	54
3.2.4 P600	58
3.3 Mismatch negativity (MMN)	64
3.3.1 Origem e aspectos característicos	64
3.3.2 Aspectos metodológicos de eliciação do MMN	68
3.3.3 MMN: tarefas distratoras adotáveis e impacto no componente	72
3.3.4 MMN: automaticidade e interpretações funcionais	73
3.3.5 MMN e fonologia	75
3.3.6 MMN e semântica	75
3.3.7 MMN “lexical” ou de “armazenamento de forma plena”	77
3.3.8 MMN “sintático” ou “combinatório”	79
3.3.9 MMNs “linguísticos” e suas topografias e fontes	82
3.3.10 Algumas conclusões sobre o MMN e linguagem.....	88
Capítulo 4 – Metodologia.....	90
4.1 Hipótese e expectativas.....	91
4.2 Estímulos e gravação	92
4.3 Desenho experimental.....	95
4.4 Participantes.....	97
4.5 Procedimentos.....	97
4.6 Gravação de dados de EEG	98
4.6 Processamento de dados	99
4.7 Análise dos dados	99

4.8 Protocolo estatístico	101
4.9 Percurso do preparo do experimento: testes piloto e modificações.....	101
<i>Capítulo 5 – Resultados</i>	<i>107</i>
5.1 Mismatch Negativity	107
5.1.1 Mismatch Negativity clássico – blocos 1 e 2, estímulo gramatical padrão	107
5.1.2 Mismatch Negativity clássico – blocos 3 e 4, estímulo “1 violação” padrão	112
5.1.3 MMN de identidade – condição “gramatical”	119
5.1.4 MMN de identidade – estímulo “1 violação”	124
5.2 Gramaticalidade	131
<i>Capítulo 6 - Discussão</i>	<i>154</i>
<i>Capítulo 7 - Conclusão</i>	<i>166</i>
<i>Referências</i>	<i>168</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- a estrutura de um neurônio	44
Figura 2 - eletroencefalograma	44
Figura 3 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do ELAN.	48
Figura 4 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do LAN.	51
Figura 5 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do N400.....	54
Figura 6 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do P600.....	58
Figura 7 - exemplo ilustrativo de paradigma experimental em estudo de MMN. Primeiro, há formação (não atencional) de uma regularidade pelo participante (a repetição do estímulo “BA”) que é interrompida por estímulos raros que desviam do regular ("BU")	65
Figura 8 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do MMN.	66
Figura 9 - screenshot do oscilograma do splicing dos estímulos auditivos no Praat.	94
Figura 10 – ilustração de reprodução dos estímulos no primeiro bloco e ordem dos sub-blocos.....	96
Figura 11 - distribuição de eletrodos por região topográfica.....	100
Figura 12 - gráfico de ERPs referentes à comparação clássica do MMN na região de interesse fronto-central, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.	108
Figura 13 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 1, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.	109
Figura 14 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 2, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.	110
Figura 15 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 3, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.	111
Figura 16 – gráfico de ERPs referentes à comparação clássica do MMN na região de interesse fronto-central, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.	113
Figura 17 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 1, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.....	114
Figura 18 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 2, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.....	115
Figura 19– gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 3, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.....	116
Figura 20 - gráficos de ERP da comparação clássica do efeito de MMN nos blocos 1 e 2 ("gramatical" padrão) e nos blocos 3 e 4 ("1 violação" desviante).	118
Figura 21 – gráfico de ERP referente à análise do MMN de identidade “gramatical” na região de interesse fronto-central.....	120
Figura 22– gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 1.	121
Figura 23 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 2.....	122
Figura 24 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 3.....	123
Figura 25 – gráfico de ERP referente à análise do MMN de identidade “1 violação” na região de interesse fronto-central.....	125

Figura 26 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 1.	126
Figura 27 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 2.	127
Figura 28 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 3.	128
Figura 29 – comparação de MMNs de identidade "gramatical" e "1 violação".	130
Figura 30 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 1.	132
Figura 31 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 2.	137
Figura 32 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 3.	142
Figura 33 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “1 violação” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “gramatical” desviante (blocos 3 e 4).	148
Figura 34 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “2 violações” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “gramatical” desviante (blocos 3 e 4).	149
Figura 35 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “2 violações” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “1 violação” desviante (blocos 1 e 2).	149
Figura 36 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “anterior esquerda”.	150
Figura 37 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “anterior direita”.	151
Figura 38 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “fronto-central”.	151
Figura 39 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “posterior esquerda”.	152
Figura 40 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “posterior direita”.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - estímulos por condição	92
Tabela 2 - desenho experimental e quantidade de estímulos por condição	95
Tabela 3 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “anterior esquerda”.....	133
Tabela 4 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “anterior esquerda”.....	134
Tabela 5 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “fronto-central”.....	135
Tabela 6 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “posterior esquerda”.	135
Tabela 7 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “posterior direita”.	136
Tabela 8 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “anterior esquerda”.	138
Tabela 9 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “anterior direita”.....	138
Tabela 10 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “fronto-central”.	139
Tabela 11 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “posterior esquerda”.....	140
Tabela 12 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “posterior direita”.	140
Tabela 13 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “anterior esquerda”.....	143
Tabela 14 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “anterior direita”.	143
Tabela 15 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “fronto-central”.	144
Tabela 16 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “posterior esquerda”.	145
Tabela 17 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “posterior esquerda”.	145

Capítulo 1 – Introdução

“All we have to decide is what to do with the time that is given us”

Gandalf, O Cinzento

Esta pesquisa visa contribuir, através de um experimento de extração de potenciais cerebrais, para um debate sobre a linguagem que se estende há anos, com muitas perspectivas e dados que dialogam com muitos lados: sobre o processamento morfossintático de sentenças. Do que precisamos em termos de conhecimento linguístico e processos cognitivos para compreender uma sentença como “Os pesquisadores publicaram um artigo interessante”? Podemos recorrer a estratégias para processar o significado da frase, como será discutido no capítulo 2, mas o embate se dá na existência de mecanismos (morfo)sintáticos combinatórios no curso da compreensão.

A perspectiva da qual tratamos, resumidamente, defende que em algum momento, em algum grau, o cérebro quebra o fluxo da fala em blocos mínimos dotados de significância e combina eles para formar um objeto estruturado mentalmente. Ou seja, na sentença dada como exemplo, envolve reconhecer as palavras e morfemas e como elas se relacionam em termos de dependência estrutural. Há um sujeito ([os pesquisadores]), um verbo e um objeto ([publicaram [um artigo interessante]]), dentro do objeto há um sintagma nominal com um modificador ([artigo interessante]), há relação de concordância entre sujeito e verbo, com presença de afixos que indicam propriedades morfossintáticas (“o.s pesquisador.e.s publicar.a.m”) e entre substantivo e modificador no objeto SN (“artigo interessante”, ambos no singular). Tudo isso perpassa um processo de segmentação e combinação de elementos na sentença que pressupõem um conhecimento gramatical o qual dá base ao processo. Em âmbito de representação do conhecimento, esta visão seria compatível com a ideia de que concatenamos elementos para formarmos estruturas hierarquizadas (Chomsky, 1995). Em termos de processamento, seria compatível com a ideia de que, no curso da compreensão, construímos estruturas (Friederici, 2002) e compomos¹ sintagmas e significados com operações básicas (Pylkkänen, 2019).

¹ Como será debatido no capítulo 2, artigos de processamento de linguagem, em especial de neurolinguística, intercalam o uso dos termos “concatenação”, “composição” e “combinação” referindo-se aparentemente ao mesmo processo, de “juntar” elementos menores (no caso de semântica, por exemplo, dois conceitos, como “barco” + “vermelho” para resultar no significado de “barco vermelho”) (cf. seção 2.1).

Na literatura, não há uma lacuna *per se*. Há uma quantidade considerável de dados de experimentos neuronais apontam para processamento combinatório da linguagem guiado por processos morfossintáticos (Pulvermüller; Shtyrov, 2003; Pulvermüller; Assadollahi, 2007; Molinaro; Barber; Carreiras, 2011; Caffarra *et al.*, 2015; Leminen *et al.*, 2016; Hanna *et al.*, 2016). A questão central é contribuir para uma ou outra perspectiva com dados novos, já que (i) a visão de combinatorialidade linguística não é consensual e (ii) grande parte dos dados são correlacionais.

Sobre o ponto (i), propostas probabilísticas, por exemplo, apontam para um processamento que tem por base um processo de reconhecimento que emerge de estatísticas feitas pelo cérebro sobre a linguagem (Chater; Manning, 2006), com menor ou nenhuma relevância de conhecimento ou processamento linguístico abstrato. Ainda, dentro da linguística, uma das visões contrárias à combinatorialidade seria a ideia de que, em nossa memória declarativa, já temos pares de forma e significado mesmo a nível sintagmático chamados de construções (Goldberg, 1995), e a combinação, caso ocorra, se daria entre construções.

Quanto ao ponto (ii), dados correlacionais (*i.e.*, não causais) como aqueles obtidos por técnicas de registro de dados eletrofisiológicos requerem replicação de achados já reportados, já que não são medidas diretas de processos cognitivos (*i.e.*, correlacionam-se processos esperados pelo desenho experimental com respostas neuronais obtidas), o que permite uma associação mais robusta entre os dados e os processos. Ademais, estes mesmos dados estão sob constante escrutínio, com questionamentos sobre a causa dos dados ser, de fato, aquela apontada pela hipótese dos estudos. Por exemplo, efeitos em experimentos com dependência de longa distância (*e.g.*, relação de concordância entre sujeito no plural e verbo na sentença “*The boys who saw the girl like ice-cream*”, “os garotos que viram a garota gostam de sorvete”, tradução própria) associados a uma proposta combinatória podem vir a ser explicados, também, por processamento de mecanismo geral como modelos conexionistas de aprendizagem e processamento probabilístico (Joanisse; McClelland, 2015). É problemático evitar explicações não mutuamente excludentes, inclusive, porque processos cognitivos subjacentes são difíceis de dissociar experimentalmente, dessa forma, colocando em dúvida se ambas ‘existem’. Por exemplo, dados de experimentos neuronais que apontam para efeitos sintáticos na modulação de atividade neuronal podem estar misturados a efeitos semânticos, o que torna as evidências menos confiáveis enquanto confirmação de processos sintáticos enquanto realidade psicológica (Pykkänen, 2019). Ou seja, a “lacuna” que se visa preencher diz respeito à replicação de dados

que permitam contribuir para a discussão ainda em aberto sobre como processamos a linguagem e se processamos por mecanismos morfossintáticos combinatoriais.

Um exemplo de problema envolvendo a mistura de efeitos sintáticos e semânticos é o do experimento de Barber e Carreiras (2005). No teste, os autores contrastaram sintagmas gramaticais como “*el piano*” (“o piano”) com sintagmas com violação de concordância de gênero (“*la *piano*”, “*a *piano*”) ou de número (“*los *piano*”, “*os *piano*”). Violações de gênero e número envolvem propriedades gramaticais que têm impacto no significado em decorrência da sobreposição de informações semânticas expressas pelas informações morfossintáticas, de forma que se torna difícil isolar os efeitos sintáticos de efeitos semânticos. Infelizmente, este é um fator que não foi viável isolar em nosso experimento, de forma que recorremos aos padrões de respostas neuronais para avaliar se efeitos encontrados eram associáveis a achados prévios de processamento semântico ou morfossintático, o que não é o ideal, mas é o que foi possível neste momento.

A técnica escolhida para investigação é de extração de potenciais cerebrais relacionados a evento (*event-related brain potentials*, ERPs), através de um equipamento chamado eletroencefalograma (EEG). Como será detalhado no capítulo 3, o EEG permite a captura de sinais elétricos do cérebro com altíssima precisão temporal, permitindo medição de atividade cortical na escala de milissegundos (Luck, 2014). Esta atividade, por sua vez, é associada a processos cognitivos específicos por meio de geração de uma média de respostas sincronizadas com o momento de iniciação da exibição de estímulos de interesse. Há potenciais relacionados a vários tipos de processos cognitivos, dentre os quais alguns são ligados especificamente à linguagem, como o LAN (*left anterior negativity*, Caffarra; Mendoza; Davidson, 2019), modulável por questões morfossintáticas e de memória de trabalho, e também o N400 (Kutas; Hillyard, 1980; Kutas; Federmeier, 2011), sensível a processos lexicais e semânticos (cf. cap. 3 para detalhamento sobre os ERPs).

Como o objetivo principal da neurociência cognitiva da linguagem é compreender e investigar os aspectos da linguagem enquanto cognição e enquanto uma faculdade mental, é importante que os potenciais cerebrais escolhidos para investigar a linguagem reflitam essa natureza. E essa natureza é essencialmente automática, reflexa, em oposição com conhecimento metalinguístico, consciente. O *mismatch negativity* (MMN, “negatividade por incompatibilidade”) é, assim, o ERP em foco em nossa tese: um componente que reflete processos justamente com esta característica, automática, por ser considerado temporalmente precoce e, em certo grau, independente de atenção do participante. O MMN é uma resposta neuronal que surge no paradigma experimental de *oddball*, quando há quebra de padrão em

uma sequência de estímulos enquanto o participante está com sua atenção direcionada a outra tarefa (Näätänen *et al.*, 2007). Ou seja, no paradigma de *oddball*, um estímulo é repetido diversas vezes até formar um traço de memória que representa a regularidade reconhecida (*e.g.*, a repetição da sílaba /ba/). Em proporção menor de vezes, um estímulo que desvia deste padrão é apresentado (*e.g.*, a ocorrência rara da sílaba /bu/ em meio a repetições mais frequentes da sílaba /ba/). O MMN é sensível a variações acústicas como de duração, intensidade e frequência em estímulos auditivos, como tons (*ex.*: um som de “bip”). Apesar de ser muito associado a questões de propriedade física do estímulo, o MMN também é modulável por processos linguísticos, considerados de ordem maior. Como o MMN é modulável por manipulações morfofossintáticas nos estímulos (Pulvermüller; Shtyrov, 2006), ele é um ótimo parâmetro para investigações sobre o processamento (morfo)sintático enquanto uma capacidade automática do falante: neste caso, fala-se de um sMMN, ou seja, um MMN “sintático”.

Um exemplo clássico de MMN “sintático” é o que ocorre quando os estímulos apresentam uma violação de concordância de número. Pulvermüller e Shtyrov (2003) compararam os verbos “*come*” (“venho”) e “*comes*” (“vem”) em contexto sintagmático (“*we.2p.pl come*”, “nós vimos” e “*we *comes*”, “nós *vem”, tradução adaptada própria) com a ocorrência dos verbos sem pronome (*i.e.*, sem contexto). O pico de MMN foi maior quando o estímulo estava em contexto sintagmático “*we *comes*”, logo, apresentando agramaticalidade. Isto leva os autores a considerarem o efeito de MMN como ampliado por uma violação de expectativa com base nos traços morfofossintáticos dos estímulos, o que pressupõe algum nível de processamento por *parsing* em unidades morfológicas.

No entanto, um *confound* neste tipo de teste é que verbos que não concordam com seu sujeito também não seguem o padrão estatístico da língua: ou seja, o estímulo viola tanto a gramaticalidade quanto a probabilidade. Logo, a resposta morfofossintática pode ser, na realidade, de natureza probabilística, já que sintagmas com violação gramatical seriam de frequência expressivamente menor ou até zero. Neste caso, a resposta de MMN seria apenas uma resposta a uma violação de expectativa por violação a um padrão probabilístico da língua.

Uma proposta de Brunelliére e Frauenfelder (2010) para testar a influência de traços morfofossintáticos no processamento é incluir estímulos que variam na quantidade de violações. Por exemplo, no experimento de 2007, havia estímulos com violação de concordância de pessoa (*ex.*: “*nous *viv-ez (2p.Pl)*”, “nós *viveis”), enquanto no experimento de 2010 havia estímulos com violação de concordância de número e de pessoa (*ex.*: “*nous *vivr-as (2p.Sg)*”, “nós *viverás”). Os autores raciocinaram que, caso o MMN seja, de fato, sensível ao processamento de natureza morfofossintática, então a expectativa é de que a violação de maior

número de traços morfossintáticos no estudo de 2010 leve a uma resposta neuronal mais forte do que haviam reportado no estudo de 2007, em que a condição agramatical apresentava violação de apenas um traço morfossintático. As autoras não encontraram qualquer efeito de MMN. Mesmo o efeito tradicional em decorrência de quebra de padrão não foi reportado. Mas como uma série de fatores pode influenciar os resultados de um experimento (equipamento, ruído, estímulos escolhidos, desenho experimental, protocolo de análise estatística, dentre outros), a proposta das autoras não deixa de ser relevante para a testagem da hipótese de que processamos linguagem com base em processos sintáticos abstratos e de que o MMN seja sensível a estes processos. Em outras palavras, não necessariamente a ausência de evidência se deve à inexistência do processo ou efeito, e sim em decorrência de questões técnicas ou metodológicas, de forma que se o resultado é replicado em outros experimentos, então o reflexo automático de *parsing* morfossintático torna-se menos provável. Alternativamente, a replicação do experimento pode resultar em efeitos significativos correlacionados ao processo investigado.

Assim, este experimento visou testar, com estímulos em português brasileiro, a hipótese de que realizamos processamento morfossintático combinatório da linguagem, que se reflete em uma modulação do MMN que carrega o nome de “MMN sintático”. Se o efeito de MMN fosse mais forte quanto mais traços morfossintáticos apresentarem violação, confirmar-se-ia a hipótese. Empregamos verbos de baixa frequência, de forma que os sintagmas envolvem o pronome de primeira pessoa do singular “eu” seguido por flexões dos verbos “adotar”. Uma das razões para verificar a frequência é seu suposto impacto na forma como uma palavra é representada na memória: há propostas de que as palavras são segmentadas em morfema sempre (Stockall; Marantz, 2006), são segmentadas quando são de baixa frequência (Schreuder; Baayen, 1995; Leminen *et al.*, 2013) ou não são segmentadas (Butterworth, 1983; Bybee, 1995). E como efeitos de lexicalidade modulam também o MMN (*e.g.*, Leminen *et al.*, 2013; Hanna *et al.*, 2017), decidiu-se por manter constante a frequência dos estímulos para controlar potenciais efeitos de frequência que venham a afetar ou mesmo mascarar o efeito sintático. A escolha deste verbo específico (“adotar”) deve-se ao fato de que todas as suas flexões escolhidas estão na mesma faixa de frequência e todas compõem pares mínimos com as flexões de um verbo de alta frequência (“adorar”), o qual pretendemos testar em um experimento futuro. A opção de iniciar pelo verbo de baixa frequência deve-se a não haver contradição em boa parte dos modelos sobre sua segmentabilidade, o que favorece também que um possível efeito lexical na resposta MMN não seja um problema.

A principal variável independente do experimento foi a de “gramaticalidade”. Esta variável corresponde à gramaticalidade do sintagma em termos de concordância entre verbo e pronome, sendo as condições de sintagma “gramatical” (“eu adoto”), “1 violação” (“eu *adota”, violação de concordância de pessoa) e “2 violações” (“eu *adotam”, violação combinada de concordância de número e de pessoa). Nos dois primeiros blocos, o estímulo “gramatical” ocorreu como o “padrão”, enquanto os estímulos nos dois últimos blocos o estímulo da condição “1 violação” ocorreu como padrão. Em um contraste por gramaticalidade apenas, comparando estímulos que ocorreram em contexto de “desviantes” (“1 violação” nos blocos 1 e 2, “2 violações” nos blocos 1 e 2 e “gramatical” nos blocos 3 e 4), incluímos também uma variável de “região topográfica” (anterior esquerda, anterior direita, fronto-central, posterior esquerda e posterior direita) na modelagem estatística.

A confirmação da hipótese se daria houvesse uma amplitude negativa maior evocada pela condição “2 violações” em comparação com as demais condições e se a condição “1 violação” apresentasse amplitude negativa maior que a condição “gramatical”. Essa ordem de efeitos, em janela temporal precoce (*i.e.*, em torno de 150ms após ocorrência de afixo flexional) e em região topográfica “anterior esquerda” ou garantiriam um efeito que se explica pela detecção de agramaticalidade e custo de processamento morfossintático, ao qual, em tese, deveria subjazer processos de *parsing* e combinação. Caso o mesmo efeito fosse “fronto-central”, como típico de efeitos MMN, teríamos uma resposta de MMN sintático, ainda que uma resposta fronto-central não tenha tanto respaldo na literatura como *locus* topográfico de processamento morfossintático quanto a região “anterior esquerda”.

Por outro lado, se processamos linguagem apenas com base em probabilidade cega a informações morfossintáticas abstratas (em nível de palavra), os picos de amplitude negativa em decorrência das frases agramaticais não deveriam ter distinção por aumento do número de violações (*i.e.*, tanto as condições “2 violações” quanto “1 violação” deveriam ter amplitude próxima, sem diferença significativa).

O que nossos dados parecem mostrar, como será reportado no capítulo 4 e discutido em detalhes no capítulo 5, é que não houve apenas um efeito de MMN modulado por processos sintáticos. Na realidade, aparentemente, encontramos um efeito direto de processamento morfossintático que apresenta aspecto automático, com início temporalmente precoce, de amplitude negativa, sustentado e cumulativo (maior na condição com mais violações). Este efeito pode ter contribuição de efeitos de MMN na janela temporal mais inicial, mas apenas o MMN não explica o efeito com as características observadas. Houve variações topográficas e uma latência sustentada que não estavam nas expectativas, mas que condizem com um possível

custo de processamento e acúmulo de potenciais cerebrais associados a vários processos, dentre os quais *parsing* e combinação. Dessa forma, esta tese e o que será exposto corrobora nossa hipótese.

A corroboração da hipótese tem contribuições para os debates linguísticos a nível representacional e de processamento. A nível teórico, os dados têm potencial informativo sobre como a linguagem está representada no cérebro, já que efeitos morfossintáticos são indicativos de um conhecimento linguístico que inclui informações morfossintáticas. A nível de processamento, indica que este conhecimento é empregado no decorrer da compreensão da linguagem, com a segmentação ou *parsing* da sentença para combinação de elementos menores em uma estrutura. Ainda que não se exclua o papel do processamento probabilístico, refletindo o efeito do uso e da frequência, em como compreendemos a linguagem, e ainda que haja mais perguntas em aberto e questões especulativas que perpassam a interpretação dos dados, os resultados nos apontam para visões abstratas e computacionais da linguagem, as quais permeiam um processamento que ocorre via segmentação e combinação.

Algo que deve estar enfatizado, contudo, é a delicadeza das relações que fazemos entre análise, achados e interpretações funcionais. Nossos resultados encorajam um olhar “morfossintático sobre o processamento morfossintático”, por assim dizer, mas limitações do estudo fazem com que nossos dados não sejam vistos como “prova”.

As limitações decorrem do tipo de dado, já que não possuem precisão espacial para permitir uma comparação mais direta com os principais modelos de neuroarquitetura da linguagem, que além de princípios de função neuronal também envolvem circuitos anatômicos neuronais. Decorrem do paradigma experimental, que reduz demasiadamente a variabilidade dos estímulos (poucos verbos usados) e limita o desenho experimental. Decorrem da impossibilidade de controlar inteiramente a atenção dos participantes. Decorrem do fato de que acabamos encontrando um efeito inesperado para o qual este paradigma experimental não foi originalmente concebido, o que levanta a necessidade de parcimônia e cuidado na interpretação dos dados. Além disso, há *confounds* que não foram possíveis excluir (fonológico e semântico) sobre os quais podemos apenas especular com base nas características temporais e topográficas das respostas eletrofisiológicas reportadas, o que torna a associação entre dados e processos mais tênue.

Mas isso também significa que há oportunidades de pesquisa que surgem a partir deste experimento. Estas oportunidades envolvem replicações do achado, refinamento metodológico e, também, exploração de perguntas antigas que permanecem e novas perguntas que surgem a

partir deste trabalho. Aqui reside a maior alegria de um pesquisador com cérebro curioso e coração de cientista.

O texto está dividido em sete capítulos. Este capítulo, o primeiro, introduz o tema. O capítulo 2 debate a noção de segmentação e combinatorialidade no processamento linguístico e situa estes mecanismos nos modelos de processamento de linguagem, com foco em modelos que ou incluem ou se contrapõem à visão combinatória da linguagem. O capítulo 3 explica o que é o EEG e a técnica de extração de ERPs, relata e problematiza os principais potenciais associados a processamento linguístico e detalha e problematiza o MMN, condições experimentais ideais para sua elicitação e suas interpretações funcionais, não linguísticas e linguísticas. O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada no experimento e resume o percurso de seu preparo. O capítulo 5 reporta os resultados do experimento, enquanto o capítulo 6 discute os achados. Por fim, o capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

Capítulo 2 – Segmentação, combinatorialidade e modelos de processamento

“It’s the job that’s never started that takes the longest to finish.”

Gandalf, O Cinzento

A pergunta sobre a natureza combinatória do processamento morfossintático está no coração desta tese. Tome-se por exemplo a sentença “Os participantes chegaram”. No nível da palavra, não é difícil reconhecer que em “os”, “participantes” e “chegaram” há aquilo que chamamos em estudos normativos de processos de formação das palavras. O verbo “chegar” envolve flexão verbal, com uma raiz “cheg-” e uma desinência “-(a)ram” através da qual reconhecemos que se trata de um verbo no pretérito de terceira pessoa do plural. O termo “participantes” é uma derivação, processo que forma palavras em outras categorias (neste caso, um substantivo), a partir do morfema “-(a)nte”, além de estar flexionado quanto ao número, com o morfema “-s”. Do lado sentencial, observamos um sintagma nominal como sujeito, composto por determinante e substantivo, nos quais identificamos concordância de gênero e número, e um sintagma verbal como predicado que, conforme a língua portuguesa, concorda em número e pessoa com o sujeito. A nível teórico, ao menos conforme uma proposta gerativa, diríamos também que essa sentença foi formada por uma sequência de concatenações de constituintes para formar uma estrutura hierarquizada. No caso da morfossintaxe, tratamos da influência das informações gramaticais codificadas em morfemas e das regras de combinação dos constituintes na construção da estrutura de uma sentença e, no contexto desta pesquisa, de como elas são utilizadas no curso da compreensão.

Mas será que a nível mental e cerebral podemos falar, de fato, de processos de segmentação e combinação de elementos? Ao propor investigar o processamento morfossintático, busca-se entender que processos mentais estão envolvidos no reconhecimento e produção de palavras e sentenças, como este conhecimento está representado e de que forma o processamento se dá em termos cerebrais. Do lado lexical, pode-se falar em modelos de processamento morfológico (*e.g.*, Taft; Forster, 1975; Butterworth, 1983; Schreuder; Baayen, 1995). A nível sentencial, há modelos que falam sobre processamento (morfo)sintático e semântico (*e.g.*, Ullman, 2001; Hagoort, 2005; Pyllkänen, 2019; Murphy, 2024).

Opta-se nesta pesquisa por um enfoque na discussão dos modelos de processamento, seguindo o que parece ser uma tendência da psico-neurolinguística. Haverá momentos,

contudo, em que a referência a teorias será inevitável, em especial ao referir-se a abordagens não-combinatórias à linguagem. Primeiramente, modelos de processamento que envolvam algum grau de combinatorialidade serão apresentados. Em seguida, abordar-se-ão a hipótese desta pesquisa e perspectivas alternativas ao processamento combinatório que podem explicar efeitos que não corroborem a hipótese.

2.1 – Combinatorialidade, composicionalidade, segmentação e concatenação

O termo “combinatorialidade”, mecanismo central do que se busca investigar neste trabalho, não somente carece de uniformidade como de uma conceptualização mais clara, sendo intercalado com outros termos como “composição”. É diferente do que acontece com termos como “concatenação”, que é amparado de forma mais clara em seu domínio/teoria.

Este capítulo abriu com um exemplo do que queremos dizer por “combinar”: um mecanismo que combina elementos linguísticos para construir uma estrutura ou sentença. Esse exemplo é condizente com a concepção de combinatorialidade que é encontrada em estudos de eletrofisiologia ao tratar de linguagem e sintaxe. Por exemplo, no domínio da morfologia, o mecanismo indicado como responsável pela formação de palavras morfologicamente complexas em estudos de *Mismatch Negativity* (uma resposta eletrofisiológica) é a combinatorialidade, tipicamente contrastada nestes mesmos estudos com recuperação de forma plena (*e.g.*, Hanna; Pulvermüller, 2014). A mesma palavra, “combinatória”, é usada para descrever mecanismos de compreensão no domínio da sintaxe em estudos de MMN (*e.g.*, Pulvermüller; Assadollahi, 2007) e de paradigmas mais tradicionais de estudos de linguagem com eletrofisiologia (*e.g.*, Leminen *et al.*, 2016).

No caso do experimento de Leminen *et al.* (2016) em que processos morfossintáticos e morfológicos são investigados, algo que chama atenção é que os autores falam de mecanismos combinatórios a nível de palavra e de sintagma, mas o termo é intercalado com a noção de *parsing*, que pode ser traduzida como “segmentação”. Se no curso da compreensão o falante combina elementos menores, então logicamente deve haver um processo em que o fluxo contínuo da fala é quebrado em elementos menores. O termo não é estranho a estudos de processamento sintático, sendo associado a um processo que emprega o conhecimento gramatical do falante no curso do processamento linguístico para (i) segmentar as sentenças e, em seguida, para (ii) construir uma estrutura a partir dos constituintes identificados (van

Gompel; Pickering, 2007; Ferreira; Çokal, 2016; Fukui, 2017; Adger, 2021). Mas a forma como esse processo ocorre não é tão simples. Em trabalhos de viés gerativo, por exemplo, o termo “combinação” parece ser intercambiável com “concatenação”, ou ao menos intimamente ligados (e.g., Chomsky, 1995; Lightfoot, 2007; Adger, 2021). Perspectivas que questionam a presença de mecanismos combinatórios, sejam eles quais sejam, serão abordadas na subseção 2.3.

Outro ponto é o caso de palavras de morfologia complexa. Não há definição, no caso dos estudos citados como exemplo (e.g., Pulvermüller; Assadollahi, 2007; Leminen *et al* (2016)), sobre se a “combinação” que ocorre entre morfemas é a mesma que ocorre no nível da sintaxe, quando este debate existe na teoria linguística. Aronoff (2008), por exemplo, defende a separação entre morfologia e sintaxe ao mostrar falta de uniformidade em como línguas diferentes incorporam a morfologia. Baayen *et al.* (2011) coloca o surgimento do conhecimento morfológico como uma forma de conhecimento emergente da comparação entre protótipos de palavras, seguindo uma lógica de palavra e paradigma, de forma que a morfologia em seu modelo não prevê a existência de morfemas (“morfologia amorfa”). Marantz (1997) defende a visão de “sintaxe até embaixo”, em que morfemas são unidades abstratas que fazem parte da derivação sintática. Booij (2006) argumenta em favor de uma morfologia de construções, em que palavras frequentes que compartilham uma estrutura levam ao surgimento de uma construção (e.g., [V-er]) a partir da qual palavras podem ser “formadas”, mas a noção de combinatorialidade fica mais opaca já que neste caso fala-se de preenchimento de uma lacuna em uma construção, ao invés de um morfema abstrato que se combina a uma forma base. Ainda assim, no decorrer do processamento, não é impensável que um conhecimento neste sentido poderia dar espaço a algo análogo a uma combinação.

Um outro conceito relacionado com a ideia de “combinação” é o de “composição”. Pelletier (1994) define o “princípio da composicionalidade semântica” como o princípio de que o significado de uma expressão é uma função dos, e somente dos, significados das suas partes junto com o método pelo qual aquelas partes foram combinadas”² (Pelletier, 1994, p. 11, tradução própria). Aqui, novamente percebe-se a associação com a noção de combinação de partes. Por mais questionamentos que possam existir ao princípio da composicionalidade semântica, essa concepção de composição enquanto o resultado da combinação de partes está presente em estudos neurolinguísticos.

² “The Principle of Semantic Compositionality is the principle that the meaning of an expression is a function of, and only of, the meanings of its parts together with the method by which those parts are combined.”

Por exemplo, em estudos da Pylkkänen e colegas há uso intercalado do termo “composição” e “combinação”, tanto no domínio semântico quanto sintático (*e.g.*, Pylkkänen, 2019; Parrish; Pylkkänen, 2022), com a noção de que há processos de composição ou combinação básicos no decorrer do processamento linguístico (*e.g.*, composição do substantivo “barco” com o modificador “vermelho” para formar o conceito de “barco vermelho”). Em seu modelo de processamento, como será abordado, Pylkkänen (2019) ora no lobo temporal anterior esquerdo como o *locus* da “composição semântica”, ora como de “efeitos combinatórios semânticos”. Matar *et al.* (2022) intercalam, de forma similar, os termos “composição” e “combinação” para referir-se à construção de estruturas sintáticas. Não fica claro na literatura como um todo se há sinonímia no uso dos termos ou se uma associação entre os conceitos, ainda que aparentemente estudos neurolinguísticos pareçam tratá-los como sinônimos. O que fica claro é que a ideia de combinar partes está presente nos debates linguísticos em vários níveis, como aqui se observa.

Outra questão envolve o caráter obrigatório do processo de segmentação e combinação, ao menos no que tange a compreensão. A teoria *good-enough* (“bom-o-suficiente”, tradução adaptada própria), por exemplo, propõe que pistas contextuais, esquemas e a heurística do significado podem levar à interpretação da sentença sem que, necessariamente, haja sempre um processo de composição sintática de suas partes (Ferreira; Bailey; Ferraro, 2002; Ferreira; Patson, 2007; Engelhardt; Ferreira; Jones, 2009). Por exemplo, sentenças como “*the dog was bitten by the man*” (“o cão foi mordido pelo homem”, tradução própria) levam a erros de interpretação de papel temático, com participantes apontando o cão como agente e o homem como paciente, apesar da estrutura sintática. Segundo os autores, a interpretação a partir da heurística pode persistir mesmo após reanálise das sentenças. Uma proposta fundadora e fundamental vem do conceito de *analysis-by-synthesis* (análise-atraves-de-síntese) aplicado à linguagem (Halle; Stevens, 1962), em que a segmentação do insumo e a construção da sua estrutura ocorre em equilíbrio com processos ditos de-cima-para-baixo (Bever; Poeppel, 2010). O que é colocado não é a inexistência ou irrelevância de mecanismos combinatórios no processamento linguístico, mas sim que a compreensão pode recorrer a outras estratégias como forma de economia de recursos cognitivos. A pergunta com a qual se deseja contribuir a partir desta pesquisa não está relacionada com se a linguagem requer processamento obrigatoriamente combinatório/via regras, mas sim se este é um mecanismo possível.

O que será investigado é o processo combinatório enquanto a combinação de elementos menores, previamente segmentados com base no conhecimento morfossintático representado na memória de um falante. A segmentação ocorreria com base, em primeiro momento, nos

morfemas com, em seguida, acesso aos traços sintáticos que representam (e.g., [3ª pessoa], [singular] no morfema /-a/ no verbo “adot-a”). O foco é a segmentação e a combinatorialidade na compreensão de forma automática enquanto mecanismos possíveis, não necessariamente obrigatórios. O contraste a esta visão, como descrito na seção 2.3, provém de visões construcionistas e probabilísticas da linguagem, em que não há construção de estrutura a partir de uma segmentação/*parsing* em unidades mínimas de significado para posterior combinação.

2.2 Modelos de processamento de linguagem compatíveis com combinatorialidade

Nesta seção, apresentamos alguns dos principais modelos de processamento de linguagem. Todos eles, em sua essência, incluem algum grau de combinatorialidade nos processos mentais que pressupõem fazer parte do processamento linguístico. São eles: o modelo declarativo-procedural de Ullman, o modelo MUC de Hagoort, o modelo ventral-dorsal de Hickok e Poeppel, complementado pela proposta de organização cortical da sintaxe de Matchin e Hickok, o modelo de Friederici, o modelo de Pyllkkanen e o modelo ROSE de Murphy.

2.2.1 Modelo declarativo/procedural de Ullman

O modelo declarativo-procedural de Ullman foi primeiro pensado em resposta ao debate do *simple past* e teve por base, principalmente, estudos de lesão e deficiências. Uma dúvida pairava sobre como, no inglês e na maioria das (ou todas as) línguas indo-europeias, verbos no passado eram representados. Isso porque o inglês apresenta duas formas de flexão: uma regular, com o acréscimo do afixo *-ed*, e uma irregular, que pode requerer reajustes fonológicos (e.g., o passado do verbo “eat”, “comer”, é “ate”). Pinker (1991) sugeriu que palavras irregulares seriam listadas no léxico mental, enquanto palavras regulares eram formadas por computação de regras. Esta proposta foi aparentemente corroborada por um estudo de Ullman et al. (1997) em que pacientes (i) com Alzheimer, tipicamente com danos em regiões mediais temporais e temporo-parietais, (ii) afasia anterior, com danos nas regiões temporal esquerda e temporo-parietal, (iii) mal de Parkinson, tipicamente com danos ao córtex frontal e à ganglia de base, e (iv) afasia posterior, com danos ao gânglio de base e córtex perisilviano frontal esquerdo tiveram que produzir palavras no passado simples. Os participantes com o mal de Alzheimer e

afasia anterior tiveram performance prejudicada na produção de palavras irregulares, mas não nas regulares, ao passo que os participantes com mal de Parkinson e afasia posterior tiveram desempenho oposto. Os autores argumentaram que isso se deve a uma dissociação de sistemas de memórias, em que a memória declarativa está envolvida na listagem do léxico mental (prejudicada nos pacientes com Alzheimer e afasia anterior), e a memória procedural (*i.e.*, de procedimentos) está envolvida em computação de regras gramaticais (prejudicada nos pacientes com mal de Parkinson ou afasia posterior). Apesar de tratar, em um primeiro momento, da formação de palavras, o modelo também passou a incluir a gramática de forma mais ampla na memória procedural, com a computação de regras gramaticais e aquisição de categorias abstratas sendo executadas por esta memória, enquanto a memória declarativa estaria envolvida na aprendizagem de conhecimento lexical, semântico, regras explícitas, *chunks* de linguagem e conhecimentos idiossincráticos (Ullman, 2014; Ullman *et al.*, 2020; Morgan-Short; Hamrick; Ullman, 2022). Neste modelo, o equivalente ao processamento combinatório seriam as computações via regra executadas pela memória procedural.

2.2.1 Modelo MUC de Hagoort

O modelo de Hagoort (2005, 2013) é conhecido como “MCU”, sigla que significa Memória, Unificação e Controle. A memória é o conhecimento linguístico representado, único componente exclusivo da linguagem, em que se encontram o conhecimento de fonologia, sintaxe (em *templates*) e semântica. sendo associada a regiões no córtex temporal e giro angular do córtex parietal. A unificação é o processo responsável por formar estruturas mais complexas, atuando em todos os níveis. De acordo com o autor, regiões frontais são cruciais para a unificação. Por fim, o controle relaciona a linguagem a ações conjuntas e interações sociais, sendo ligado ao córtex pré-frontal dorso-lateral, estrutura medial (córtex anterior cingulato) e partes do córtex parietal envolvidas em atenção. A distribuição das funções não necessariamente se restringe a essas áreas, mas sim contam com redes dinâmicas de regiões cerebrais. As evidências empíricas provêm especialmente de estudos de neuroimagem, maior parte de fMRI. O autor reporta diversos achados na caracterização do processamento de diferentes níveis linguísticos. Apesar de a unificação ser vista como um mecanismo geral, não específico da linguagem, este mecanismo pode ser visto como um processo combinatório em um modelo que caracteriza a linguagem de forma distinta de perspectivas gerativas, já que trata do conhecimento sintático e semântico em termos de *templates*.

2.2.3 Modelo ventral-dorsal de Hickok e Poeppel (2007) e o modelo de organização cortical de Matchin e Hickok (2020)

O modelo de Hickok e Poeppel (2007) é baseado especialmente em estudos de dano e procedimento pré-cirúrgico “Wada” (anestesia à parte do cérebro ou hemisfério para avaliar padrões de lateralização da memória e da linguagem), já que mostram que quando determinadas áreas têm sua funcionalidade interrompida, elas estão envolvidas nos processos cognitivos que são prejudicados. O modelo divide o funcionamento em duas vias: uma ventral, e uma dorsal, e em dois padrões de distribuição do processamento (lateral e bilateral). Apesar de mencionar aspectos semânticos e sintáticos, o modelo é centrado em aspectos referentes à fala e fonologia. A via ventral envolve estruturas nas porções superior e média do lobo temporal e atua na compreensão, de forma que é ao circuito ventral que se associa a compreensão da fala. A via dorsal, que engloba estruturas no lobo frontal posterior e no aspecto mais posterior-dorsal do lobo temporal e *operculum* parietal, traduz sinais acústicos em representações articulatórias no lobo frontal, essencial para desenvolvimento da fala e produção e para a percepção de fala.

A via ventral, caracterizada como o caminho “som ao significado”, é central para estudos sobre processamento combinatório. Os autores argumentam que a tradução de sinais acústicos em representações semânticas exige processamento de vários níveis, mas não há clareza se o reconhecimento da fala envolve todos esses níveis (fonológico, silábico, sintático e semântico). Dessa forma, efeitos combinatórios de processamento morfossintático no curso da compreensão seriam incorporados nas funções exercidas por esta via. Regiões anteriores do lobo temporal são associadas, neste modelo, a processamento semântico e podem estar ligadas a aspectos gramaticais e combinatórios da fala. Os autores citam prejuízo à compreensão de sintaxe complexa e combinação semântica a partir de dano ao lobo temporal anterior, mas que há inconsistências, pois pacientes com demência semântica mostraram bom nível de compreensão a nível de sentença.

Hickok elaborou em conjunto com Matchin, em 2020, uma proposta de organização cortical da sintaxe que aprofunda o detalhamento do processamento sintático. Os autores afirmam que este modelo é complementar ao modelo ventral-dorsal de Hickok e Poeppel, o qual é mais centrado na percepção de fala. Matchin e Hickok (2020) atualizam a discussão sobre processamento sintático, estudos de lesão e neuroimagem ao apresentar um quadro mais complexo do agramatismo e do engajamento de regiões corticais específicos. Com apoio de

estudos de lesão, tarefas comportamentais e de imageamento por ressonância magnética funcional, propõe que o processamento de hierarquia e combinação relacionado à sintaxe envolve primariamente o giro temporal médio posterior esquerdo, enquanto a linearização das informações morfossintáticas necessárias à produção de linguagem engaja o giro frontal inferior esquerdo. A estrutura hierárquica associada à sentença “[[[uma criança]SN [[come [um pouco de chocolate]NP]VP]S” e suas informações sintáticas não-lineares estariam armazenadas no giro temporal médio posterior, com operações combinatórias sutis ocorrendo sob esta região. A linearização da sentença, “uma-criança-come-um-pouco-de-chocolate” seria executada, posteriormente, pelo giro frontal inferior.

Este modelo se contrasta com o de Friederici, a ser apresentado a seguir, ao apresentar uma revisão de achados que aponta para a operação básica “concatenar” estar associada ao giro temporal posterior médio, não ao giro frontal inferior. Dois exemplos de evidências de que o giro frontal inferior não é o centro do processamento sintático, segundo Matchin e Hickok (2020), são: (i) pacientes com afasia por lesão na área de Broca apresentam preservação de julgamentos de aceitabilidade, ainda que apresentem dificuldade de produção de sentenças; (ii) estudos de mapeamento de déficit-lesão de compreensão geral de sentença enfatizam áreas como giro angular e lobo temporal, não a área de Broca.

2.2.4 Modelo de Friederici

Assim como o modelo de Hickok e Poeppel, Friederici (2012) também propõe um modelo dividido em via dorsal e via ventral, mas com foco maior em sintaxe. A autora destaca a existência de conexões entre áreas frontais e temporais, com dominância do hemisfério esquerdo. A via dorsal é implicada em processamento sintático, com conexão do córtex temporal (via córtex parietal inferior e partes do fascículo longitudinal superior) ao córtex pré-motor. O fascículo arqueado conecta córtex temporal à BA44.

A via ventral é ligada ao caminho som-a-significado e a processos sintáticos gerais ou construção de estruturas sintáticas locais. O fascículo uncinado, segundo a autora, conecta o córtex frontal inferior ventral anterior ao polo temporal, e o sistema de fibras de cápsula extremas (que media o fascículo fronto-occipital inferior) liga o córtex frontal inferior a longo do córtex temporal ao córtex occipital, enquanto os fascículos longitudinais médio e inferior ligam as regiões anteriores e posteriores do córtex temporal.

Meyer e Friederici (2016) apontam como o córtex inferior frontal esquerdo e os giros médio e superior temporais esquerdos estão envolvidos no processamento de sentenças complexas, ao fazer uma meta-análise de estudos de neuroimagem que contrastam sentenças canônicas com não-canônicas e sentenças encaixadas com não-encaixadas. A maior atividade associada a sentenças não-canônicas (em termos de ordem de palavras) é interpretada como resultante de um processo de reordenamento. Um exemplo dado pelos autores é no contraste entre sentenças em alemão como “*dass der Mann den Jungen mag*” (“que o homem gosta da criança, tradução adaptada própria, p. 598) com a sentença “*dass den Jungen der Mann mag*” (“que da criança o homem gosta”, tradução adaptada própria, p. 598), em que na primeira sentença os elementos seguem a ordem canônica, com o sujeito aparecendo antes do objeto, enquanto na segunda sentença há inversão dos sintagmas, o que requereria um reordenamento no decorrer do processamento da sentença. Já a maior atividade em sentenças com sentenças encaixadas é ligada a aumento da complexidade hierárquica, como no contraste entre as sentenças “*the child enjoyed the juice that stained the rug*” (“a criança gostou do suco que manchou o tapete”, tradução adaptada própria, p. 599) e “*the juice that the child enjoyed stained the rug*” (“o suco do qual a criança gostou manchou o tapete”, tradução adaptada própria, p. 599), em que a sentença encaixada “*that the child enjoyed*” aumenta a complexidade hierárquica. As autoras defendem que apenas questões de memória de trabalho não são suficientes para explicar os efeitos de estudos como esses, especialmente em contextos em que a demanda por memória de trabalho pelos estímulos foi mantida constante. Apesar de não fazerem menção ao modelo de 2012, a revisão reforça o papel de áreas mencionadas no modelo que são associadas a processamento sintático.

O modelo é reafirmado por Friederici (2017), que associa a operação sintática básica de concatenação à área de Brodmann 44 (parte mais posterior do córtex frontal inferior, *pars opercularis*), com a BA 44 envolvida em processamento sintático e o córtex temporal posterior dando suporte à integração de informações sintáticas e semânticas. Segundo Friederici, as regiões conectadas trabalham em conjunto durante o processamento de sentenças, o que mostra a relevância deste modelo e os achados que o embasam no entendimento acerca do processamento combinatório na linguagem.

2.2.5 Modelo de rede combinatória (Pylkkänen)

Pylkkänen (2019) reporta um novo modelo de processamento de linguagem a partir de uma crítica de estudos sobre processamento que se apoiam em questionamentos simples, mas pertinentes: estudos sobre sintaxe investigam sentenças com alta complexidade e tendem a não se preocupar com o caráter mais básico da composição e, ainda, grande parte dos achados sobre processamento de sintaxe também apresentam variações semânticas. Ou seja, efeitos sintáticos de aumento de complexidade estrutural, por exemplo, também provocam efeitos semânticos, o que acaba por ser um *confound*. Em estudos prévios, houve esforço para o processamento composicional em contexto de sintagmas mínimos, para encontrar a base da composição. Em seu modelo, na sequência, há efeitos de sensibilidade à estrutura argumental (no giro angular), efeitos combinatórios sintáticos (no lobo temporal posterior) em sobreposição temporal com efeitos combinatórios semânticos (no lobo temporal anterior esquerdo), sensibilidade a dependências de longa distância (no giro frontal inferior esquerdo) e efeitos combinatórios mais tardios (no córtex pré-frontal ventral medial).

O estudo de Bemis e Pylkkänen (2011) mostrou, em experimento de MEG, efeitos de combinação em sintagmas mínimos ao comparar estímulos do tipo “*red boat*” (“barco vermelho”, sintagma combinável), “*xkq boat*” (consoante não pronunciável seguida pelo substantivo) e “*cup, boat*” (“copo, barco”, lista de palavras sem composição). A tarefa envolveu responder se o estímulo era compatível com uma figura que aparecia em seguida. Mas ao invés de haver engajamento de regiões tipicamente associadas a sintaxe (e.g., giro frontal inferior esquerdo), encontraram aumento de ativação em duas outras regiões, o lobo temporal anterior esquerdo (LTAE) (em torno dos 225ms após estímulo) e o córtex frontal medial ventral (em torno dos 400ms após estímulo), associados na literatura a efeitos combinatórios sintático e semântico, respectivamente, o que leva os autores a sugerirem a mesma interpretação, de que estas regiões refletem operações básicas em cada domínio. Um estudo posterior dos mesmos autores, com desenho experimental semelhante, encontrou efeitos tanto no lobo temporal anterior esquerdo quanto no giro angular esquerdo para composição básica, com o diferencial de que dois experimentos foram realizados, um com estímulos lidos e um com estímulos ouvidos (Pylkkänen; Bemis, 2013). Dessa forma, ficou demonstrado que o efeito de composição lobo temporal anterior esquerdo é independente de modalidade escrita ou auditiva. Achados na literatura e de seu próprio programa de pesquisa levaram Pylkkänen (2019) a reconsiderar o papel, o local e processos envolvidos no processamento da linguagem. Em seu modelo, o lobo temporal anterior esquerdo representa processos combinatórios, o giro angular mostra sensibilidade a estrutura argumental e o lobo temporal posterior é apontado como potencial local de efeitos combinatórios sintáticos, mas a nível de sugestão, dada a crítica

realizada previamente a achados sobre processamento de sintaxe. O giro frontal inferior esquerdo, tradicionalmente associado a processamento sintático, ganha uma interpretação mais específica, com relação a sua sensibilidade a dependências de longa-distância. O córtex pré-frontal medial ventral, por sua vez, é associado a efeitos combinatórios após as primeiras operações básicas. O conjunto de críticas e achados leva Pykkänen (2019) à sugestão de que o cérebro processa semântica, enquanto a sintaxe seria um conhecimento que poderia auxiliar na predição durante o curso do processamento da linguagem.

Mas em estudo posterior, Matar *et al.* (2021) encontraram uma forma de variar a complexidade estrutural dos estímulos sem que houvesse (ou, ao menos, com expressiva redução de) variação semântica. Os autores adotaram estímulos em árabe que se contrastavam pela ausência ou presença de artigos (cadeira-roxa, a-cadeira-roxa, a-cadeira-a-roxa), que resultavam em alterações de complexidade estrutural (traduções adaptadas, respectivamente, “uma cadeira roxa”, “a cadeira roxa” e “a cadeira é roxa”). Diferentemente do português e do inglês, no árabe, os artigos definidos são inseridos na forma da palavra, de forma que o sintagma continua como um sintagma mínimo (*i.e.*, de dois itens lexicais), como nos estudos prévios sobre composição. Houve acréscimo também de estímulos controle com apenas uma palavra. Efeitos de complexidade estrutural em torno dos 300ms foram encontrados no lobo temporal posterior esquerdo (LTPE), ao passo que efeitos de significado modularam a atividade no LTAE. Este achado reforça o potencial papel do LTPE em operações combinatórias sintáticas e, não somente isso, indicam a existência de processos combinatórios básicos a nível sintático. Dessa forma, o modelo de Pykkänen é de grande importância para estudos sobre processamento combinatória, ao propor um modelo que joga luz sobre processos combinatórios básicos.

2.2.6 Modelo de Fedorenko, Ivanova e Regev (2024)

Fedorenko, Ivanova e Regev não apresentam exatamente um modelo próprio de processamento, mas falam de uma rede linguística de um ponto de vista anatômico e mencionam interpretações funcionais a partir das quais é possível determinar o que é a linguagem neste circuito. Os autores mencionam achados de várias técnicas, incluindo estudos de compreensão e de produção, mas se concentram em achados de ressonância magnética funcional a nível individual, o que acaba representando um problema para uma das colocações dos autores acerca do processamento léxico-semântico e do processamento sintático. Os

autores apontam, por exemplo, uma dificuldade em dissociar efeitos destes dois níveis de processamento em decorrência de uma sobreposição de regiões ativadas. No entanto, medidas com precisão temporal (*e.g.*: MEG e EEG) permitem investigar a separação de efeitos com dados de linha temporal, ainda que com outras ressalvas. Por exemplo, no âmbito dos estudos de ERP, efeitos léxico-semânticos afetam uma resposta chamada N400, ao passo que efeitos morfossintáticos são tipicamente associados a outras respostas neuronais (*e.g.*, ELAN e LAN) que possuem características temporais e topográficas distintas do N400.

Um diferencial do trabalho de Fedorenko é o esforço em mostrar a rede não linguística que apoia a linguagem, além da rede linguística mais nuclear. Assim como outros modelos, de forma ampla, o circuito linguístico é composto pelas regiões frontais e temporais do hemisfério esquerdo, com a ressalva de que a lateralização não é necessária para o funcionamento da linguagem e de que há indivíduos em que há lateralização para a direita. Dois pontos destacados também são a alta interconectividade das regiões pelos feixes de fibras nervosas e a conexão funcional. O que a Fedorenko considera como o núcleo das computações do circuito linguístico é a sensibilidade a regularidades sub-lexicais (*e.g.*, fonotática e morfologia), lexicais, sintagmáticas e sentenciais, além de efeitos semânticos. O processamento a nível do discurso seria apoiado por outras redes, ao passo que as regiões da rede linguística respondem igualmente a listas de sentenças não conectadas e conectadas.

Sobre as redes cognitivas não linguísticas que estão envolvidas no uso natural da linguagem, os autores citam as redes de múltipla demanda, de teoria da mente e de modo padrão (*default mode network*). A rede de demanda múltipla envolvida é composta por áreas de domínio geral bilaterais frontais e parietais, pré-frontais mediais e temporal inferior posterolateral. A atividade nesta rede é ligada a memória de trabalho, atenção e controle cognitivo. Por fim, a rede de modo padrão, cujo papel ainda é debatido, apresenta maior atividade em estado de repouso do que em realização de tarefas externamente orientadas e é composta por áreas bilaterais nos córtices parietal medial e pré-frontal medial, ao redor da junção temporo-parietal e no polo temporal. Seu caráter relevante para a linguagem diz respeito à sua larga escala temporal em minutos, que permite a conexão de informações ao longo de vários eventos. Assim, sua contribuição para a linguagem reside no rastreamento de estruturas a nível de sentença e de discurso, sendo mais recrutada, por exemplo, para textos coerentes que para sentenças desconectadas.

Os autores ressaltam que mais investigações ainda são necessárias para compreender a arquitetura interna da linguagem. Ainda assim, o modelo de Fedorenko, Ivanova e Regev

possui em seu cerne processos combinatórios a níveis morfológico e sintático, o que determina sua importância para estudos sobre processamento combinatório.

2.2.7 Modelo ROSE para sintaxe

Murphy (2024) propõe seu modelo centrado em oscilações principalmente a partir de estudos de oscilação neuronal com humanos e animais, mas também faz menção a estudos de MEG, ressonância magnética funcional e estimulação magnética transcraniana. Propõe diferentes processos sendo indexados por fenômenos conhecidos do processamento neuronal, como “*spiking*”, acoplamento de fases, e atividade em bandas específicas de frequência. Oscilações neuronais são ritmos da atividade elétrica dos neurônios, relacionadas ao ritmo de disparo dos neurônios. A ideia é propor um código neural para a sintaxe que permita a elaboração de hipóteses testáveis a partir de achados causais, de gravação de flutuação elétrica direta do córtex. Surge em resposta a preocupações do campo da neurociência da linguagem de que poderia não ser possível chegar a um modelo de processamento sintático por limitações do campo, em termos metodológicos e técnicos. O modelo ROSE é dividido em quatro níveis: *Representation* (“representação”), *Operation* (“operação”), *Structure* (“estrutura”) e *Encoding* (“codificação”).

A representação é a codificação de unidade única de traços conceituais e sintáticos. São esses traços que compõem itens lexicais. O componente “Operação” corresponde a transformações de traços em objetos lexicalizados e implementação de composição semântica. As unidades de representação são “montadas” (“*ensembled*”) em pacotes de traços acessíveis pelo nível de estrutura. O componente de Estrutura, um programa neural de baixa frequência, estrutura o “*read-out*” dos pacotes de traços e gera inferências categoriais recursivas, permitindo a inferência de estrutura hierárquica. Murphy explica que a operação MERGE ocorre nesta etapa, representada pela sincronização de atividade delta no córtex temporal posterior com atividade theta no córtex inferior frontal. O último componente, Codificação, refere-se a um espaço de trabalho para memória lexical (*bottom-up*) e memória de hierarquia (*top-down*). Nesta proposta, ondas viajantes transportam estruturas formadas para outras partes do cérebro e implementam (i) acoplamento delta-theta para memória hierárquica e (ii) acoplamento theta-gama para memória lexical. O acoplamento delta-gama representa processamento combinatório envolvendo memória lexical e hierárquica.

De forma geral, os processos ocorrem em regiões fronto-temporais, mas estas atuam como *hubs* enquanto o processamento é abordado de forma mais ampla, envolvendo várias

partes do cérebro. Processos de operação sintática básica são associados a atividade no córtex temporal posterior, ao passo que o giro frontal inferior esquerdo não deixa de ser incluído no modelo, mas como uma região envolvida em processos de compreensão de sentença em nível mais complexo.

O modelo de Murphy ainda requer maior investigação. No entanto, oferece uma abordagem neurocognitiva computacional para como o processamento combinatório é implementado, o que o permite jogar luz sobre o processamento morfossintático.

2.2.8 Combinatorialidade nos modelos até aqui

Em maior ou menor grau, todos os modelos de processamento reportados até este momento incluem ou processos combinatoriais ou processos correlatos. Nos casos dos modelos de Murphy (2024), Friederici (2012), Fedorenko, Ivanova e Regev (2024), Ullman (1997) e Pyllkanen (2019), há referências diretas a mecanismos combinatórios de natureza morfossintática, ainda que no caso de Murphy (2024) a referência seja a concatenação e no modelo declarativo/procedural de Ullman fale-se em automatização de computação por regras, na qual o processamento combinatório se encaixa. No modelo de Hickok e Poeppel (2007), não há aprofundamento no tocante ao processamento sintático, mas ele está incluso no modelo e é complementado pelo modelo de Matchin e Hickok (2020). No modelo de Hagoort (2005), o processo de unificação pode ser considerado um correlato de processos combinatórios; ainda que seja tido como um mecanismo geral, destaca-se que o autor mostra ativação gradiente referente a cada nível da linguagem.

Na subseção seguinte, apresentamos a hipótese que parte destes modelos e visões alternativas caso a hipótese não seja corroborada.

2.3 Hipótese e alternativas ao processamento combinatório

Com inspiração nas teorias e nos modelos discutidos até este ponto, temos por hipótese que o processamento linguístico envolve mecanismos combinatórios. Estes mecanismos atuariam na compreensão a partir da segmentação das sentenças ouvidas ou lidas em unidades menores e re-constituíam a estrutura das sentenças a partir de tais unidades. Como mostrado, uma série de modelos e evidências que os embasam apontam para efeitos combinatórios no processamento morfossintático que, contudo, requerem maior testagem. Apesar de não

especificarmos se tal mecanismo combinatório seria atuante em cognições outras além da linguagem, ele seria central para a linguagem e atuaria a nível morfológico e sintático. Ao passo que a morfologia derivacional também pode envolver tais processos, nossa hipótese versa sobre um processo que envolve flexões verbais e o fenômeno de concordância.

Por outro lado, a visão de processamento combinatório não é unânime e há propostas alternativas, tanto a nível representacional quanto a nível de modelos de processamento. Estas perspectivas provêm, por exemplo, da gramática de construções e de visões probabilísticas do processamento linguístico.

A gramática de construções constitui uma teoria sobre como a gramática está organizada em nossa mente, assim como a gramática gerativa. Apesar de não constituir um modelo de processamento por si, a partir de pressupostos da teoria, é viável realizar inferências. A língua é concebida como um “inventário estruturado de unidades linguísticas convencionais” (Langacker, 1987, p. 57), e dentre as unidades estão as construções. Nesta teoria, as estruturas sintáticas são parte das construções, que são pares de forma e significado, de forma que não haja dissociação entre sintaxe e semântica. Não somente essa dissociação se perde, mas também há uma visão lexicalizada da gramática, com as construções tendo status de itens lexicais (Langacker, 1987; Goldberg, 1995, 2013). Um exemplo de construção é a construção resultativa, “[X V Y Z] – X causa Y a se tornar Z ao V-ar”, como na sentença “*She rocks the baby to sleep*” (“Ela pôs o bebê para dormir”, tradução própria) (Hoffman; Tousdale, 2013, p. 1). Do lado da forma, as construções dão espaço a lacunas (ou *slots*) a serem preenchidos por itens lexicais. Esta forma de enxergar a linguagem traz um questionamento importante para modelos e abordagens de processamento que preveem algum nível de combinatorialidade entre os elementos de um sintagma ou sentença. Se as construções representam formas inteiras armazenadas na memória do falante, tais como itens lexicais, então a combinatorialidade fica restrita à combinação entre construções, de forma que efeitos combinatórios reportados em estudos com sintagmas menores sejam questionáveis quanto a sua natureza. Respostas neurofisiológicas deveriam, em tese, também refletir processos de memória declarativa ou semântica e do que se convencionou chamar de “acesso lexical”.

Um modelo de processamento menos mencionado na literatura buscou implementar a visão de linguagem da gramática de construções em um modelo neurolinguístico. Dominey, Hoen e Inui (2006) propuseram que, conforma as sentenças são processadas palavra por palavra, o significado das palavras de classe aberta (*e.g.*, substantivos) seria armazenado em uma memória de trabalho chamada “*Predicted Referents Array*”, e a estrutura do significado seria construída em seguida, sendo codificada em um “*Scene Event Array*”. Isto tornaria o

sistema apto a realizar mapeamentos entre forma e sentido apropriados a diferentes tipos de sentenças que correspondem a construções gramaticais. A representação da estrutura seria representada pelo “*Construction Index*”.

Mas se a gramática de construções se apoia em mecanismos cognitivos de domínio-geral para explicar a linguagem e os processos linguísticos, abordagens estatísticas articulam uma proposta ainda mais geral para a linguagem. Autores nesta perspectiva propõem que, de modo geral, o processamento linguístico pode ser explicado em termos de reconhecimento de padrões e previsões baseadas em probabilidade. O conexionismo, por exemplo, investiga processos mentais simulando atividade de redes neurais que dependem de condições matemáticas e força das conexões entre as unidades de processamento (neurônios) (Onnis; Christiansen; Chater, 2006). O conhecimento nestas redes é concebido como um padrão de ativações entre unidades conectadas, e a experiência e o *input* afetam o peso das conexões. Apesar de não ser unicamente estatístico, também se apoia em padrões estatísticos/probabilísticos para capturar regularidades, por exemplo, da linguagem (Ferreira, 2007). O conexionismo se diferencia de outras abordagens à linguagem por não prever nenhuma regra implícita ou simbólica: todo o seu comportamento advém dos padrões aprendidos. Por isso, abordagens conexionistas ao processamento linguístico podem ser vistas como contrárias a uma visão de combinatorialidade no processamento morfossintático da linguagem, já que dependeriam de um conhecimento não pautado pela computação de regras e de conhecimento morfossintático abstrato.

Também há outras abordagens probabilísticas para investigações sobre cognição e linguagem. Ao passo que o conexionismo busca simular o funcionamento de redes neurais, modelos puramente estatísticos se concentram em estabelecer níveis de probabilidade para a ocorrência de um determinado dado. Por exemplo, no caso da linguagem, um modelo bayesiano calcularia a probabilidade de determinadas sentenças/estruturas ocorrerem e poderia ser utilizado para fazer o *parsing* de sentenças e um modelo de *minimum description length* (um modelo estatístico que busca regularidades nos dados, Myung (2001)) poderia dar conta de aprendizagem de estruturas morfológicas nas palavras (Chater; Manning, 2006). Apesar de modelos probabilísticos não necessariamente eliminarem a existência de sistemas simbólicos e estruturais linguísticos, oferecem uma alternativa a como o processamento de linguagem é concebido, não sendo combinatórios.

2.4 Combinatorialidade nos modelos de processamento

Este capítulo visou apresentar os conceitos de *parsing* e combinatorialidade e os principais modelos e propostas de como o cérebro humano processa a linguagem. Os modelos apresentados advêm de uma variedade de influências teóricas e de diferentes tipos de dados. Todos os modelos e abordagens apresentados encontram algum nível de embasamento em dados empíricos. Por outro lado, mesmo se considerarmos apenas os modelos combinatórios, mais dotados de embasamento neurofisiológico, um questionamento perfeitamente cabível (e já mencionado) é a um possível viés na análise dos dados. Por isso, o presente trabalho foi articulado para testar o processamento linguístico com uma metodologia que (i) permite eliciar assinaturas neurofisiológicas fortemente (ainda que não garantidamente) associadas ao processamento morfossintático combinatório e (ii) permite testar possíveis efeitos probabilísticos ao apresentar duas condições que variam no grau de violação morfossintática sem diminuir ou aumentar efeito de probabilidade.

Caso a hipótese que esta pesquisa testa seja confirmada, de que o cérebro apresenta uma assinatura neurofisiológica automática que é modulável por processamento morfossintático, nossos dados apontariam para modelos que preveem segmentação e combinatorialidade no curso da compreensão de sintagmas e sentenças. A confirmação da hipótese ocorreria caso houvesse aumento de amplitude do pico de atividade elétrica por aumento do número de violações nos estímulos. Ou seja, o estímulo com “2 violações” deveria apresentar pico de atividade maior que o estímulo na condição “1 violação”, este por sua vez eliciando um pico de amplitude maior que na condição gramatical. Este efeito cumulativo poderia ser interpretado como reflexo de acesso aos traços morfossintáticos dos estímulos e uma tentativa falha de combinação deles. Características de latência precoce e topográficas associadas a processamento morfossintático (cf. capítulo 3) indicariam que o efeito é automático e que reflete mecanismos de natureza morfossintática, podendo este efeito ser de MMN sintático, como esperado, ou de processamento diretamente gramatical (*i.e.*, não necessariamente intermediado pelo MMN).

Caso a linguagem seja processada de forma não combinatória, espera-se que isso se reflita nos dados a serem obtidos em nosso experimento. Se a gramática é lexicalizada, conforme proposto pela gramática de construções, então espera-se que as respostas eletrofisiológicas obtidas apresentem características de uma resposta lexical (ver capítulo 3, subseção 3.3.7). Neste caso, a expectativa seria que o MMN ou outras respostas

eletrofisiológicas precoces não-atencionais tenham amplitude média maior na condição gramatical do que nas condições com violação, em decorrência de uma conexão forte entre os neurônios que representariam a construção lexicalizada. Uma outra possibilidade seria que as respostas eletrofisiológicas evocadas apresentassem características temporais e topográficas de um efeito N400, relacionado a memória léxico-semântica, caso em que as construções com violação apresentariam maior negatividade que a condição gramatical, mas não por custo de processamento combinatório, e sim por uma incompatibilidade entre as frases escutadas e as construções já representadas na memória léxico-semântica.

Se o processamento é puramente probabilístico, então a variação no número de violações morfossintáticas nos estímulos não deve resultar em um aumento do efeito morfossintático, já que sintagmas com verbos que violam concordância são igualmente improváveis. Ou seja, na comparação entre um sintagma com uma violação morfossintática (“eu *adota”) e um sintagma com violação combinada (“eu *adotam”), não deveria haver diferença em termos de efeitos obtidos, já que ambos têm probabilidade zero de ocorrer. Em termos eletrofisiológicos, a amplitude evocada pela condição “2 violações” deveria ter nível semelhante (sem diferença estatisticamente significativa) que a amplitude média evocada pela condição “1 violação”. A única forma de um ser considerado mais improvável do que o outro é se levarmos em consideração informações morfossintáticas individuais dos estímulos (neste caso, de pessoa e de número). Dessa forma, mesmo um processamento por probabilidade em decorrência de contexto *sintático* requer conhecimento morfossintático e *parsing* das sentenças.

A seguir, o capítulo 3 apresenta a técnica de extração de potenciais cerebrais relacionados a evento e detalha os potenciais mais relevantes nos estudos de processamento linguístico.

Capítulo 3 – Eletrofisiologia do processamento de linguagem

“Do not be too eager to deal out judgment.”

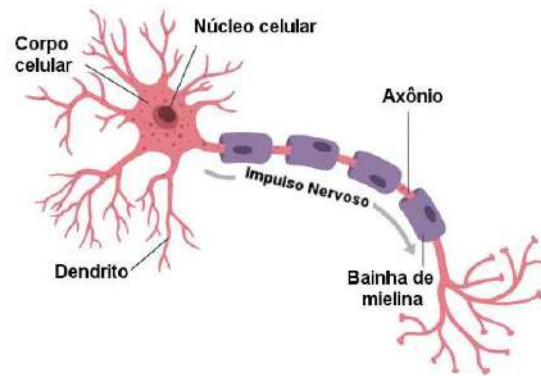
Gandalf, O Cinzento.

Este capítulo introduzirá o equipamento do eletroencefalograma e a técnica de extração de potenciais cerebrais relacionados a evento (*event-related brain potential, ERP*). Também serão apresentados ERPs relacionados a processos cognitivos linguísticos: ELAN, o LAN, o N400, e o P600. A compreensão destes ERPs é chave para a discussão sobre o processamento linguístico pelo prisma da eletrofisiologia do cérebro já que contribuem para os debates sobre os modelos e são parte da discussão sobre o MMN, que será apresentado em seção posterior.

3.1 EEG e ERPs

O eletroencefalograma, equipamento empregado no experimento referente ao presente trabalho, detecta e grava sinais elétricos trocados pelos neurônios. Ao realizar processos cognitivos, os neurônios comunicam-se através desta troca de sinais, que são transportados pelos axônios (“braços” do neurônio que enviam sinais) e atravessam uma pequena lacuna que há entre o axônio e o dendrito (um “braço” menor que recebe sinais) do próximo neurônio, chamada de sinapse. A Fig. 1 mostra a estrutura de um neurônio. Como é na passagem pela sinapse que o sinal se torna detectável, os sinais captados pelo EEG são chamados de pós-sinápticos. Importante ressaltar que não são todos os sinais que podem ser detectados: os sinais elétricos detectados pelo EEG provêm especialmente de células corticais piramidais, cuja orientação é perpendicular à superfície cortical, o que torna sua atividade elétrica mensurável (cf. Luck, 2014). Quando um grupo numeroso de neurônios emite estes sinais, eles se tornam detectáveis no escalpo. A flutuação elétrica é captada por eletrodos posicionados sobre o escalpo em uma touca, com um gel condutor sendo aplicado sob os eletrodos para viabilizar a melhor detecção. Os sinais são enviados para um amplificador – já que os sinais são muito pequenos, precisam ser ampliados –, digitalizados e, por fim, registrados no computador através de um software (em nosso caso, o Pycorder). O equipamento pode ser visto na Figura 2.

Figura 1- a estrutura de um neurônio



Fonte: Mundo Educação UOL

Figura 2 - eletroencefalograma



Fonte: elaboração própria

Um dos grandes benefícios do EEG é sua alta precisão temporal. Isso significa que o equipamento consegue registrar dados a cada milissegundo, o que dá uma vantagem ao EEG contra outras tecnologias, como as de neuroimagem, como a ressonância magnética funcional, que registra dados com alguns segundos de atraso. Para que se tenha uma noção da importância deste ponto, considere o seguinte: há marcadores eletrofisiológicos de processamento linguístico de diferentes processos que ocorrem, cada, em torno dos 150ms, 350ms, 400ms e 600ms após apresentação do estímulo linguístico crítico. Um atraso de 2 segundos, por exemplo, significaria perder a oportunidade de examinar processos específicos ao longo do curso temporal do processamento linguístico.

No entanto, ao contrário da ressonância magnética funcional, o EEG não possui precisão espacial. Em outras palavras, os eletrodos captam sinais que, não necessariamente, estão associados diretamente com a região sobre a qual estão posicionados. A atividade neural detectada pelo EEG pode ter origem em uma fonte cortical (*i.e.*, uma região do córtex que gera a atividade, como o giro frontal inferior esquerdo) que não necessariamente corresponde aos eletrodos em que a atividade é detectada. Mas como determinadas respostas cerebrais comumente são detectadas nos mesmos conjuntos de eletrodos, é viável que se associem respostas neuronais a porções específicas dos eletrodos. Este tipo de análise é chamado de “topografia”.

Um exemplo de análise topográfica, que será explicado em detalhes mais a frente, é a negatividade anterior esquerda (*left anterior negativity*, LAN), uma resposta neuronal que ocorre quando participantes leem ou ouvem sentenças com violação morfossintática (ex.: “a criança *joga vídeo game”) em torno de 350ms após exibição da palavra crítica (neste caso, o verbo “joga”). A resposta surge tipicamente na porção anterior (ou seja, da frente) esquerda dos eletrodos (Molinaro *et al.*, 2011).

Sobre a divisão dos eletrodos, há dois detalhes importantes. Em primeiro lugar, normalmente divide-se a distribuição dos eletrodos por “anterioridade” (“anterior” se o eletrodo está na porção da frente da cabeça, “posterior” se na parte de trás). Em segundo, a distribuição também pode ser dividida por hemisférios (esquerdo ou direito).

Outras características dos picos de atividade que são analisados são a “latência”, a “amplitude” e a “polaridade”. A “latência” diz respeito a uma medida temporal que, no caso do EEG, é feita em milissegundos (Luck, 2014). Picos de respostas neuronais, por exemplo, são tipicamente caracterizados por sua latência (quanto mais se “estica” a duração no curso temporal do pico, maior a latência). Há uma proposta de que o LAN, por exemplo, reflete esforço de memória de trabalho quando tem latência maior (LAN “sustentado”) e, quando a latência é mais curta, reflete processamento morfossintático (LAN “focal”) (Fiebach *et al.*, 2002). O dado de latência permitiria, assim, separar efeitos gerais de memória de trabalho de efeitos linguísticos quando o participante processa, por exemplo, frases agramaticais. A “amplitude” é a força do efeito, a altura do pico de atividade, medida em microvolts no caso de eletroencefalografia. Por exemplo, se o participante tem uma média de respostas de 5 microvolts lendo um tipo X de palavra, e uma média de respostas de 2 microvolts ao ler um tipo Y de palavra, então as palavras do tipo X tem uma resposta média de amplitude maior. Dessa forma, a medida de picos de atividade é relativa ao máximo de amplitude que uma onda

atinge em uma dada janela temporal e em um dado ponto no curso temporal (sua latência). Por fim, a “polaridade” das respostas elétricas pode ser negativa ou positiva.

Para nos manter vivos, o cérebro está em constante atividade. Isso faz com que diversos sinais sejam disparados a todo momento pelos neurônios. Para poder detectar sinais que sejam relacionados a eventos que estão sendo testados, uma técnica chamada “extração de potenciais cerebrais relacionados a eventos” (*event-related brain potentials, ERP*) foi criada (Luck, 2014). Ela consiste em repetir várias vezes um tipo de estímulo, contendo alguma característica que se investiga, para se gerar uma média das respostas a todos os estímulos de interesse, de todos os participantes. Dessa forma, o experimentador é capaz de observar picos de atividade que sejam eliciados pelo evento que almeja. Um exemplo: se o objetivo é ver se palavras morfologicamente complexas (i.e., com mais de um morfema, como “felizmente”) são processadas diferentemente de palavras simples (com apenas um morfema, como “feliz”), o experimentador irá montar listas de palavras que variam quanto à complexidade morfológica. A partir da exibição das palavras (auditivamente ou em tela), o experimentador geraria duas médias das respostas neuronais, a primeira das respostas detectadas durante a exibição das palavras morfologicamente complexas e a segunda das palavras de morfologia simples. As médias são comparadas e picos de atividade nas médias que têm diferença de amplitude ou latência são, então, interpretadas e associadas a processos cognitivos específicos. Estes picos de atividade correlacionados a processos cognitivos são os ERPs. Um outro detalhe relevante é que a medição é *time-locked*, isto é, marca-se temporalmente o momento de início da gravação dos dados de flutuação elétrica em relação ao estímulo que está sendo exibido ou produzido.

Quando um determinado ERP é consistentemente observado em outros estudos com características semelhantes (por exemplo: janela temporal, topografia, morfologia da onda, entre outros), este ERP é denominado um “componente” do EEG (Kutas; Federmeier, 2011). As nomenclaturas variam em estilo, mas comumente há uma letra que indica a polaridade e um número que indica o momento em que ocorre relativo ao início da apresentação do estímulo. Por exemplo, o P600, um componente relacionado à processos de reanálise sintática (Hahne; Friederici, 1999) recebe seu nome por ter polaridade positiva (“P”) e por ocorrer aproximadamente aos 600ms após exibição do estímulo (“600”). O P600 será abordado em detalhes posteriormente. No caso do componente de interesse deste trabalho, o MMN, seu nome se dá pelo tipo de processo cognitivo envolvido e pela polaridade: o pico de atividade ocorre no momento em que há uma incompatibilidade detectada, quando um estímulo desviante (ex.: “bo”) é apresentado após a apresentação de uma série de estímulos repetidos (ex.: “ba”).

A repetição do estímulo, que torna o estímulo padrão, deixa traços de memória, o que gera um efeito de detecção quando de repente é mostrado um estímulo desviante (que ocorre menos frequentemente no experimento) incompatível com os traços de memória gerados pelo estímulo padrão. Por ser esta “incompatibilidade” que elicia a resposta, e por ser negativa, recebeu o nome *mismatch negativity* (MMN, “negatividade por incompatibilidade”).

Nas subseções a seguir, os componentes “linguísticos” mais relevantes para o presente trabalho serão explicados. É relevante frisar que, apesar de haver interpretações funcionais linguísticas para os componentes, há constante questionamento sobre a natureza deles; ou seja, se de fato são especificamente linguísticos ou se refletem, também, outros processos. Por este motivo, acrescenta-se aspas na palavra “linguístico” ao chamar os componentes desta forma. Ademais, outro fator que se deve ter em mente é que grande parte dos experimentos em neurociência da linguagem são feitos a partir de teste de compreensão (*i.e.*, estímulos lidos ou ouvidos), não de produção, o que pode ter implicações para como interpretar os dados obtidos em face de objetivos como elaborar modelos que sejam representativos de como processamos a linguagem.

Um ponto a ser recordado é que o presente projeto de pesquisa visa investigar a ocorrência ou ausência de um componente específico, o MMN sintático. No entanto, a análise do fenômeno linguístico que foi investigado envolve compreender e comparar diferentes componentes, com interpretações funcionais distintas. São eles: o ELAN, o LAN, o N400 e o P600. Primeiramente, segue, então, uma explicação sobre cada um dos componentes conforme sua ordem de ocorrência no curso temporal do processamento linguístico. Em seguida, uma revisão acerca do MMN será apresentada.

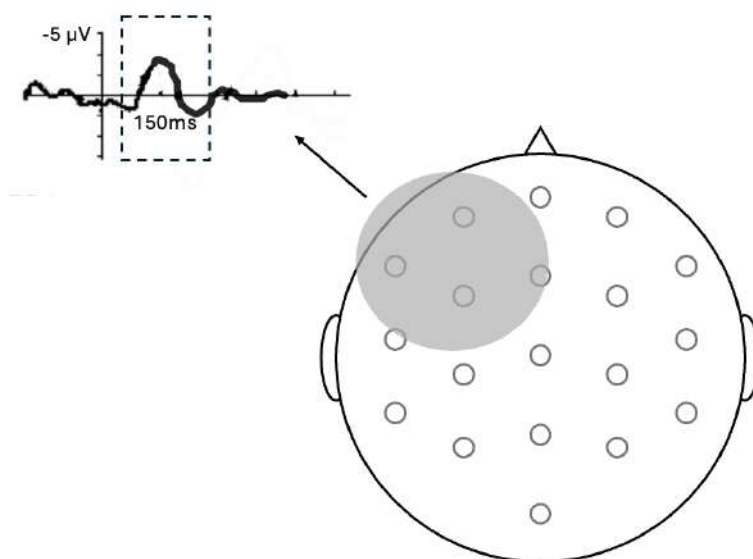
3.2 ERPs “linguísticos”

3.2.1 ELAN

Como será visto em detalhes nas subseções a seguir, dois componentes de EEG receberam bastante atenção da neurociência da linguagem, nas suas primeiras décadas, por tratarem de processamento léxico-semântico (N400) e de efeitos sintáticos (P600). Mas o P600 pode ser considerado um componente já tardio na linha temporal do processamento, ocorrendo em torno dos 600ms após apresentação de um estímulo crítico. Esta subseção apresenta o ELAN, uma resposta neuronal mais inicial associada aos primeiros passos do processamento morfossintático.

A sigla significa *early left anterior negativity* (“negatividade anterior esquerda inicial”), já que ocorre nos eletrodos da porção anterior esquerda do escalpo e tem janela temporal considerada mais inicial com relação ao outro componente de mesma distribuição topográfica, o LAN (a ser detalhado na subseção a seguir), com latência entre 100 e 300ms. A interpretação funcional dada ao componente é de detecção de violação de estrutura sintagmática, sendo considerado um componente de processamento sintático automático, em contraposição com componentes mais tardios que podem envolver processos controlados (Hahne; Friederici, 1999).

Figura 3 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do ELAN.



Fonte: elaboração própria

Em um dos primeiros estudos a reportar o ELAN como efeito de processamento sintático, Friederici, Pfeifer e Hahne (1993) contrastaram sentenças gramaticalmente corretas e incorretas em alemão. As sentenças eram faladas. Na condição em que havia violação de estrutura sintagmática, a violação era provocada por um verbo flexionado na posição em que um substantivo deveria ocorrer, em contexto de sintagma preposicional (e.g., *Der Freund wurde im *besucht*, “o amigo estava no visitado*”, tradução própria, p. 186). A resposta neurofisiológica foi obtida a partir do momento em que o estímulo que provocava a violação era reproduzido em contraste com a reprodução do estímulo crítico em condição sem violação (e.g., “*Der Finder wurde belohnt*”, “O buscador foi recompensando”, tradução adaptada própria). Outro exemplo de estudo é o de Friederici, Hahne e Mecklinger (1996), também em alemão, que mostrou que sentenças como “*Das Metall wurde zur veredelt [...]*” (“O metal foi

no refinado”, tradução adaptada própria) apresentam uma negatividade anterior esquerda inicial após a exibição do estímulo crítico (neste exemplo, o verbo no particípio *veredelt*, “refinado”) que viola a estrutura sintagmática em comparação com sentenças sem a violação como “*Das Metall wurde zur veredelt [...]*” (“O metal foi refinado [...]”, tradução adaptada própria). Dada a janela temporal inicial do componente, o ELAN foi utilizado como evidência favorável a propostas *syntax-first* (sintaxe-primeiro) de processamento linguístico (Friederici, 2002).

Mas como com qualquer interpretação funcional de ERPs, há controvérsias. Por exemplo, Steinhauer e Drury (2012) realizaram uma revisão aprofundada de estudos de ELAN e, dentre várias críticas, uma das que desafiam o caráter automático, temporalmente precoce e independente de efeitos experimentais desta resposta reside na escolha de materiais de alguns estudos de alemão. Nestes estudos, os prefixos determinavam a categoria das palavras críticas que provocavam a violação (e.g., prefixo *ge-* como marca de verbos no particípio). A falta de estímulos em outras categorias com início fonológico semelhante, já que a forma do prefixo *ge-* pode ocorrer no início de palavras de outras categorias, torna viável uma explicação do efeito por criação de estratégia na detecção de violações gramaticais durante o experimento, o que explicaria o efeito encontrado sem precisar recorrer a um processo de *parsing*. Ainda, estudos mostraram um efeito ELAN mais tardio, em torno de 300ms, uma janela temporal próxima do efeito LAN, com estímulos em alemão em que a confirmação da categoria da palavra se dava a partir do sufixo (verbo *veredel-tm*, “refin-ado” versus substantivo *veredel-ung*, “refina-mento”). Isto é, como a confirmação da categoria ocorre no final da palavra, o efeito também é mais tardio, o que poderia desfazer a separação do ELAN e do LAN.

Outra questão apontada por Hasting e Kotz (2008) diz respeito à ideia de que a janela temporal precoce pode estar relacionada não a uma questão de estágio de processamento, mas sim a decisões metodológicas sobre os estímulos. Se a violação gramatical for sintaticamente local, ocorrendo em um mesmo sintagma ou com poucas palavras intervenientes entre os estímulos que violam concordância, então mecanismos de detecção de erro gramatical atuariam mais rápido que em sentenças nas quais a violação ocorresse em dependência de longa distância. Em um estudo com paradigma que almejou testar tanto ERPs de paradigmas convencionais quanto o sMMN, eliciado em paradigma específico, os autores realizaram dois experimentos com violação de concordância (e.g., *er *kegelst*, “ele *joga boliche, tradução própria, p. 1210) e de estrutura sintagmática (e.g., *er *kegel*, “ele *cone”, tradução própria, p. 1210). Houve variação no grau de atenção exigido por cada experimento. Violações de concordância, como será abordado na subseção a seguir, tipicamente eliciam uma resposta

LAN, que é mais tardia e associadas a outros processos morfossintáticos. Os achados dos experimentos mostraram uma resposta negativa em janela temporal semelhante ao sMMN e ao ELAN para ambos os tipos de violação, o que abre espaço para uma crítica à interpretação funcional do ELAN dissociada de respostas mais tardias, como o LAN, sem que haja de fato uma refutação.

A ideia de que violações de concordância locais evocam resposta ELAN também é corroborada pelos estudos de Alekseeva *et al.* (2023) e Alekseeva *et al.* (2024), ambos em russo com violações de concordância de gênero provocadas por sufixo nas palavras. Ambos os estudos apontam, também, para o ELAN como uma resposta automática, ao adotar paradigma experimental com tarefa distratora. No entanto, Alekseeva *et al.* (2024) sugerem que o efeito ELAN reflete processo de *priming* morfossintático, não de detecção de erro.

Um *confound* reportado por Herrmann, Maess e Friederici (2011) é a variação no contorno da frequência fundamental (F0) nos estímulos usados em experimentos prévios de ELAN. As sentenças que apresentavam violação de estrutura também apresentavam mudança na prosódia, tornando-a fora do esperado: a entonação pré-final da sentença (nas sentenças corretas) mudava para uma entonação para o final da sentença nas sentenças agramaticais, assim deixando mais uma pista, além da morfossintaxe. Para investigar a questão, os autores realizaram um teste de magnetoencefalografia (MEG) em que havia sentenças congruentes (*e.g.*, “*Die Küche wurde geputzt*”, “A cozinha foi lavada”, tradução própria, p. 117), sentenças sintaticamente incongruentes com a alteração mencionada no F0 (*e.g.*, “*Das Fenster wurde im *Geputzt*”, “A janela estava na *limpada”, tradução própria, p. 117) e sentenças prosodicamente incongruentes, que eram sintaticamente bem formadas mas apresentavam alteração no contorno da frequência fundamental semelhante ao das sentenças congruentes, com uma entonação ao final da sentença. O material foi o mesmo utilizado em um estudo prévio de eliciação do ELAN. Os autores foram capazes de separar efeitos prosódicos de efeitos sintáticos, ao mostrar que sentenças sintaticamente incongruentes (i) obtinham efeitos maiores de ativação do córtex temporal superior que as sentenças prosodicamente incongruentes na janela entre 110 e 160ms e (ii) apresentavam ativação lateralizada para o hemisfério esquerdo. Como a prosódia pode influenciar o processamento sintático desde estágios iniciais (Eckstein; Friederici, 2006), este achado é relevante tanto do ponto de vista de investigação de processamento linguístico, ao mostrar que há efeitos especificamente sintáticos, quando em relação à interpretação funcional do ELAN.

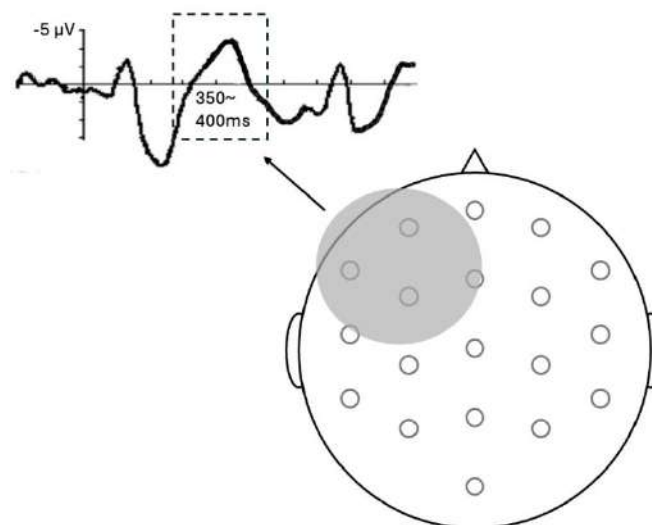
Um outro experimento de MEG realizado por Friederici *et al.* (2000), com estímulos em alemão que apresentam o mesmo tipo de violação de estrutura sintagmática, visou observar

efeitos dos estímulos em termos de fonte cortical. Os autores reportaram efeitos na janela temporal de 130 a 160ms em duas regiões: região fronto-parietal e regiões temporais. Segundo os autores, isso mostra que não somente há contribuição temporal para o ELAN, como também mostrou maior envolvimento do córtex temporal esquerdo do que das regiões fronto-parietais esquerdas.

3.2.2 LAN

Assim como o componente anterior, o LAN é capturado nos eletrodos da porção esquerda anterior e tem polaridade negativa (Molinaro *et al.*, 2011). Por outro lado, sua janela temporal é mais tardia, atingindo seu pico entre 300 e 500ms. Apesar de ter latência próxima a do N400 e a mesma polaridade negativa, os componentes possuem topografia típica distinta: ao passo que o LAN é tipicamente obtido em eletrodos da porção anterior esquerda, o N400 é tipicamente obtido em eletros centrais. Em termos de linguagem, supõe-se que o LAN reflete processamento (morfo)sintático. Como já mencionado, deve-se ter em mente que o LAN também é sensível à efeitos de memória de trabalho, ainda que uma dissociação em termos de latência seja proposta (Fiebach *et al.*, 2002).

Figura 4 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do LAN.



Fonte: elaboração própria

Os primeiros artigos que reportaram efeitos tipo-LAN não cunharam seu nome. Osterhout e Mobley (1995) detectaram uma negatividade esquerda em eletrodos temporais e

parietais, na janela de 300-500ms, em experimento sob paradigma de violação sintática. Esta negatividade era detectada durante a leitura de sentenças no momento em que aparecia uma palavra crítica, em que se detectava a anomalia sintática. Por exemplo, na sentença “*The elected officials *hopes to succeed*” (“Os oficiais eleitos *espera ter sucesso”, tradução própria, p. 742), a agramaticalidade é detectada no momento da leitura do verbo “*hopes*”, que está flexionado conforme a terceira pessoa do singular, razão para a violação. É no momento da leitura desta palavra em específico que se espera detectar a resposta neuronal associada ao processamento morfossintático. E foi neste momento, em sentenças como este e outros tipos de violação, que os autores encontraram um pico de amplitude negativa, na porção anterior esquerda dos eletrodos, além de uma resposta mais tardia, o P600.

No entanto, o P600 (a ser detalhado mais a frente) é uma resposta considerada tardia e associada a processos de reanálise sintática. O LAN, sendo mais precoce, pode ser associado com etapas mais iniciais do processamento morfossintático e de morfologia flexional. Por exemplo, um estudo de Regel *et al.* (2019) realizado em alemão contrastou sentenças em que dois tipos de violações flexionais foram manipuladas: a adição de um afixo simples irregular de plural a palavras que são flexionadas com o afixo regular em contexto acusativo (ex.: “*ohne die *Karton-en*”, “sem as caixas”, tradução própria), contexto em que não há afixo explícito que marca caso, e a adição de um afixo complexo que marca tanto caso dativo quanto plural irregular (ex.: “*mit den *Karton-e-n*”, “com as caixas”, tradução própria). Como a marcação complexa no contexto dativa representa a aplicação de uma marcação de plural via regra (pelo acréscimo de /-n/ após o afixo que marca caso /-e-/), então se esperam efeitos diferenciados no processamento de violação desta condição em comparação com o afixo /-en/ no contexto acusativo, que representaria apenas um afixo. As sentenças lidas com a violação gramatical que exibiam afixos complexos eliciaram um padrão bifásico LAN-P600, ao passo que as sentenças agramaticais com afixos simples eliciaram apenas um P600. Este achado demonstra a sensibilidade do LAN a processos morfossintáticos e decomposicionais. Note-se, no entanto, que outros estudos eliciam LAN com violações de concordância de número com afixos simples (ou seja, que marcam apenas número), como os estudos de Osterhout e Mobley (1995) em inglês e de Leminen *et al.* (2016) em finlandês.

Outros tipos de violação morfossintática também são capazes de produzir um efeito LAN ou tipo-LAN. Por exemplo, o estudo de Cafarra *et al.* (2015) com sentenças lidas, em italiano, encontrou o padrão bifásico LAN-P600 em sentenças com violação de concordância de gênero (ex.: “*Regalò la *diadema prezioso*”, “deu de presente a *diadema precioso”, tradução própria). Outro exemplo é o experimento em mandarim de Hao, Duan e Yan (2022),

que contrastou sentenças sem e com violação sintática pela presença indevida de uma partícula de aspecto. Por exemplo, a partícula “*le*”, que marca a completude de uma ação, é esperada na sentença “*Baba yijing biaoyang le gege he jiejie*” (“o pai já elogiou o irmão e a irmã mais velha”, tradução própria), mas não na sentença “*Baba zhengzai biaoyang *le gege he jiejie*” (“O pai está *elogiou o irmão e a irmã mais velha”, tradução adaptada própria). Os autores reportaram um padrão trifásico ELAN-LAN-P600 a partir da leitura da partícula.

Uma característica dos efeitos LAN ou tipo-LAN é que há certa variabilidade na forma como se apresentam em estudos diferentes. Por exemplo, há casos como o de Isel e Kail (2018), um estudo com sentenças em francês com violações de concordância entre determinante-nome e entre sujeito-verbo, em que as violações eliciaram uma anterioridade negativa bilateral seguida por um P600 e o de Silva-Pereyra e Carreiras (2007) em que violações de concordância de número e pessoa em espanhol produziram uma negatividade distribuída em eletrodos anteriores centrais e do hemisfério direito.

Há algumas ressalvas com relação à natureza funcional do LAN. Um ponto é que o LAN, como mencionado anteriormente, também parece ser sensível a sobrecarga de memória de trabalho. Vários processos podem causar sobrecarga de memória, entre eles o processamento de violação. Desse modo, o efeito pode ser contaminado por uma interação entre memória de trabalho e processamento morfossintático. Ademais, o LAN pode ser um artefato da geração de média quando se apresenta seguido de um P600 (Tanner, 2015) já que a polaridade positiva do P600 que ocorre em uma parcela dos participantes poderia anular parcialmente a negatividade proveniente de uma resposta N400 que ocorre em outra parcela dos participantes, que pode ser mais distribuída, e assim criar uma “ilusão” de negatividade localizada nos eletrodos frontais esquerdos após a geração da média de todo o grupo. Contudo, há réplica a considerar todo LAN como um artefato (Caffarra; Mendoza; Davidson, 2019).

De forma geral, os achados demonstram uma dissociação de efeitos associados ao LAN e ao N400. Primeiramente, há diferença distribucional na topografia. Em segundo lugar, os componentes são diferentes em suas interpretações funcionais, ao passo que o LAN é associado a processamento morfossintático e o N400, a processamento léxico-semântico. Esta dissociação reforça a influência de informações de ordem morfossintática no processamento de sentenças que se diferenciam de efeitos léxico-semânticos.

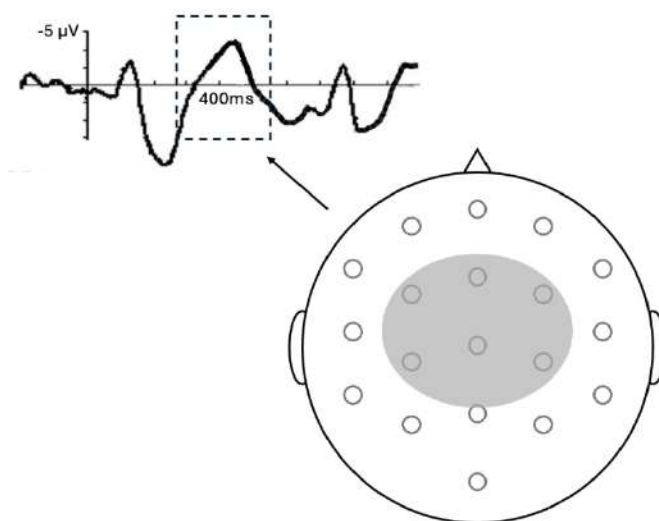
Outra separação importante é entre os efeitos de ELAN e de LAN. Apesar de ambos estarem no domínio da (morfo)sintaxe, o LAN é observado principalmente em estudos com violação de concordância, enquanto o ELAN surge em experimentos em que os estímulos apresentam violação de estrutura sintagmática.

Há duas fontes corticais reportadas para a resposta LAN. Uma delas é no giro temporal superior esquerdo (Service *et al.*, 2007; Leminen *et al.*, 2011), a outra é no giro frontal inferior (Leminen *et al.*, 2016). Ambas as regiões estão associadas a processamento sintático e estudos de violação de concordância.

3.2.3 N400

O N400 é considerado o primeiro componente linguístico. Descoberto por Kutas e Hillyard (1980), o componente é uma onda de amplitude negativa que atinge seu pico em torno dos 400ms após exibição do estímulo e é detectado, principalmente, em eletrodos centrais.

Figura 5 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do N400.



Fonte: elaboração própria

O componente surgiu em um teste que contrastava sentenças semanticamente bem formadas com sentenças semanticamente anômalas. As sentenças eram lidas, palavra a palavra, pelos participantes. Os exemplos 1 e 2 abaixo ilustram este contraste:

(1)

It	was	his	first	day	at	work.
Pronome expletivo	Foi	seu	primeiro	dia	em	trabalho.
Foi seu primeiro dia no trabalho. (Kutas; Hillyard, 1980, p. 203)						

(2)

He	spread	the	warm	bread	with	*socks.
----	--------	-----	------	-------	------	---------

Ele	untou	o	quente	pão	com	*meias.
Ele untou o pão quente com *meias. (Kutas; Hillyard, 1980, p. 203)						

A sentença (1) é bem formada tanto sintaticamente como semanticamente. Já a sentença (2), apesar de sintaticamente bem formada, apresenta uma incongruência semântica: caso seja necessário usar algum objeto para untar um pão, os objetos requisitados seriam uma faca ou uma colher, não uma meia. Aos 400ms após a exibição da palavra crítica (“meias”), houve um pico negativo que não ocorreu após a exibição de palavras em posição semelhante nas sentenças semanticamente congruentes. Por conta deste achado, atribuiu-se a esse pico a interpretação funcional de atividade de integração (ou assimilação) semântica da palavra crítica na sentença.

Investigações posteriores passaram a atribuir outros processos cognitivos ao N400, ora linguísticos, ora não-linguísticos. Três exemplos de outras interpretações funcionais são os trabalhos de França *et al.* (2008), Lavric, Rastle e Clapp (2010) e Lau, Holcomb e Kuperberg (2013).

França *et al.* (2008) investigaram o processamento lexical de palavras que variavam em número de camadas morfológicas (ex.: “pureza” possui duas camadas, “armamento” possui três), comparando as com palavras monomorfêmicas que aumentavam em número de segmentos fonológicos (ex.: “barata”, “problema”, “jaguatirica”). O estudo adotou o paradigma de *priming* transmodal, em que o *prime* era auditivo e o estímulo-alvo, escrito (e.g., par morfológico: puro-PUREZA, par com início fonologicamente semelhante: barata-BATATA). De forma geral, estudos de *priming* se referem a um paradigma em que um estímulo prévio, o *prime*, pré-ative ou facilite o processamento de outros estímulos com os quais dividem alguma relação (semântica ou morfológica, por exemplo), sendo apresentados em pares *prime*-estímulo alvo. Ou seja, primeiro o estímulo *prime* é apresentado e, em seguida, o estímulo alvo com o qual compartilha alguma relação. Os autores encontraram efeitos que apoiam uma interpretação funcional de acesso lexical do N400, ao mostrar modulação do efeito por relação morfológica ou fonológica entre *prime* e alvo, com facilitação para o primeiro tipo de relação. Nos pares com relação fonológica, havia gradação da latência, com estímulos com mais camadas fonológicas obtendo maior latência. Nos pares com relação de identidade (*i.e.*, morfológica), a quantidade de camadas morfológicas (*i.e.*, a quantidade de morfemas) no estímulo-alvo não provocou aumento da latência. Dessa forma, os autores concluíram que a negociação de sentido da palavra – o seu acesso lexical – ocorre no momento da concatenação do primeiro morfema com a raiz, de forma que a palavra já tenha sido acessada e pré-ativada pelo *prime* (e.g., “puro”), levando o N400 a não ter aumento de latência quando o alvo

morfologicamente relacionado era exibido (e.g., “pureza”), mesmo com aumento do número de morfemas (e, por conseguinte, de fonemas). Ou seja, o N400 refletiria a etapa de acesso lexical.

Lavric, Rastle e Clapp (2010) investigaram o processamento morfológico de palavras morfologicamente complexas em contexto de *priming*. Neste paradigma, uma palavra – prime – é exibida antes de outra palavra (a palavra-alvo). No estudo de Lavric, Rastle e Clapp, a relação entre prime e alvo era morfológica (ex.: *teacher-TEACH*, “ensinar-PROFESSOR”), morfológica aparente (*brother-BROTH*, “irmão-CALDO”) ou apenas ortográfica (ex.: *brothel-BROTH*, “bordel-CALDO”). A relação “aparente” se dá por conta da palavra prime poder ser decomposta em uma raiz e um sufixo existentes na língua inglesa, mas cujo significado não é a soma das partes, como no caso da palavra brother. Os autores puderam, através deste desenho experimental, demonstrar influência de processos de segmentação morfológica sobre o N400, indicando que este ERP é sensível a processos morfológicos no curso do processamento lexical.

Já o estudo de Lau, Namyst e Kuperberg (2013) buscou dissociar efeitos de associação, quando a leitura de uma palavra leva à ativação de outra conectada na memória (ex.: a palavra “sal” leva à ativação da palavra “pimenta”), de efeitos de predição, quando para além de pré-ativar a palavra na memória o participante também se compromete com a previsão de sua ocorrência, o que envolveria um grau maior de comprometimento com o que foi pré-ativado. O desenho experimental, que teve por base alteração na proporção de pares de palavras relacionados na lista de estímulos de cada bloco, levou a manipulações do N400, com alterações topográficas a depender do processo que se eliciava. Quando a proporção de pares de palavras relacionadas era de 10% (i.e., 90% dos pares de palavras apresentados não tinham relação semântica), o efeito encontrado foi interpretado como de associação. Quando a proporção de pares de palavras relacionadas era de 50%, houve um efeito diferenciado que foi interpretado pelos autores como de predição. A lógica do estudo é como segue: se há poucos pares relacionados, um processo de pré-ativação de termos relacionados ao prime ocorre, mas se há muitos pares de palavras relacionadas ocorrendo em um bloco do experimento, a leitura dos primes leva ao comprometimento com a ocorrência de palavras relacionadas. Como houve efeitos diferenciados na janela do N400 em cada bloco, os autores interpretaram os resultados como evidência de processos distintos sendo engajados em cada bloco. Desta forma, foi possível para os autores atribuir ao N400 uma interpretação de que o componente indexa, também, processos de predição e associação no processamento da linguagem.

Kutas e Federmeier (2011) reconheceram, em um artigo que atualiza os estudos sobre o N400 após 30 anos de pesquisas, que o N400 estaria relacionado, de forma mais ampla, com

memória léxico-semântica. Isto decorre do fato de que mesmo o reconhecimento de faces e de objetos elicia o N400 (e o modula). Esta interpretação é compatível com uma visão linguística do N400 e amplia a interpretação funcional do componente. Há também a interpretação do N400 enquanto resposta que indexa recuperação de significado da memória semântica (Aurnhammer *et al.*, 2021).

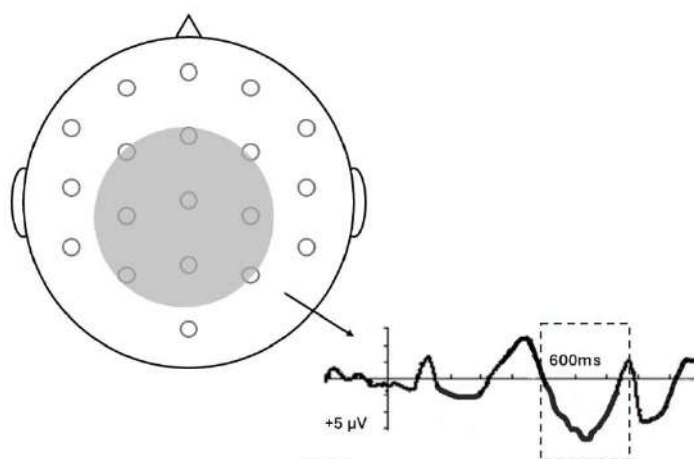
Em termos de fontes corticais, há uma coletânea de áreas que contribuem para o N400. Kutas e Federmeier (2011) reportam estudos que associam o lobo temporal medial anterior, áreas temporais superiores e médias e áreas temporais inferiores, além regiões pré-frontais à geração do N400, além de estudos em que a contraparte magnética do N400 levou à ativação de regiões temporais e da junção temporal-parietal. Os autores mencionam que todas estas regiões pertencem a uma rede distribuída que está envolvida em armazenagem e processos de memória semântica. Uma consideração que se deve fazer é que não somente várias regiões parecem estar implicadas na geração do N400 mas, também, vários processos cognitivos diferentes que tem como ponto comum, possivelmente, ligação com memória semântica eliciam o componente, o que reforça o caráter complexo e de interpretação funcional múltipla do N400.

Um experimento de Lau e Namyst (2019), por exemplo, utilizou imagem por ressonância magnética funcional concomitante à gravação de EEG para rastrear as fontes que contribuem para dois fatores ligados a efeitos no N400: previsibilidade e incongruência semântica. As autoras explicaram que há uma proposta de que os efeitos de incongruência são, na verdade, de predicabilidade. Contudo, o experimento que manipulou essas variáveis reportou que palavras imprevisíveis pelo contexto (ex.: *runny yogurt*, “iogurte escorrendo”, tradução adaptada própria) tiveram maior ativação do giro temporal médio posterior esquerdo em contraste com estímulos previsíveis, ao passo que palavras em contexto semanticamente incongruente (e.g., *innocent bag*, “sacola inocente”, tradução própria) obtiveram maior ativação na região esquerda pré-central/frontal média. O estudo ilustra como o N400, na verdade, reflete uma coletânea de processos cognitivos, com variadas fontes geradoras. Isso é possível pois (i) não é viável dissociar causas subjacentes distintas a efeitos que superficialmente aparentam ser semelhantes e (ii) o sinal coletado pelo EEG no couro cabeludo resulta da soma de atividade de populações neuronais diversas ou de uma população neuronal concentrada.

3.2.4 P600

O P600 é um dos principais componentes associados a processamento linguístico, sendo amplamente replicado. O ERP é uma onda de polaridade positiva que atinge seu pico em torno dos 600ms após estímulo, com topografia típica na porção centro-parietal. O componente é associado a processos sintáticos de integração e reanálise, ainda que, como será reportado, haja efeitos semânticos reportados que produziram um P600.

Figura 6 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do P600.



Fonte: elaboração própria

Osterhout e Holcomb (1992) reportaram inauguralmente o efeito em um estudo de sentenças lidas que contrastou estímulos gramaticais e agramaticais. As sentenças agramaticais no experimento 1 eram formadas por verbos transitivos como “persuadir”, que tipicamente exigem um sintagma nominal como objeto direto, mas que permitem um objeto indireto ocorrer após o verbo quando são parte de uma sentença passiva reduzida (e.g., “*The Woman [who was] persuaded to answer the door...*”, “A mulher [que foi] persuadida a abrir a porta...”, tradução própria, p. 788). Caso a sentença tivesse uma continuação, ela seria gramatical, mas seria agramatical se o verbo principal fosse interpretado como voz ativa e caso não houvesse uma continuação, como uma sentença completa (e.g., “**The woman persuaded to answer the door*”, “**A mulher persuadiu a abrir a porta*”, tradução própria). Segundo os autores, por uma questão de aposição mínima (i.e., a interpretação mais sintaticamente simples), a leitura de “*the woman persuaded*” seria inicialmente interpretada como voz ativa, o que levaria a um efeito de agramaticalidade a partir da leitura do marcador de infinitivo “*to*” já que, na voz ativa, o verbo “*persuade*” deveria ser seguido de um objeto direto. Os autores obtiveram uma onda positiva

em torno de 600ms após a exibição do marcador de infinitivo em sentenças com verbos ambíguos como *persuade* em comparação com sentenças em que não o marcador de infinitivo não poderia provocar agramaticalidade (e.g., *the woman struggled to prepare the meal*, “a mulher teve dificuldade para preparar a refeição”, tradução adaptada própria) e argumentaram que tal resposta separava processos semânticos, como os que eliciaram N400 em estudos prévios, de processos sintáticos, já que o marcador de infinitivo “*to*” seria processado inicialmente como uma violação sintática. Mas como a resposta poderia refletir uma violação de expectativa sobre argumentos verbais, os autores fizeram um segundo experimento em que havia aparente violação de estrutura sintagmática. No Experimento 2, os autores adicionaram uma condição em que a sentença apresentava um verbo auxiliar após uma oração intransitiva que não poderia ser tomada como oração reduzida e seria interpretável (como sentença ativa) apenas até o estímulo que antecedia o verbo auxiliar “*was*” (e.g., “*The man hoped to sell the stock *was sent to jail*”, “O homem esperava vender as ações *foi mandado para a cadeia”, tradução própria, p. 793). Caso o efeito P600 fosse de natureza sintática, de acordo com os autores, então ele também deveria ocorrer após o verbo auxiliar “*was*”, já que não seria possível integrá-lo à estrutura sintática da sentença. Os autores reportaram o P600 após o estímulo crítico e o associaram a um efeito em decorrência de agramaticalidade e *garden-path* sintático.

Mas não somente sentenças agramaticais provocam um P600. Um exemplo de estudo com sentenças gramaticais que obteve um efeito P600 é o de Kaan *et al.* (2000). No primeiro experimento, os autores contrastaram sentenças que variam em palavras-QU (WH-words), como nos exemplos abaixo:

- (3) *Emily wondered who the performer in the concert had imitated for the audience's amusement.*
 (“Emily se perguntava quem o apresentador no concerto havia imitado para entreter a audiência.”, tradução própria, p. 164)
- (4) *Emily wondered whether the performer in the concert had imitated a pop star for the audience's amusement.*
 (“Emily se perguntava se o apresentador no concerto havia imitado uma estrela pop para entreter a audiência.”, tradução própria, p. 164)
- (5) *Emily wondered which pop star the performer in the concert had imitated for the audience's amusement.*
 (“Emily se perguntava qual estrela pop o apresentador no concerto havia imitado para entreter a audiência.”, tradução própria, p. 165)

Os autores previram que haveria um efeito P600 no momento de leitura do verbo *imitated* (“imitado”) em sentenças como a (3) em comparação com sentenças como (4) já que o verbo precisaria atribuir um papel temático de paciente para o pronome *who* (“quem”), com

um número alto de palavras entre elas. Ou seja, ao invés de haver processos de reanálise sintática ou de reparo, haveria um custo por integração sintática dos elementos da sentença, uma vez que a atribuição de papel temático e a combinação do sujeito (“*who*”) com o verbo principal (neste caso, “*imitated*”) só ocorreria após a leitura do verbo principal com muitas palavras intervenientes entre o verbo e o sujeito. Os autores incluíram uma outra condição com a palavra-QU *which* (“qual”) já que por comporem um sintagma referencial (em 5, “qual” tomando “estrela pop” por referente), poderia provocar efeitos diferenciados com relação ao exemplo em (3), já que *who* não seria um pronome referencial (*i.e.*, que não se refere a um referente específico). A previsão, de forma geral, foi que nas sentenças tanto (3) quanto (5) haveria uma onda P600 em contraste com sentenças como (4) no momento de leitura do verbo *imitated*. A previsão foi confirmada, o que, segundo os autores, mostrou um custo de integração sintática, não de reanálise, o que aponta para um P600 relacionado a mais de um subprocesso sintático. Isto é, o P600 refletiu custo de integração dos elementos da sentença.

Há também o chamado “P600 semântico”. Este efeito ocorre em sentenças bem formadas que apresentam uma inversão dos papéis temáticos tipicamente atribuídos aos argumentos. Van Herten, Kolk e Chwilla (2005) utilizaram sentenças do tipo “*De vos die op de stroper joeg sloop door het bos*” (“A raposa que caçou o caçador perseguiu-o através da floresta”, tradução adaptada própria, p. 244). Neste exemplo, a estrutura sintática bem formada atribui ao substantivo “raposa” o papel de agente, ao passo que o “caçador” recebe o papel de paciente. Isso provoca um conflito entre o conhecimento de mundo e o papel obtido pela estrutura da sentença. Ao invés de ocorrer a resposta N400, classicamente associada a sentenças semanticamente anômalas, os autores encontraram um efeito P600. Este efeito de reversão de papel temático foi replicado em outros estudos (*e.g.*, Hoeks, Stowe, Doedens, 2004; Kim; Osterhout, 2005). Este efeito desafia os estudos que utilizavam o P600 como evidência de modelos sintaxe-primeiro, ainda que achados de ELAN e de LAN dialoguem com os últimos, ainda que não sem suas próprias contradições e ressalvas.

Por outro lado, dois experimentos realizados por Gomes e França (2015) em português brasileiro testaram tanto condições de reversão de papel temático (*e.g.*, “O paciente examinou o médico na emergência”, p. 366) quanto de incongruência semântica (*e.g.*, “O médico examinou o lápis na emergência”, p. 366), comparadas com uma condição controle congruente (*e.g.*, “O delegado prendeu o ladrão”, p. 366) com sentenças na voz ativa no Experimento 1 e na voz passiva no Experimento 2. Ambos os experimentos obtiveram respostas N400 na condição de incongruência semântica comparada com a condição controle, efeito que estava ausente na comparação das sentenças com reversão de papel temático com a condição controle.

Por outro lado, o efeito P600 se fez presente no contraste entre sentenças com reversão de papel temático e sentenças congruentes. Este achado pode mostrar a necessidade de mais investigação sobre o efeito e o que subjaz a ele. Paczynski e Kuperberg (2011) também oferecem uma outra abordagem ao P600 encontrado em investigações de reversão de papel temático e o atribuem, na realidade, a um conflito entre (i) a impossibilidade proposicional dos objetos diretos nas sentenças com reversão de papel temático e (ii) a associação semântica próxima entre os argumentos e as palavras de conteúdo no contexto precedente.

Outro aspecto do P600 é que, tipicamente, estudos em paradigma de violação gramatical reportam respostas bifásicas, com um efeito (E)LAN seguido de um P600. Isto mostra como o P600 pode, de fato, refletir processos de reanálise sintática e tentativa de reparo. No segundo experimento do estudo de Barber e Carreiras (2005) os autores utilizaram sentenças em espanhol em duas condições de violação de concordância: de número (*e.g.*, “*Los *piano estaba viejo y desafinado*”, “Os piano* estava velho e desafinado”, tradução própria, p. 151) e de gênero (*e.g.*, “*La *piano estaba viejo y desafinado*”, “A *piano estava velho e desafinado”, tradução própria, p. 151). Dois apontamentos interessantes do estudo dizem respeito às variações no P600, com efeito mais forte para sentenças com violação de gênero e alterações topográficas a depender da fase (*i.e.*, “parcela”) do P600 que, neste estudo, foi dividido em dois (P600a, entre 500 e 700ms, e P600b, entre 700 e 900ms). O “P600a” teve efeitos em eletrodos anteriores e posteriores, enquanto o “P600b” teve efeito mais concentrado em eletrodos centrais e posteriores no hemisfério direito, o que ilustra a complexidade de caracterização e interpretação funcional de componentes de EEG. As duas fases do P600 foram detectadas nos dois tipos de violação, com a violação de concordância de gênero exibindo efeitos mais positivos nos eletrodos da região central direita e da região posterior. Estudos como este atribuem, na resposta bifásica, uma falha de *parsing* sintático inicial que se reflete no efeito LAN enquanto ao P600 subjaz a tentativa de reanálise sintática. Outros estudos (morfo)sintáticos em paradigma de violação também encontraram efeitos bifásicos LAN-P600 (*e.g.*, O’Rourke; Van Petten, 2011; Havas; Rodríguez-Fornells; Clahsen, 2012; Molinaro *et al.*, 2015; Isel; Kail, 2018; Hao; Duan; Yan, 2022).

Assim como todos os componentes de EEG, incluindo os “linguísticos”, o P600 passa por diferentes propostas e questionamentos de interpretação funcional. O próprio experimento de Kaan *et al.* (2000) foi desenhado para testar a hipótese de que o P600 refletia reanálise sintática em sentenças com o fenômeno que estudaram, e demonstraram que o P600 também reflete processos de integração sintática. Há também a interpretação de que o P600 reflete integração semântica (Brower; Fitz; Hoeks, 2012; Aurnhammer *et al.*, 2023) ou anomalias

pragmáticas, ainda que com diferenças distribucionais e de oscilação neuronal em comparação com casos de violação sintática (Regel; Meyer; Gunter, 2014). Outra questão é sobre a noção de o P600 ser exclusivamente linguístico, já que ele também fora observado em estudos sobre violação de regras em música (*e.g.*, Featherstone *et al.*, 2013) e matemática (*e.g.*, Núñez-Peña; Honrubia-Serrano, 2004).

Há também críticas a interpretações de que o P600 funcione como um componente em si. Sassenhagen e Bornkessel-Schlesewsky (2015) testaram a hipótese de que o P600 é, na realidade, uma resposta P3. Os autores explicam que o P3 é uma resposta elétrica que reflete a reorientação cortical com base em captação de atenção por algum elemento nos estímulos. No caso de sentenças, o que poderia ocorrer é que o cérebro aguarda até processar suficientemente o estímulo até que todos os aspectos críticos sejam reconhecidos, de forma que o P3 tenha latência com início mais tardio. Uma forma de encontrar indícios de que o P600 possa ser um P3 é testar se o primeiro compartilha uma característica do segundo: o P3 aumenta em latência conforme aumenta o tempo de reação em tarefas comportamentais, o que não ocorre, por exemplo, com o N400, um componente cuja latência está ligada ao início do estímulo.

Com este objetivo, Sassenhagen e Bornkessel-Schlesewsky desenharam um experimento que comparou processamento de faces, no intuito de eliciar o P3, e de sentenças, para eliciar o P600, com violação sintática de concordância de gênero (*e.g.*, “*Zur Kategorie Obst gehören das *Birne, der Apfel und die Mango*”, “À categoria fruta pertencem o *pêra, a maçã e a manga”, tradução própria, p. 7), semântica (*e.g.*, “*Zur Kategorie Obst gehören die Birne, der *Vogel und die Mango*”, “À categoria fruta pertencem a pêra, o pássaro e a manga”, tradução própria, p. 7) ou violação combinada (*i.e.*, tanto semântica quanto sintática). A análise mostrou que tanto o P600 estava alinhado ao tempo de reação na tarefa, o que leva os autores a sugerirem que seus achados corroboram com a hipótese de P600-como-P3, ainda que não tenham conseguido demonstrar inteiramente que ambos são o mesmo componente. Os próprios autores apontam como isto pode representar um desafio para o P600 enquanto uma resposta que indexa processamento de alto nível, já que uma reorientação cortical em decorrência de estímulos que atraem a atenção seria um processo de baixo nível.

No entanto, em um estudo anterior que eliciou P600 em sentenças *garden-path*, Friederici *et al.* (2001) encontraram dois efeitos de polaridade positiva tardia separáveis por topografia, um na região central-posterior que exibia similaridades com o P300, relacionado a domínio cognitivo geral, e um na porção occipital que os autores sugeriram ser de domínio específico (*i.e.*, um efeito P600 relacionado a processamento sintático). Os autores sugeriram

que características topográficas sejam utilizadas no desmembramento de efeitos P600, já que a este parecem subjazer múltiplas influências e subprocessos.

Um outro estudo de Frisch *et al.* (2003) investigou a elicitação de P600 e P300 em pacientes afásicos com lesões ou no gânglio de base ou temporal-parietais. Dois experimentos foram realizados: um no paradigma de *oddball* (ver seção 3.3.2 para definição) e um de apresentação auditiva de sentenças com violação de flexão. Ambos os grupos obtiveram uma resposta P300 no experimento de *oddball*, mas apenas o grupo com lesão temporal-parietal obteve efeitos P600 no experimento de compreensão de sentenças. Isto permite dissociar dos potenciais elétricos, de acordo com os autores, ao mostrar como a lesão no gânglio de base afetou seletivamente apenas o P600, mas não o P300. Os dois últimos estudos citados mostram que o P600 ocorre como efeito por si, não apenas como um P300 em janela tardia, contudo sem que se exclua a possibilidade de contribuição do P300 para efeitos P600 em determinados contextos.

Voltando ao âmbito de estudos de linguagem, ao passo que na década de 1990 o P600 era considerado como evidência de estágio inicial de processamento sintático, os estudos eletrofisiológicos com MMN sintático (a ser abordado na seção seguinte), ELAN e LAN mostram que há outros componentes que refletem processos (morfo)sintáticos mais precoces temporalmente. Além disso, há o fato de que, comparado a estes outros ERPs, o P600 é mais sensível, por exemplo, a efeitos de atenção (Contier *et al.*, 2022) e tarefa (Schacht *et al.*, 2014). Com o passar do tempo, o P600 passou a ser associado a processos cognitivos mais conscientes, controlados, e menos automáticos (Hahne; Friederici, 1999; Contier *et al.*, 2022). Isto reforça a importância de contribuir para a caracterização dos componentes mais iniciais e de estudos que os eliciam.

O P600 apresenta muitas interpretações funcionais e variações em apresentação temporal e topográfica. Não é surpreendente, portanto, que também haja certa variabilidade em fontes corticais reportadas para o (ou “os”) P600. Brouwer e Hoeks (2013) propõe, a partir de uma lista de critérios funcionais, que o P600 é gerado no giro frontal esquerdo enquanto epicentro de integração semântica, mas sem apresentar um experimento próprio. Shen, Fiori-Duharcourt e Isel (2016), a partir de uma análise de fonte cortical com base em dipolos, apontam o córtex cingulado anterior como fonte geradora. Isso violou suas expectativas de encontrar fontes no giro frontal inferior esquerdo para efeitos de sintaxe e no giro temporal superior esquerdo para efeitos semânticos o que, segundo os autores, poderia refletir um P600 que indexa mecanismos mais gerais de monitoramento de conflito e reinterpretação semântica. Gonda *et al.* (2020) empregaram tomografia eletromagnética de baixa resolução, também

conhecida como “LORETA”, uma técnica de reconstituição de fonte cortical para localizar as fontes geradoras do P600 e seus resultados apontaram para duas áreas do lobo temporal, nos giros médio e superior. Em um experimento com MEG, Service *et al.* (2007) encontraram ativação bilateral no córtex temporal superior para efeitos P600 que não eram sensíveis a efeitos semânticos, mas sim a efeitos de violação de estrutura sintática, e em partes posteriores do lobo temporal (em contraste com fontes geradoras do N400). Estes estudos representam apenas uma parte das investigações que, com diferentes técnicas, buscam fontes corticais para os P600, uma tarefa complexa devido às múltiplas interpretações funcionais dadas ao componente e suas variadas distribuições topográficas na literatura.

Na seção seguinte, abordar-se-á o MMN, componente de principal interesse para o presente trabalho. Até este ponto, a revisão de ERPs foi um passo necessário para que, em seguida à seção de MMN, seja viável discutir o processamento combinatório no cérebro a partir de sua eletrofisiologia e como o MMN pode ser informativo no contexto maior de ERPs.

3.3 Mismatch negativity (MMN)

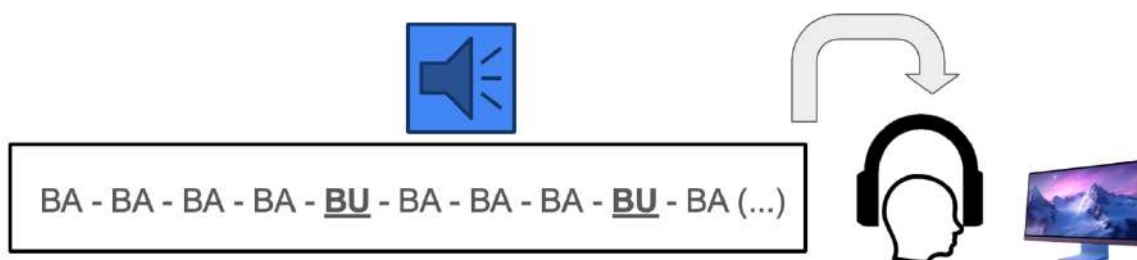
3.3.1 Origem e aspectos característicos

Em 1978, um neurocientista chamado Risto Näätänen e colegas se propuseram a retestar um componente conhecido como N1 que havia sido registrado por Hillyard e colegas em 1973. O N1 parecia ser resposta eletrofisiológica associada a processamento de informações sensoriais que, no experimento de Hillyard *et al.* (1973), foi associado com uma forma precoce de seletividade de atenção. Para chegar a esta conclusão, Hillyard e colegas realizaram um experimento em que os participantes escutavam fluxos de sons diferentes em cada lado dos ouvidos, através de um fone. Os participantes eram instruídos a prestar atenção apenas no ouvido esquerdo em um bloco, e no direito em outro. Quando sons que se desviavam de um padrão repetido ocorriam, os participantes deveriam apertar um botão, mas apenas quando este som desviante ocorria no ouvido que os participantes eram instruídos a direcionar sua atenção. Isto garantia que os participantes não dessem atenção, de fato, ao outro ouvido. Um aumento do N1 foi detectado no ouvido com atenção, o que, segundo os autores, refletia um mecanismo de atenção seletiva.

Mas Näätänen *et al.* contestaram esta interpretação e realizou um estudo semelhante, com a mesma tarefa e as mesmas instruções. Os estímulos foram tons que variavam em

frequência: o estímulo padrão era um tom de 1000Hz repetido diversas vezes, com um “sinal” (em estudos futuros, conhecido como “estímulo desviante”) de 1140 Hz que ocorria intermitentemente. As conclusões acerca da modulação do N1 no estudo de Näätänen *et al.* (1978) não são relevantes neste momento. Para os fins desta tese, o que é de maior interesse é que, sem que o autor tivesse essa expectativa, Näätänen *et al.* perceberam uma resposta diferente do N1 no momento de reprodução do estímulo desviante tanto no ouvido ao qual os participantes não direcionavam sua atenção quanto no outro: uma negatividade posterior ao N1, que ele apelidou de *mismatch negativity*. O MMN foi associado à detecção de uma incompatibilidade entre o traço de memória formado de um estímulo acústico repetido e um estímulo processado naquele momento (o “desviante”). Este pico de amplitude negativa, detectado principalmente em eletrodos temporais neste estudo, compreendia a janela temporal que iniciava anterior ao pico do N1 e finalizava na janela do N2 (duração aproximada de 200ms, em uma janela aproximada entre 50 e 250ms). Em estudos futuros, como será mencionado posteriormente, o MMN passa a ser detectado tipicamente em eletrodos frontais, entre 100 e 250ms após início do estímulo ou após ponto em que estímulos desviantes se diferenciam dos estímulos padrão.

Figura 7 - exemplo ilustrativo de paradigma experimental em estudo de MMN. Primeiro, há formação (não atencional) de uma regularidade pelo participante (a repetição do estímulo “BA”) que é interrompida por estímulos raros que desviam do regular (“BU”)

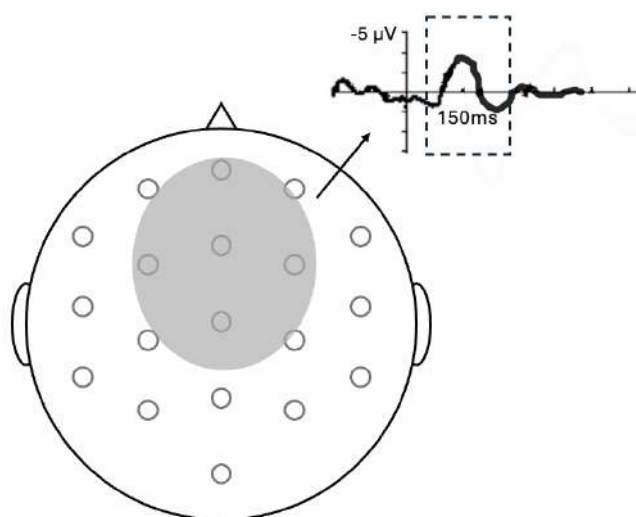


Fonte: elaboração própria

A partir de 1978, muitos estudos se dedicaram a caracterizar e replicar o MMN. O componente também é detectável em testes de MEG, neste caso podendo ser chamado de *mismatch magnetic field* (“campo magnético por incompatibilidade”). Segundo Näätänen *et al.* (2007), o componente é detectado em eletrodos fronto-centrais e centrais no escalpo, com seu pico de amplitude ocorrendo entre 150-250ms após detecção do desvio ocorrido no estímulo desviante comparado com o estímulo padrão repetido. Há também, de acordo com o autor, respostas análogas nas modalidades visual, olfatória e somatosensória. De forma geral, sua

interpretação funcional está ligada à formação de um traço de memória sobre um dado estímulo. A título de ilustração, se em um dado experimento de EEG um participante escuta repetidas vezes a palavra “caro” e, intermitentemente, a palavra “cato”, uma resposta MMN surgiria em torno dos 150ms após o fonema onde o estímulo desviante se diferenciou do estímulo padrão (a partir do início da segunda sílaba). O momento de ocorrência do [t] no estímulo desviante seria considerado o “ponto de desvio”, nomenclatura dada na literatura, do qual decorre um processo de discriminação entre a memória formada e o novo estímulo processado. Neste caso, um aspecto fonológico modularia o MMN que é sensível a variados tipos de manipulação. Há outros paradigmas que permitem a elicitação do MMN: no exemplo dado, apenas um tipo de traço foi manipulado (fonológico), mas há um outro paradigma que permite a manipulação de vários traços, a ser detalhado posteriormente.

Figura 8 - exemplo ilustrativo sobre latência e topografia do MMN.



Fonte: elaboração própria

Ainda no âmbito acústico (não linguístico), descobriu-se que o MMN é modulável por um grupo de fatores sonoros. Dentre elas, estão variações no *pitch*, na duração, na frequência, na intensidade de um determinado som e até mesmo na localização percebida do som (Pakarinen *et al.*, 2007; Näätänen *et al.*, 2007). Por exemplo, Sams *et al.* (1985) testou a discriminação auditiva por frequência reproduzindo uma sequência de sons que variavam apenas neste aspecto. Cada bloco do experimento contou com um estímulo-padrão de 1000hz de frequência, repetido diversas vezes, e um estímulo desviante com frequência maior (1002, 1004, 1008, 1016 ou 1032hz), este repetido com menor probabilidade. Dois testes foram realizados em dias diferentes, um em que os participantes eram instruídos a ignorar os

estímulos (e liam revistas em quadrinho) e outro em que os participantes realizavam uma tarefa de detecção dos estímulos desviantes. Isto permitiu que os autores determinassem se a resposta obtida na condição de ignorar os estímulos era, de fato, um MMN, distinto de uma outra resposta neuronal também esperada em testes de discriminação auditiva, com janela temporal muito próxima, mas que é encontrada em testes com discriminação consciente dos estímulos, o N200. Os autores reportaram (i) que houve ERPs relativos à detecção da mudança de frequência, mas apenas quando o estímulo desviante tinha frequência de 1016 ou 1032hz e (ii) que diferenças de latência e topografia nos ERPs encontrados em cada experimento (condição de ignorar vs. condição com tarefa de discriminação) apontavam para componentes distintos, com o MMN no experimento da condição ignorar e um N200 no experimento com tarefa de discriminação.

Outro apontamento a ser feito a partir destes resultados é que o MMN necessita que os estímulos sejam discrimináveis o suficiente para que eles possam ser detectados quando a atenção estiver direcionada a outro estímulo (cf. Näätänen *et al.*, 2007). A partir da descoberta da sensibilidade do MMN a uma gama de traços acústicos e do fato de que não requer atenção dos participantes (*i.e.*, potencialmente refletindo processamento automático), experimentos com propósitos clínicos passaram a utilizar a elicitação do MMN com variações acústicas, como a de frequência, em crianças com implantes cocleares (*e.g.*, Watson *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2014), adultos com implantes cocleares (*e.g.*, Lonka *et al.*, 2013), recém-nascidos e fetos (*e.g.*, Draganova *et al.*, 2005; Partanen *et al.*, 2013) e até mesmo pacientes em coma (*e.g.*, Herrera-Diaz *et al.*, 2023).

Mas não somente traços sonoros modulam o MMN. O componente também é modulado por aspectos mais abstratos dos estímulos, como regularidades abstratas. Imagine-se uma sequência de tons em que os tons são descendentes, mas, em dado momento, há uma repetição de um dos tons. Neste caso, haveria um MMN em resposta à detecção de mudança na regra formada na memória (Paavilainen, 2013). Ou seja, o córtex auditivo formaria um traço de memória não apenas dos estímulos, mas da regularidade percebida na reprodução da sequência de estímulos, de forma que, quando esta regularidade fosse violada, haveria uma resposta neuronal ao conflito entre o estímulo e o traço de memória formado.

A distribuição do MMN e suas fontes geradoras também variam com relação ao processo cognitivo subjacente e à natureza do estímulo que está sendo processado. Quando há detecção de mudança pré-perceptual, há um MMN bilateral supratemporal, ao passo que uma mudança involuntária de atenção geraria um MMN frontal predominantemente no hemisfério direito (Näätänen; Kreegipuu, 2012). Ainda, caso o MMN seja em resposta a estímulos

linguísticos, por exemplo, aponta-se para uma predominância hemisférica esquerda em decorrência da natureza do estímulo (Pulvermüller; Shtyrov, 2003; Shtyrov; Pihko; Pulvermüller, 2005), mas ressalta-se que outros estudos não reportaram efeitos de lateralização para linguagem (MacGregor; Shtyrov, 2013; Hanna *et al.*, 2016).

3.3.2 Aspectos metodológicos de eliciação do MMN

Há condições específicas que precisam ser criadas para que o MMN possa ocorrer e para que não haja atenuações do efeito. Um dos principais pontos diz respeito à probabilidade de ocorrência do estímulo desviante. Como já explicitado, o MMN é uma resposta que ocorre em resposta a um estímulo desviante, isto é, que desvia da repetição de um determinado estímulo considerado padrão. Para que o experimento obtenha o ERP, a proporção ideal e mais típica de estímulos padrão é em torno de 80%/20% (Näätänen *et al.*, 2007; Duncan *et al.*, 2009). Ou seja, do total de repetições dos estímulos, 80% deve ser de repetições do estímulo padrão, e 20% de estímulos desviantes. Por exemplo, se um experimento almejar testar o processamento fonético manipulando o traço de vozeamento, com um estímulo padrão [ba] e um estímulo desviante [pa], com 1000 repetições total dos estímulos, o ideal seria haver ao menos 800 repetições de [ba] e 200 repetições de [pa]. Caso haja alteração nesta proporção, com maior probabilidade de o estímulo desviante ocorrer, a amplitude do MMN cairia.

Há também um mínimo de estímulos desviantes recomendado para cada condição testada de 150 repetições. Há, contudo, variação. MacGregor e Shtyrov (2013), por exemplo, em um estudo sobre processamento morfológico, utilizaram 100 repetições de cada tipo de desviante. Em um estudo sobre variação de stress e efeitos de gramaticalidade, Coopmans *et al.* (2022) utilizaram apenas 40 desviantes em cada condição. Ressalta-se que a probabilidade do estímulo padrão, ainda assim, foi mantida acima de 0.8 em ambos os experimentos.

Ainda com relação à quantidade de estímulos, cabe ressaltar um contraste entre o MMN e experimentos em outros paradigmas mais tradicionais de estudos de ERP. Em um estudo de ERP tradicional, o experimentador empregaria vários estímulos que compartilham uma determinada característica, mas evitaria empregar os mesmos exatos estímulos, que poderiam afetar as respostas neuronais obtidas quando cada um deles é reproduzido ao longo do teste. Por exemplo, se no experimento de França *et al.* (2008) a palavra “batata” fosse reproduzida duas vezes, os participantes poderiam ter um efeito N400 reduzido na segunda reprodução que não teria relação com maior ou menor facilidade de processamento em decorrência de

propriedades fonológicas ou morfológicas do estímulo, mas sim pela facilitação em decorrência da repetição da palavra (um efeito de habituação ou *priming* por repetição). Idealmente, ainda incluir-se-ia uma lista de estímulos distratores para evitar que os participantes percebessem as condições que estavam sendo controladas. Por isso, em experimentos linguísticos, opta-se por incluir palavras, sintagmas e sentenças diferentes, sem repetição ou com baixa repetição.

O MMN segue uma lógica oposta: o participante deve ter formado um traço de memória do estímulo padrão, forte o suficiente para que a detecção passiva (sem direcionamento de atenção) do estímulo desviante elicie uma resposta. Logo, o mesmo estímulo deve ser repetido muitas vezes. Como isso restringe a variedade de estímulos que podem ser incluídos em um experimento, testes de MMN devem contar com ainda mais replicação que experimentos de ERP mais convencionais. Isso permitiria que seus achados possam ser generalizáveis. Do contrário, os dados podem ser vistos como restritos ao pequeno subgrupo de estímulos de um dado experimento. Também não há estímulos distratores em experimentos de MMN no mesmo sentido que de outros experimentos, apenas a tarefa que deve redirecionar a atenção do participante (*e.g.*, assistir a um filme mudo).

Outro cuidado com relação aos estímulos diz respeito ao intervalo entre estímulos (*interstimulus interval*, ISI). O ISI corresponde ao tempo entre o fim de um estímulo e o início de outro. Por exemplo, em um experimento com estímulos auditivos, se, após a palavra “pureza” ter terminado de sair do fone de ouvido, houver um período de 500ms até que a palavra seguinte começa a ser reproduzida, ter-se-ia um ISI de 500ms. Duncan *et al.* (2009) recomendam que o estímulo tenha duração entre 500-1000ms no paradigma tradicional e 500ms em um paradigma otimizado (também conhecido como *multi-feature*). Este detalhe é importante já que se o ISI for curto demais, o participante pode agrupar os estímulos em um bloco no traço de memória formado (Näätänen *et al.*, 2007).

A título de ilustração, retome-se a proposta anterior de analisar o processamento do traço de vozeamento contrastando dois segmentos, [pa] e [ba]. Imagine-se que o intervalo entre a reprodução dos estímulos é muito curto, de forma que o participante escute rapidamente os estímulos e, por vezes, eles sejam processados da seguinte forma: [pa – pa – papa – papapa – papa]. Poderia haver dificuldade de separar os estímulos e processar, ainda que de forma pré-atencional, apenas o segmento [pa] como o estímulo padrão. Assim, ao invés de um traço de memória ser formado do segmento [pa] que, contrastado com [ba], discrimina-se apenas o traço de vozeamento, o participante poderia agrupar na memória o segmento [papa], que se diferencia do estímulo desviante em outros aspectos além de vozeamento. Se o estímulo padrão

varia em mais de um fator do estímulo desviante, torna-se inviável correlacionar respostas neuronais obtidas à manipulação investigada.

Outro cuidado relacionado diz respeito à randomização dos estímulos desviantes. É possível que a memória do participante agrupe os estímulos padrão com o desviante na formação do traço de regularidade se os estímulos forem apresentados rapidamente e sem pseudo-randomização da ocorrência do desviante (e.g., o desviante ocorrer sempre uma vez a cada três ocorrências do estímulo padrão). Assim, um único bloco seria formado, anulando um possível efeito de MMN, já que haveria apenas a repetição apenas de estímulo padrão percebido. Por exemplo, imagine-se que o estímulo padrão é [pa] e o estímulo desviante é [ba] e, em um dado experimento, o estímulo desviante ocorra sempre a cada três repetições de [pa] (e.g., [pa], [pa], [pa], [ba]...). O participante, ao invés de formar na memória uma representação do estímulo padrão como [pa], poderia formar na memória uma representação do estímulo padrão como [papapaba] já que essa seria uma sequência constante.

O ISI também não pode ser demasiado longo por dois motivos. Primeiramente, para não dificultar a formação do traço de memória. Em segundo lugar, para que não resulte em um experimento longo demais, já que experimentos de MMN requerem, tipicamente, mais de 1000 estímulos por condição padrão.

Há dois principais paradigmas adotados na literatura de MMN: o de *oddball* e o *multifeature*. O paradigma de *oddball*, mais tradicional, envolve incluir uma condição desviante em cada bloco, com repetições intermitentes e raras do estímulo desviante em meio aos estímulos padrão. Por exemplo, a cada três ou quatro repetições do estímulo padrão, reproduz-se uma vez o estímulo desviante, seguindo a proporção típica de (aproximadamente) 80% de repetições do estímulo padrão e 20% de repetições do estímulo desviante. Mas este paradigma pode ser custoso em termos de duração do experimento caso haja o objetivo de testar mais de uma condição, pois seria necessário ao menos um bloco para cada. Por exemplo, se no caso ilustrativo anterior o experimentador almejasse testar, além do processamento do traço de vozeamento ([pa] vs. [ba]), efeitos de alteração da vogal ([pa], [po], [pe], [pi]), seriam necessários ao menos quatro blocos adicionais com em torno de 1200 estímulos, em que cada bloco um dos segmentos seja o estímulo desviante.

Uma outra opção é o paradigma *optimum* ou *multi-feature* (Näätänen *et al.*, 2004; Partanen *et al.*, 2011), em que se reduz a quantidade total de estímulos padrão e sua probabilidade e se aumenta a quantidade de tipos de desviante, sem que haja acréscimo na probabilidade ideal de ocorrência dos desviantes. Um exemplo seria um experimento em que o segmento [pa] ocorre com probabilidade de 60%, e os estímulos desviantes [ba], [po], [pe] e

[pi] com probabilidade de 10% cada. Este paradigma permite que um mesmo experimento teste mais condições em um único bloco, com menos tempo máximo que no paradigma de *oddball*. Apesar de ter sido testado inicialmente em experimento com estímulos acústicos não linguísticos, o paradigma também pode ser adotado em experimentos linguísticos (e.g., Partanen *et al.*, 2011; Hanna *et al.*, 2016).

Dentre os cuidados na elaboração da lista de estímulos está o controle de aspectos acústicos. O MMN é uma resposta neuronal que decorre de informações auditivas e é sensível a variações nelas, conforme já fora exposto. Para os fins do estudo nesta tese, é, por exemplo, relevante considerar o seguinte: o pesquisador que almeja contrastar gramaticalidade pela adição de um afixo, por exemplo, deve evitar que haja diferenças acústicas até o ponto de desvio entre estímulo padrão e desviante e, mesmo após o ponto de desvio, a diferença acústica deve estar reduzida ao máximo. Em um estudo que contrastou pequenas sentenças gramaticais e agramaticais, Pulvermüller e Shtyrov (2003) empregaram os estímulos *we come* e *we *comes* (respectivamente, “nós vimos” e “nós *vem”). Os dois estímulos ocorreram tanto como padrão quanto como desviante, em experimentos separados (*i.e.*, em um dos experimentos, *we come* foi o estímulo padrão e *we *comes*, o desviante). Note-se que os estímulos são exatamente iguais até o ponto de desvio, com ausência de morfema na sentença gramatical e acréscimo do morfema “-s” na condição agramatical. Os autores encontraram o efeito de MMN almejado, com amplitude maior quando o estímulo agramatical era o desviante. Mas se alterações acústicas não linguísticas provocam o MMN, então como isolar os *confounds*? Os autores também incluíram uma condição em que as palavras “*come*” e “*comes*” ocorriam sem contexto prévio, isolada, de forma que não poderiam exibir efeitos de gramaticalidade. Apenas a modificação fonológica não foi suficiente para gerar um efeito MMN maior por um dos estímulos: houve um efeito MMN semelhante quando *come* era desviante e quando *comes* era desviante. Logo, se há um MMN maior quando “*we *comes*” é o desviante comparado com a condição em que “*we come*” é desviante, então a amplitude maior só poderia ser explicada pelo efeito de processamento sintático.

Uma outra forma de reduzir efeitos acústicos é pelo chamado “MMN de identidade” (Pulvermüller; Shtyrov, 2006). O MMN clássico é obtido pela subtração de duas médias de atividade elétrica: a média relativa aos estímulos desviantes menos a média relativa aos estímulos padrão. Ou seja, subtrai-se a média das respostas obtidas quando o estímulo desviante é reproduzido da média das respostas obtidas quando o estímulo padrão é reproduzido. Neste caso, a subtração se dá entre médias referentes a estímulos que variam acusticamente, mesmo que pouco (ex. *come* e *comes*). O “MMN de identidade” segue outra lógica: a subtração que

ocorre é das médias relativas ao mesmo estímulo quando ele é padrão em um bloco, e quando ele é desviante em outro. Dessa forma, a subtração se dá entre respostas a estímulos idênticos que ocorreram em condições diferentes, e, posteriormente, compara-se o MMN de identidade de uma determinada condição e o MMN de identidade de outra condição. Neste caso, não se exclui inteiramente a possibilidade de um MMN acústico, mas se reduz o impacto de características físicas que podem incorrer em efeitos na janela do N1, uma resposta negativa sensorial que tem janela próxima ao MMN. Para minimizar ao máximo potenciais efeitos de propriedades acústicas e fonológicas do estímulo, o presente experimento adotou um desenho experimental em que é viável calcular o MMN de identidade para duas das três condições (“gramatical” e “1 violação”).

Há dois pontos com relação a ordem de estímulos aos quais o experimentador deve se atentar. Primeiramente, sugere-se que cada bloco do experimento comece com um número grande de repetições do estímulo padrão sem que haja ocorrência do desviante, tipicamente em torno de 10 repetições do estímulo padrão no início do bloco, garantindo a formação do traço de memória. A partir de então o experimentador inclui repetições raras do estímulo desviante sem que o desviante seja repetido duas vezes consecutivas, com pelo menos três estímulos padrão ocorrendo entre cada desviante no caso do paradigma *oddball*. A repetição consecutiva do estímulo desviante pode levar a uma atenuação do efeito de MMN (Näätänen *et al.*, 2007).

3.3.3 MMN: tarefas distratoras adotáveis e impacto no componente

0

Parte do que torna o MMN especial é o fato de que ele é um componente que não requer atenção do participante, de forma a refletir processamento automático e independente de atenção. Para garantir que a atenção do participante não esteja direcionada aos estímulos, algumas tarefas podem ser adotadas. Uma das mais comuns é assistir a um filme mudo: enquanto os estímulos são reproduzidos auditivamente, o participante assiste a um filme sem som. O experimentador pode realizar perguntas sobre o filme como forma de garantir que o participante está concentrando sua atenção no filme. Apesar de estudos de MMN colocarem legendas nos filmes mudos, grande parte desses estudos envolvem processamento acústico não linguístico. No caso de experimentos em que o estímulo é linguístico, pode não ser recomendado fazê-lo para que não haja interferência do processamento do conteúdo linguístico das legendas.

Um experimento de Grunberg (2023) falhou em eliciar MMN em estímulos manipulados quanto a aspectos lexicais e morfológicos, o que surpreende já que efeitos de MMN em experimentos sobre processamento lexical e morfossintático encontram replicação na literatura (*e.g.*, Leminen et al., 2013; MacGregor; Shtyrov, 2013; Hanna *et al.*, 2016). Na metodologia, o autor explica que empregou filmes mudos com legenda em seu experimento e, apesar de não apontar isso como possível explicação para ausência do efeito, é uma possibilidade, já que o córtex já estaria empenhado em processar estímulos linguísticos para os quais a atenção está direcionada, deixando de lado estímulos linguísticos que competem e que instruiu-se ignorar.

Além de filmes mudos, outros tipos de tarefas podem ser também empregados. Uma outra tarefa comum é a leitura de textos, como livros ou quadrinhos. Frost *et al.* (2018) utilizaram duas tarefas: *n-back*, em que o participante aperta um botão quando ver na tela um estímulo que já havia sido reproduzido, por exemplo, dois *trials* atrás; e de tempo de inspeção visual, em que os participantes indicavam, pelo pressionamento de um botão, se (concomitantes aos estímulos auditivos) a linha esquerda ou direita de um estímulo visual era maior.

3.3.4 MMN: automaticidade e interpretações funcionais

Näätänen *et al.* (2007) afirmaram que o aumento de demanda atencional nas tarefas não modula o efeito MMN, tendo por base um conjunto de estudos. Isto reforça aquilo que é tido como uma característica marcante do MMN: seu caráter “pré-atencional” (termo usado mais frequentemente em artigos mais antigos sobre MMN), do qual decorre sua associação a processos cognitivos automáticos. Por outro lado, Sussman (2007), em uma revisão, aponta que o MMN não é inteiramente invulnerável a efeitos de atenção, ainda que isto não leve a uma descaracterização do componente, já que os efeitos atencionais ocorrem em contextos específicos (em contexto de análise de cena auditiva, na formação da memória). Sussman *et al.* (2014) problematizam, então, o termo “pré-atencional”: associado inicialmente a processos que ocorrem previamente ao estágio de seleção de resposta, o termo tornou-se inadequado conforme uma mudança de perspectiva sobre atenção, segundo a qual o cérebro está sempre atento a algo. Logo, não haveria estágio “pré-atencional”. Se o MMN pode, simultaneamente, ser e não ser modulado por efeitos de atenção, então o argumento de Sussman *et al.* mostra-se apropriado, e parece ser a direção para a qual a literatura sobre MMN aponta. Isso leva os autores a propor uma alteração na caracterização do MMN: no lugar de pré-atencional, o MMN

poderia ser descrito como componente que é eliciado em situações de escuta passiva e que pode (ou não) ser modulado por atenção ou, ainda, que o MMN é um componente que independe de atenção.

Assim como todos os ERPs, o MMN está sujeito a críticas a suas interpretações funcionais e a sua existência autônoma enquanto componente. O MMN é sensível a manipulações acústicas, mas também de ordem mais abstrata, como de aspectos linguísticos (a serem detalhados). No entanto, o MMN sensível à sintaxe não é um ERP necessariamente linguístico. Na realidade, ele pode refletir processos linguísticos, mas sua natureza de fato é atribuída a um processo de memória. A interpretação baseada em memória, como já explicado, refere-se ao MMN ocorrer por detecção de um desvio do traço de memória formado sobre o estímulo padrão (Näätänen; Alho, 1995). Como alternativa, propôs-se a hipótese da adaptação, segundo a qual o MMN seria um artefato de um efeito da subtração entre a resposta N1 de um som novo e a resposta N1 de um som repetido (Jääskeläinen *et al.*, 2004).

O N1 é uma resposta neuronal sensorial com pico em torno dos 100ms. Na hipótese da adaptação, o N1 teria uma amplitude aumentada durante a reprodução dos estímulos desviantes em decorrência de uma adaptação encurtada dos neurônios do córtex auditivo aos estímulos padrão. Ou seja, em vez de um efeito de memória, o MMN/N1 refletiria um efeito de habituação na percepção sensorial. Mas Näätänen *et al.* (2007) elencam uma série de fatores que dissociam o MMN do N1, dentre os quais estão: o fato de haver MMN para violação de regularidades mais abstratas e mesmo por omissão de estímulos, o que não pode ser explicado por um efeito N1; o fato de que o N1 é detectado a partir de estágios de maturação mais posteriores que o MMN, que já fora reportado em recém-nascidos; a distribuição de fontes gerados do MMN ser semelhante às associadas a processos cognitivos de ordem maior, como processamento de sintaxe, o que não se refletiria no N1; haver lesões que prejudicam o MMN mas não o N1; antagonistas de receptores-NMDA poderem afetar o MMN sem afetar neurônios aferentes (estes associados à geração do N1). Todos estes fatores levam a uma dissociação de efeitos de MMN e de N1, de forma que a hipótese baseada em memória seja a mais adequada.

Feitas as devidas considerações, apresenta-se a seguir subclassificações do MMN em contexto linguístico. Como já abordado, o MMN enquanto resposta neuronal por discriminação entre um padrão em traço de memória e um estímulo desviante pode ser manipulado por diversos fatores, dentre eles, linguísticos.

3.3.5 MMN e fonologia

Näätänen *et al.* (1997) comparam o processamento de três fonemas em um paradigma de *oddball* com escuta passiva: a vogal /e/ como estímulo padrão e as vogais /ö/ e /õ/ como desviantes. Os estímulos foram sintetizados e tinham frequência fundamental igual. Houve dois grupos de participantes, o finlandês e o estoniano. No caso do grupo finlandês, a vogal /ö/ é um fonema na língua, ao passo que em estoniano todas as três vogais existem enquanto fonema. Ao apresentar os estímulos desviantes ao grupo finlandês, os autores reportaram picos de MMN, com um pico maior durante a reprodução da vogal /õ/ (existente no finlandês) do que durante a vogal /ö/ (inexistente no finlandês). Este achado já foi considerado surpreendente, pois a vogal /ö/ se desvia mais acusticamente da vogal /e/ e, mesmo assim, obteve o menor pico de MMN. Mas já que o ERP é sensível a variações acústicas físicas, que poderiam explicar diferenças de amplitude no componente sem pressupor o envolvimento de uma representação abstrata de um fonema, os autores também apresentaram os mesmos estímulos no mesmo desenho ao grupo estoniano, cuja língua possui os três fonemas, e o MMN elicitado pelas condições desviantes não diferiram um do outro. Desta forma, Näätänen *et al.* (1997) mostraram que o MMN é sensível à manipulação de aspectos fonológicos para além de aspectos físicos, já que a ativação de uma representação fonêmica levou a um efeito diferenciado do MMN.

Um outro achado interessante é o de Linnavalli *et al.* (2017). Através do paradigma *multifeature*, os autores obtiveram um MMN fonológico em um grupo de crianças (57 falantes monolíngues de finlandês, 13 bilíngues com finlandês como L2), entre 5 e 6 de idade. Três alterações dos estímulos padrão (e.g., /te:/) foram testadas no mesmo bloco: mudança de vogal (/ti:/), mudança de consoante (/pe:/) e duração da vogal (/te/). Mas além do experimento de EEG, os participantes também foram avaliados quanto à consciência fonológica através de dois testes comportamentais (de processamento fonêmico e de completar palavra. Os autores descobriram que as crianças com maiores pontuações no teste de “processamento de fonema” exibiam amplitudes maiores de MMN. Isto reforça o que já fora relatado quanto ao efeito do MMN ser proporcional à capacidade dos participantes de discriminar comportamentalmente os estímulos.

3.3.6 MMN e semântica

Aspectos semânticos modulam o efeito de MMN assim como fonológicos. Shtyrov, Hauk e Pulvermüller (2004) compararam o processamento de um verbo relacionado à mão (“*pick*”, “pegar”, tradução própria) com o processamento de um verbo relacionado à perna (“*kick*”, “chutar”, tradução própria). O contraste em cada bloco foi entre uma pseudopalavra (fik) e os verbos mencionados (*i.e.*, fik vs. *kick* e fik vs. *pick*). Todos os estímulos foram apresentados em um bloco ora como padrão, ora como desviante. Os achados, segundo os autores, são compatíveis com a topografia relacionada ao processamento sensório-motor, com o estímulo relacionado a mão elicitando um MMN de topografia lateral distribuída, enquanto o estímulo relacionado à perna obteve uma negatividade mais focal e dorsal. A estimativa de fontes corticais adotada pelos autores também mostrou dissociação das constelações corticais correspondentes a cada MMN, ambas no hemisfério esquerda, o que confirma a dissociação observada na topografia, apesar de não ter sido possível estabelecer as fontes geradores específicas.

Pulvermüller et al. (2004) compararam palavras que variaram apenas na sílaba final (“*lakki*”, “boné” vs. “*lakko*”, “greve”) com pseudopalavras que continham as mesmas sílabas finais (vakki, vakko). Os contrastes entre palavras e pseudopalavras revelaram um MMN aumentado em função de palavras reais com traços de memória existentes (MMN lexical, a ser detalhado). Mas para além da comparação entre palavra e pseudopalavra, a comparação entre palavras revelou diferenças topográficas que foram associadas à concretude das palavras. Estimativas de fonte associaram respostas à palavra *lakko*, considerada abstrata, a fontes bilaterais com maior ativação no hemisfério esquerdo, enquanto a palavra *lakki*, concreta, teria resposta neuronal bilateral com uma tendência de lateralização para a direita.

Jacobsen et al. (2021) compararam palavras em alemão com base na classe (palavras funcionais vs. substantivos) e na frequência (alta vs. baixa). Ao contrário de outros estudos, os autores não encontraram efeitos de frequência. Por outro lado, reportaram modulações do MMN pela classe de palavra. Substantivos elicitaram um MMN mais frontal que o MMN obtido por palavras funcionais. A amplitude relativa aos substantivos tendeu a ser maior. Os autores argumentam que o MMN mostrou sensibilidade a significado denotacional, o que contrasta com um efeito puramente lexical em que palavras obtêm MMN de maior amplitude comparado com pseudopalavras.

Na modalidade visual, Hu et al. (2020) fizeram um experimento em chinês no paradigma de *oddball* em que as palavras variavam em categoria semântica (palavras de cor, gosto ou ação) e pela presença ou ausência de um radical semântico. Os estímulos padrão em um mesmo bloco variavam em aspectos ortográficos, mas tinham em comum a categoria

semântica, de forma que efeitos obtidos pelo estímulo desviante (com categoria semântica distinta) dificilmente poderiam ser atribuídos à mudança ortográfica. A lógica seguida neste estudo difere do típico em experimentos de MMN: normalmente, mantém-se as características físicas semelhantes ao máximo para excluir ou reduzir efeitos físicos, mas neste caso vários estímulos diferentes foram adotados como “padrão”, com uma característica que os une (categoria semântica) para que o efeito obtido no estímulo desviante não pudesse ser explicado por questões físicas ou ortográficas. Por exemplo, em um bloco no experimento 1, palavras de ação (*e.g.*, 咬, “morder”, tradução própria) foram utilizadas como padrão, enquanto palavras de cor (*e.g.*, 红, “vermelho”, tradução própria) foram utilizadas como desviantes, com inversão de padrão e desviante no outro bloco. Em 3 dos 4 experimentos, os autores identificaram um vMMN (MMN visual) em torno dos 260ms com lateralização para a esquerda. O quarto experimento foi o único que empregou como desviante um estímulo sem o radical semântico, motivo pelo qual os autores acreditam que não houve MMN. A lateralização para a esquerda foi atribuída, segundo os autores, à natureza do vMMN ser linguística, já que normalmente efeitos de vMMN ocorrem no hemisfério direito.

3.3.7 MMN “lexical” ou de “armazenamento de forma plena”

O MMN “lexical” é uma modulação do componente detectada em experimentos que testam lexicalidade (*i.e.*, uma sequência de grafemas ser ou não um item lexical) e fatores associados a itens lexicais (*e.g.*, frequência de ocorrência na língua). Ao expor participantes a pseudopalavras (*i.e.*, uma sequência de grafemas ou fonemas que não é uma palavra em uma língua, mas obedece às normas fonotáticas) e a palavras em finlandês em paradigma de *oddball*, Pulvermüller *et al.* (2001) observaram que o MMN a pseudopalavras como estímulos desviantes era menor que o MMN obtido para palavras como estímulos desviantes. Este efeito é condizente com uma leitura de que a ativação de traços de memória de longo prazo associados a itens lexicais leva a uma resposta elétrica mais forte entre os neurônios (Pulvermüller; Shtyrov, 2006).

Em um experimento em russo, Alexandrov *et al.* (2011) contrastaram duas palavras em russo que foram manipuladas quanto a sua frequência de ocorrência na língua: мир (/mir/, “mundo”), uma palavra de alta frequência; e мор (/mor/, “praga”), uma palavra de baixa frequência. Possíveis efeitos de propriedades físicas foram reduzidos de ao (i) manter-se constante a frequência fundamental e a duração das sílabas, (ii) manter constante o contraste

em todas as condições e (iii) utilizar o “MMN de identidade”. Mesmo entre duas palavras existentes na língua há diferença de processamento refletida pelo MMN “lexical”, ao passo que a palavra de alta frequência obteve um MMN de amplitude maior e latência mais inicial que a palavra de baixa frequência.

O mesmo efeito de frequência foi encontrado em um outro experimento em finlandês de Leminen *et al.* (2013). Os autores contrastaram condições de processo de formação da palavra (derivação ou flexão), frequência de ocorrência na língua (alta ou baixa) e lexicalidade (palavra ou pseudopalavra). A maior amplitude de MMN ocorreu nas palavras derivadas de alta frequência que, segundo os autores, poderiam estar representadas em forma inteira na memória. Não somente o MMN lexical seria maior para palavras por traços de memória de longo prazo, mas também a alta frequência de determinadas palavras na língua levaria os neurônios a formarem conexões mais fortes que as correspondentes a palavras de baixa frequência (Alexandrov *et al.*, 2011; Leminen *et al.*, 2013), o que no caso do segundo estudo favoreceria a lexicalização de palavras que, de outra forma, estariam segmentadas em morfemas.

O MMN “lexical” também pode ser denominado como “MMN de armazenamento de forma plena” (Hanna *et al.*, 2017). Cappelle, Pulvermüller e Shtyrov (2010) objetivaram abordar um debate na literatura sobre se *phrasal verbs*, verbos compostos por um verbo mais uma partícula, são processados por combinação sintática dos seus elementos ou se compõe uma unidade lexical. Os autores contrastaram, em um paradigma *multifeature*, combinações legais e ilegais de *phrasal verbs* semanticamente transparentes (e.g., “*rise up*”, “erguer” vs. “**rise down*”, “erguer para baixo”, tradução adaptada própria) e semanticamente opacos (e.g., “*cool down*”, “esfriar” vs. “**cool up*”, “esfriar para cima”, tradução adaptada própria). Enquanto o MMN em resposta a estímulos com violações sintáticas exibe amplitude maior que em resposta a estímulos gramaticais, o MMN lexical, conforme já abordado, tem amplitude maior em resposta a estímulos que existem na memória enquanto itens lexicais. Os autores reportaram MMN mais forte às combinações congruentes que às combinações ilegais, o que os leva a conclusão de que o efeito encontrado foi de um MMN “lexical” ou de “armazenamento de forma plena”. No entanto, uma questão ficou em aberto, já que o experimento apenas empregou *phrasal verbs* em que a partícula aparecia imediatamente após o verbo, quando há casos em que pode haver palavras intervenientes.

Hanna *et al.* (2017) objetivaram preencher esta lacuna com um teste em alemão sobre *particle verbs* (“verbos de partícula”), que assim como os *phrasal verbs* no inglês, podem ser expressos de forma contínua ou descontínua. Um exemplo de *particle verb* em alemão é a palavra “*anfügen*” (“adicionar”), que possui uma forma descontínua “*fügt ... an*”. Uma

possibilidade é que a forma contínua esteja armazenada em forma plena na memória, ao passo que a forma descontínua seria combinada, sintaticamente, através de suas partes para formar o significado. Por outro lado, há a proposta de que mesmo a forma descontínua é, na realidade, uma construção e é representada na memória como uma unidade lexical. Para investigar esta questão, os autores adotaram o paradigma de *oddball* com verbos de partícula em forma descontínua que formavam uma combinação permitida (e.g., “*sie fügen es an*”) ou uma combinação ilegal (e.g., “**sie fügen es ab*”). Assim como no experimento de Cappelle, Pulvermüller e Shtyrov, Hanna *et al.* encontraram um MMN de maior amplitude para os desviantes que eram combinações congruentes que para os desviantes que eram combinações ilegais, o que dialoga com a proposta de que mesmo verbos de partícula semanticamente transparentes e descontínuos podem compor uma unidade lexical.

3.3.8 MMN “sintático” ou “combinatório”

Pulvermüller e Shtyrov (2003) contrastaram, em paradigma de *oddball*, estímulos gramaticais e agramaticais, conforme já explicado na seção 3.3.1. A agramaticalidade foi provocada por violação de concordância de número (*we come* vs. *we *comes*). Ao controlar fatores acústicos, os autores descobriram que havia um MMN maior quando estímulos agramaticais eram os desviantes. O mesmo contraste não se observou quando os verbos eram apresentados sem contexto sentencial (o que anulava o efeito de agramaticalidade), havendo apenas picos de MMN de amplitude similar em decorrência da detecção de um desvio. O achado levou os autores a reportarem o que veio a ser conhecido como *syntactic Mismatch Negativity* (ou “sMMN”, MMN sintático), efeito observado na porção anterior esquerda dos eletrodos.

O sMMN foi replicado em outros estudos (e.g., Hasting *et al.*, 2007; Herrmann *et al.*, 2009; Hanna *et al.*, 2016) e associado a uma resposta precoce a ao menos alguns processos sintáticos, como concordância de número. Não somente isso, a interpretação de que o efeito reflete alto grau de automaticidade e independência de atenção do efeito foi reforçada por outros estudos.

Pulvermüller *et al.* (2008) contrastaram frases gramaticais e agramaticais em inglês através do mesmo fenômeno, de concordância de número, mas com algumas modificações. Primeiramente, ao invés de apenas adotarem um contexto linguístico em que a violação gramatical ocorria pelo acréscimo do morfema “-s” (“*we come*” vs. “*we comes**”), também

foram incluídos estímulos em que o morfema “-s” ocorria em contexto congruente, ao passo que a contraparte agramatical ocorria pela omissão do morfema (“*he comes*”, “ele vem” vs. “*he *come*”, “ele *vimos”, tradução adaptada própria). Em segundo lugar, os autores também adotaram dois tipos de tarefa que se diferenciavam pelo nível de atenção demandada. Em um experimento, os participantes assistiram a um filme mudo e foram instruídos a ignorar os estímulos auditivos, de forma semelhante a outros experimentos de MMN. No outro experimento, os participantes escutavam os estímulos linguísticos no ouvido direito enquanto no ouvido esquerdo escutavam tons que, em repetições raras, tinham uma atenuação da energia sonora. Os participantes eram instruídos a pressionar um botão sempre que escutassem, no ouvido esquerdo, estes tons desviantes com atenuação de energia. O ponto em que o desvio ocorria nos estímulos linguísticos e não linguísticos era o mesmo, 760ms após o início. Os autores encontraram picos de sMMN entre 110-140ms que não apresentaram diferença significativa em função da tarefa, o que mostrou que o sMMN reflete processos independentes de atenção. Segundo Pulvermüller *et al.*, as respostas eletrofisiológicas sofreram modulação por atenção apenas em janelas temporais posteriores.

Uma outra questão é sobre a natureza “sintática” do MMN. Hanna *et al.* (2017), por exemplo, falam de um MMN “combinatório” em seu artigo. Tome-se por exemplo o debate sobre processamento morfológico, segundo o qual há dúvidas sobre se palavras morfológicamente complexas (*i.e.*, constituídas por mais de um morfema) estão representadas na memória como um único item lexical ou como morfemas que são combinados no curso do processamento.

Leminen *et al.* (2013) compararam palavras em finlandês com base em processo de formação (derivação ou flexão), frequência (alta ou baixa) e lexicalidade (palavra ou pseudopalavra). As pseudopalavras foram criadas com base nos itens lexicais incluídos no experimento, com pequenas modificações (*e.g.*, “*lauluja*”, “canções” vs. *rauluja*). Para cada item lexical, havia uma pseudopalavra correspondente. O finlandês é uma língua que fornece condições únicas de testagem, pois há pausas naturais entre raiz e morfema, o que permite o acréscimo de morfemas por *splicing* sem que haja prejuízo à naturalidade da prosódia do estímulo, além de que o mesmo morfema, a depender da raiz, pode ser tanto empregado para flexão quanto para derivação. O morfema “-ja”, utilizado no experimento, pode ser um morfema agentivizador se ligado a uma base verbal (“*laula*”, “cantar”, “*lauluja*”, “cantor”) ou uma marca de plural se ligado a uma base nominal (“*laulu*”, “canção”, “*lauluja*”, “canções”). Diferenças de amplitude no MMN no contraste entre condições dificilmente poderia ser explicado apenas por mudanças acústicas. No caso das palavras derivadas, houve um efeito de

MMN mais forte na condição de alta frequência do que na condição de baixa frequência. Quando comparadas às pseudopalavras correspondentes, as palavras derivadas obtiveram também pico de amplitude maior. No caso das palavras flexionadas, a condição de frequência não produziu picos de MMN com diferença estatisticamente significativa. Não somente isso, ao contrário do efeito clássico de lexicalidade, as pseudopalavras correspondentes às palavras flexionadas eliciaram picos de MMN maiores que as palavras flexionadas.

Os achados levam os autores a concluir que palavras flexionadas, independentemente da frequência, são combinadas a partir de morfemas; já palavras derivadas de baixa frequência podem possuir também uma representação em forma plena além de serem combinadas, enquanto palavras derivadas de alta frequência são lexicalizadas (*i.e.* armazenadas na forma plena) (por isso, com o maior pico de MMN, típico do MMN lexical). No entanto, não há um contraste claro nos estudos de MMN, de forma geral, entre o que seria o processo combinatório que resulta na formação de palavras e os mecanismos de combinação sintáticos, senão um apontamento de que o MMN, neste experimento e em testes semelhantes, refletiu uma computação via regras.

Outro teste que chegou a uma conclusão semelhante é o de Bakker *et al.* (2013), em que houve comparação entre pseudopalavras (smide), palavras monomorfêmicas (“hide”, “esconder”), palavras no passado simples regular (“cried”, “gritou”) e verbos indevidamente regularizados (“flied*”, em vez da forma irregular “flew”, “voou”). Os resultados mostraram que pseudopalavras tinham MMN de menor amplitude que palavras monomorfêmicas existentes, consistente com o MMN lexical, mas verbos indevidamente regularizados tinham MMN mais forte (apesar de formarem palavras não existentes na língua) que verbos regulares no passado, o que segue o padrão do MMN sintático e aponta para formação por combinação de morfemas existentes.

Desta forma, o MMN “sintático” também pode ser caracterizado como um MMN “combinatório”, ainda que o status do processo de combinação de morfemas enquanto mecanismo sintático também seja debatido na literatura em correntes construcionistas como a Morfologia Distribuída (Marantz, 1997). Por fim, também há efeitos semelhantes no âmbito de palavras morfológicamente complexas formadas por composição (MacGregor; Shtyrov, 2013), ainda que, neste caso, haja tanto efeito por frequência quanto por transparência semântica, com palavras compostas semanticamente transparentes (*e.g.*, *schoolwork*, “trabalho escolar”, tradução própria) exibindo MMN com características combinatoriais.

Sobre a representação de traços morfossintáticos no cérebro, dos quais o sMMN decorre hipoteticamente, Brunellière e Frauenfelder (2010) ressaltam que os estudos anteriores com

paradigma voltado para eliciação de respostas temporalmente precoces envolviam apenas a violação de um traço morfossintático. Apenas alguns estudos empregaram combinação de violações gramaticais, mas com um quadro inconclusivo sobre até que ponto traços morfossintáticos abstratos são representados unitariamente na memória para computação de concordância, além de não necessariamente refletirem processamento automático, já que se tratam de experimentos com respostas neuronais mais tardias (*e.g.*, P600) e com atenção direcionada aos estímulos.

Uma outra questão, não apontada pelos autores, mas relevante, é que abordagens probabilísticas do processamento e representação do conhecimento linguístico poderiam argumentar que os efeitos de sMMN foram obtidos por uma violação de probabilidade, já que verbos que não concordam com o sujeito não ocorrem tipicamente no uso da língua.

Para investigar a existência de traços morfossintáticos, Brunellière e Frauenfelder realizaram, então, um estudo em francês com uma condição com duas violações morfossintáticas (de concordância de pessoa e de número) em um mesmo estímulo (*e.g.*, *nous *vivra*, “nós *viverá”, tradução própria), com o objetivo de contrastar os resultados com os achados de um estudo prévio de 2007 em que havia apenas uma violação (de concordância de pessoa). Se de fato traços morfossintáticos existem e atuam no processamento linguístico, os autores esperavam que o sMMN para estímulos com duas violações fosse maior que o sMMN obtido no estudo anterior, com apenas uma violação. Nenhum efeito de gramaticalidade foi encontrado neste experimento, o que é surpreendente dado (i) o achado dos próprios autores no estudo prévio e (ii) a ocorrência do sMMN replicada em diferentes estudos. Os autores ressaltam que a ausência do efeito pode ser explicada por questões metodológicas. Com ajustes à metodologia, a proposta de Brunellière e Frauenfelder é interessante para responder à pergunta que as autoras colocaram e que envolve um debate mais amplo, ainda sem consenso, no âmbito das discussões sobre teoria linguística e processamento.

No tocante a abordagens probabilísticas da linguagem, um estudo de Pulvermüller e Assadollahi (2007) contribuiu para este debate ao mostrar que houve sMMN em resposta a estímulos agramaticais o qual não foi modulado na comparação entre estímulos gramaticais “comuns” e “incomuns”, em favor da existência de processos sintáticos discretos. Contudo mais estudos são necessários.

3.3.9 MMNs “linguísticos” e suas topografias e fontes

Uma visão geral da distribuição dos efeitos de MMN em experimentos linguísticos apontam para uma tendência de ativações no córtex temporal e de lateralização para o hemisfério esquerdo. No entanto, há variações. Um ponto importante que se deve destacar é que há estudos de MMN feitos tanto com EEG quanto com MEG. O EEG, como já reportado, tem altíssima precisão temporal e baixa precisão espacial, enquanto o MEG tem altíssima precisão temporal e boa precisão espacial. Ainda assim, alguns estudos de EEG, como reportado, empregaram técnicas de estimativa de fonte cortical para localizar os efeitos de MMN que, apesar de não serem confiáveis em absoluto, podem ser contrapostas com outros estudos de EEG e com achados de MEG. Abaixo, alguns estudos serão detalhados com relação a topografia e fontes corticais detectadas. No decorrer da leitura, é importante atentar-se para o fato de que algumas regiões apresentam maior ou menor ativação em detrimento da comparação entre condições, mas que o efeito de MMN de forma geral (*i.e.*, detectado independentemente da condição específica) pode ter levado a uma ativação mais ampla.

Do lado dos estudos sobre processamento de fonologia, Nääätänen *et al.* (1997), em seu estudo de MEG, mostrou ativação do córtex auditivo esquerdo na comparação entre condições (vogais que representavam ou não um fonema em finlandês). Linnavalli *et al.* (2017), que utilizaram EEG, detectaram respostas de MMN moduladas por efeitos de fonologia em eletrodos fronto-centrais com mais ativação que parietais. Não houve dominância de hemisfério, exceto nas crianças com baixa pontuação no teste de consciência fonológica, que tiveram predominância do hemisfério direito. Rue, Snijders e Fikkert (2021), em experimento também de EEG que comparou vogais em holandês, reportaram topografia frontal, com influência de geradores temporais de ambos os hemisférios.

Sobre os estudos de MMN modulados por efeitos de semântica, primeiramente, Jacobsen *et al.* (2021), em teste de EEG, encontraram um efeito geral de MMN para todas as condições na linha do meio dos eletrodos e maior ativação nos eletrodos frontais para substantivos que para palavras funcionais. Pulvermuller *et al.* (2004), em teste de EEG, eliciu tanto MMN lexical quanto MMN modulado por semântica, cada resposta com suas especificidades. A comparação entre palavras e pseudopalavras obteve efeitos de MMN lexical nos eletrodos fronto-centrais e no hemisfério esquerdo. A comparação entre palavras, que variaram em concretude, mostrou diferenças no hemisfério direito e em áreas parieto-occipitais do hemisfério esquerdo. Na comparação entre palavras, a palavra concreta (*lakko*) teve resposta mais distribuída que a palavra abstrata (*lakki*). A estimativa de fontes mostrou que a palavra abstrata exibiu MMN mais forte nas áreas temporo-parieto-occipitais do hemisfério esquerdo, enquanto a palavra concreta teve fontes parieto-occipitais do hemisfério direito e ativação mais

fraca frontal e occipital do hemisfério esquerdo. Em uma comparação de palavras de ação, Shtyrov, Hauk e Pulvermüller (2004), em experimento de EEG, encontraram respostas gerais de MMN nos eletrodos centrais. A palavra relacionada a mão (*pick*) apresentou topografia lateral distribuída, enquanto a palavra relacionada à perna (*kick*) apresentou negatividade mais central-posterior. A estimativa de fontes apontou para lateralização no caso da palavra relacionada à mão, e atividade mais médio-dorsal para palavra relacionada à perna. Ambos os efeitos no hemisfério esquerdo, o que, de acordo com os autores, condiz com respostas neuronais sensoriomotoras.

Em um experimento de MEG, Ulanov *et al.* (2024), obtiveram MMN em resposta a um verbo de ação abstrato (копи, “economizar”, tradução própria) lateralizado para a esquerda (devido a uma ativação menor do hemisfério direito), com um verbo de ação concreto (лепи, “moldar”, tradução própria) exibindo resposta bilateral. Na estimativa de fonte cortical, palavras abstratas tiveram maior ativação de partes do giro frontal inferior esquerdo (áreas de Brodmann 45/47), enquanto os verbos concretos tiveram maior ativação da AB 4 (córtex motor primário). O córtex auditivo primário teve igual ativação para todas as condições, com lateralização para esquerda.

Dada a natureza variada do aspecto semântico testado em cada experimento, e a existência em menor quantidade de estudos sobre MMN e semântica, é difícil realizar considerações sobre a topografia e as fontes corticais. No entanto, os achados parecem seguir a tendência de lateralização para a esquerda típica de experimentos linguísticos.

Sobre o MMN lexical ou de armazenamento de forma plena, um dos componentes de maior interesse para este trabalho, há certa variabilidade, mas que segue as mesmas tendências apontadas anteriormente. Cabe lembrar que a característica principal do MMN lexical é ter maior amplitude para estímulos com traços fortes (ou mais fortes na memória), de forma que palavras têm maior MMN que pseudopalavras, palavras frequentes têm maior MMN que palavras menos frequentes e palavras com lexicalização mais forte têm maior MMN que palavras com representação de forma plena mais fraca (sugestivo de dupla-rota, com possibilidade de segmentação). Pulvermüller *et al.* (2001) realizou quatro experimentos sobre palavras e pseudopalavras, dois de EEG e dois de MEG. Nos experimentos 1 e 2, detectaram efeito de MMN mais forte para palavras comparadas com pseudopalavras na parte fronto-central dos eletrodos. Os experimentos 3 e 4, de MEG, detectaram ativação geral na parte posterior da fissura de Silvio, com ativação bilateral, mas apenas no hemisfério esquerdo houve IMMN mais forte para palavras, mais especificamente no lobo temporal superior esquerdo.

Alexandrov *et al.* (2011), em estudo de EEG que adotou como variável a frequência de ocorrência das palavras, reportou efeito de MMN mais forte para palavras de baixa frequência nos eletrodos frontais, mas em decorrência de esta condição ter obtidos efeitos mais fracos nos eletrodos centro-parietais, ao passo que palavras frequentes tiveram efeitos de MMN mais espalhados. Não houve lateralização reportada, o que contrasta com outros estudos.

Em estudos de morfologia, Hanna e Pulvermüller (2014), que investigaram morfologia derivacional através de EEG, reportaram palavras derivadas congruentes com MMN aumentado (em comparação com palavras derivadas incongruentes) nas áreas esquerda inferior anterior temporal, bilateral superior parietal, bilateral pós-central e áreas supramarginais. A topografia geral do MMN correspondeu a eletrodos fronto-centrais. Efeito geral obtido por todas as condições foi ligado às seguintes fontes: áreas perisilvianas, temporo-parietal e giro frontal inferior em ambos os hemisférios. Bakker *et al.* (2013), em experimento de MEG sobre verbos no passado regulares, indevidamente regularizados, palavras monomorfêmicas e pseudopalavras, relataram um efeito MMN, em todas as condições, lateralizado para a esquerda, em regiões fronto-temporais. Houve MMN lexical lateralizado para a esquerda (i.e., comparando palavras monomorfêmicas com pseudopalavras). Mas na análise de fonte, não houve efeitos com diferença significativa, tendo o efeito geral (em todos os estímulos) ocorrido em fontes bilaterais no córtex temporal superior e médio, giro supramarginal, giro inferior pré e pós-central e *pars opercularis*. O possível motivo apontado pelos autores é que a amostragem pequena não permitiu a análise por falta de poder estatístico. Mas o MMN combinatório reportado (associado a verbos indevidamente regularizados) e o MMN lexical, de fato, tiveram maior efeito no hemisfério esquerdo.

Whiting, Marslen-Wilson e Shtyrov (2013) utilizaram técnicas concomitantes de MEG e EEG em outro estudo sobre morfologia, que incluiu contrastes por condições de opacidade em palavras derivadas (e.g., “baker”, “padeiro” vs. “beaker”, “taça”), categoria lexical em palavras flexionadas (e.g., “bakes”, “cozinha” vs. “beaks”, “bicos”) e lexicalidade (e.g., “bakes” vs. “bokes*”). De forma geral, houve MMN mais forte no córtex temporal posterior. A presença de estrutura morfológica levou a um engajamento da rede fronto-temporal esquerda. Foi relatada lateralização para a esquerda em todas as condições de palavras existentes (MMN lexical, contraste com pseudopalavras), nos sensores temporais no MEG e nos eletrodos fronto-centrais no EEG. Verbos afixados tiveram maior ativação no giro frontal inferior lateralizada para a esquerda em comparação com substantivos afixados. Estimativa de fontes confirmou a resposta lateralizada para a esquerda, no córtex temporal superior posterior. No contraste de MMNs por transparência derivacional, a palavra derivada transparente desviante no EEG teve

maior efeito em eletrodos posteriores, na mesma janela em que houve positividade nos eletrodos centrais para a palavra opaca. No MEG, a palavra opaca ativou mais regiões no hemisfério direito. A palavra opaca também ativou mais o giro temporal médio esquerdo que a transparente o que, segundo os autores, teria mostrado efeitos de segmentação falha (MMN combinatório). Este achado põe o estudo de Whiting, Marslen-Wilson e Shtyrov contra os achados de Hanna e Pulvermüller (2014), em que o padrão do MMN correspondeu a um MMN lexical aumentado o qual sugeriu armazenagem em forma plena para palavras derivadas, além de haver divergências nas áreas ativadas reportadas.

Por fim, MacGregor e Shtyrov (2013), em estudo sobre palavras compostas com EEG, reportaram um efeito de MMN em todas as condições com resposta central. As palavras compostas de alta frequência, comparadas com de baixa frequência, obtiveram um MMN lexical mais forte nos eletrodos centrais e nos eletrodos parietais esquerdos. A estimativa de fonte apontou para efeitos de frequência em compostas opacas, com resposta bilateral nos lobos frontal inferior e temporal superior, mas resposta máxima no hemisfério esquerdo. Palavras compostas de baixa frequência comparadas com pseudopalavras também obtiveram resposta bilateral.

Hanna *et al.* (2017), em seu experimento sobre verbos de partícula, encontraram efeito maior no giro temporal anterior esquerdo de MMN “lexical” (comparando estímulos congruentes com incongruentes). Houve atividade cortical geral (i.e., em todas as condições) bilateral nos giros temporal superior e inferior e giros pré-central. No estudo de Cappelle *et al.* (2010), que investigou verbos frasais através de MEG, houve respostas aumentadas (MMN “lexical”) bilaterais nas áreas temporal superior e parietal. No caso dos últimos dois estudos, há uma diferença inesperada, dado que ambos estudaram fenômenos relacionados que obtiveram uma resposta neuronal semelhante.

No que diz respeito aos estudos de MMN lexical ou de armazenagem de forma plena, há uma grande variação de fontes ativadas e certa variação topográfica, ainda que dentro do esperado para o MMN. Um ponto constante, assim como nas modulações por fonologia e semântica, é a tendência a lateralização para a esquerda, além da ativação de regiões temporais e frontais. A variabilidade de fontes reportadas na comparação entre experimentos com EEG e com MEG não é surpreendente, tendo em conta as diferenças de sensibilidade de cada equipamento aos neurônios no córtex a depender de sua orientação (radial para o EEG, tangencial para o MEG). Contudo, diferenças na comparação entre estudos de MEG apontam para necessidade de mais replicações.

Sobre o MMN sintático, Pulvermüller e Assadollahi (2007), em testes de MEG, mostraram ativação mais forte das violações em áreas fronto-centrais no hemisfério esquerdo na janela entre 140-180ms. Na janela entre 120-160ms, houve fontes mais fortes no córtex perisilviano esquerdo que no direito. Na janela 160-200ms, houve efeito de gramaticalidade nos córtices perisilvianos posteriores, com um efeito de hemisfério emergindo apenas em janela mais tardia, entre 200-240ms. Herrmann *et al.* (2009), também em experimento de MEG, reportaram um sMMNm na fissura de Sylvius, incluindo córtex auditivo primário e no sulco temporal superior, com ativação mais forte para o hemisfério esquerdo. Hanna et al. (2016), também em experimento de MEG, encontraram um sMMNm com fontes temporais superiores bilaterais, sem lateralização. Hanna et al. (2014), utilizando o EEG, encontraram uma fonte geradora da ativação na área de Broca. Em termos de topografia, os efeitos de MMN foram encontrados nos eletrodos fronto-centrais. Pulvermuller e Shtyrov (2003), em teste de EEG, também reportaram ativação maior no córtex inferior frontal. Hanna et al. (2014) explicam que, tipicamente, respostas de MMN sintático são encontradas no córtex temporal superior em estudos de MEG, mas a aparente divergência pode ser pelo equipamento, já que o MEG seria mais sensível ao córtex temporal, o contrário com o EEG.

Em um estudo que diferiu consideravelmente dos demais, Hasting *et al.* (2007) reportaram um efeito de sMMN em experimentos com EEG. No experimento 1, que apresentou violação de concordância, houve MMN em eletrodos anteriores, com eletrodos anteriores esquerdos exibindo amplitude mais forte no caso dos estímulos agramaticais. No experimento 2, em que houve violação de categoria da palavra, houve efeito de sílaba, a qual representou o desvio entre estímulos: a sílaba -tet obteve efeito nos eletrodos anteriores, enquanto a sílaba -ter exibiu MMN mais forte nos eletrodos posteriores. O efeito de agramaticalidade foi observado em todos os quadrantes do escalpo, menos no anterior esquerdo, o que contrasta com outros estudos. Mais uma vez, há variabilidade topográfica e de fontes corticais, ainda que as regiões reportadas estejam, todas, dentro do esperado para o processamento de linguagem.

O aparente paradoxo de convergências e divergências entre os estudos apontam para duas considerações. Primeiramente, os dados topográficos e espaciais confirmam que o MMN é sensível a estímulos linguísticos de forma diferenciada a depender do nível linguístico envolvido, o que reafirma sua expressividade enquanto instrumento para investigação sobre linguagem. Em segundo lugar, há um ponto em comum na caracterização topográfica, que é o fato de o MMN ser tipicamente encontrado em eletrodos fronto-centrais, ainda que haja exceções, e com ativação cortical que segue o esperado para efeitos linguísticos. Por outro lado,

as variações mostram o quanto experimentos de MMN com estímulos linguísticos ainda requerem replicação e melhor caracterização.

3.3.10 Algumas conclusões sobre o MMN e linguagem

De forma geral, algumas considerações podem ser tiradas sobre o MMN. Primeiramente, o componente aparenta ser diferencialmente sensível a aspectos diversos da linguagem, fonológicos, semânticos, lexicais e sintáticos. O MMN é modulado em latência, amplitude e topografia, ainda que seja a amplitude o que diferencia de forma categórica os efeitos no MMN lexical e no MMN sintático/combinatório. Ademais, ao passo que o MMN é modulável por fonologia e semântica, no caso dos MMNs lexical e sintático/combinatório, há um padrão categórico que os caracteriza. O MMN lexical é marcado por um aumento de sua amplitude quando comparado com pseudopalavras ou com palavras que possuem traços de memória mais fracos, enquanto o MMN sintático/combinatório é maior em combinações gramaticalmente incongruentes do que em combinações gramaticais.

Por mais que desde 1978 tenha havido uma explosão de estudos de MMN, com um número relativamente amplo de experimentos com estímulos linguísticos, mais replicações são necessárias. Um aspecto característico do MMN é, como dito, o fato de incluir um número muito baixo de estímulos, de forma que os processos que são associados a eles precisam ser amplamente replicados com estímulos diferentes para que as modulações encontradas, e as subsequentes interpretações e conclusões, não fiquem restritas a itens individuais. Neste sentido, cada MMN citado ainda requer replicações em maior número. Brunellière e Frauenfelder (2010), por exemplo, falharam em encontrar um MMN sintático em um contexto que se esperava um MMN de amplitude ainda maior do que o reportado previamente. Motivações metodológicas podem explicar a ausência do efeito, mas por outro lado os demais estudos não estão imunes a falhas metodológicas terem levado aos efeitos encontrados. Além disso, se comparamos estudos ditos tradicionais de processamento sintático (e.g., os que reportam LAN e P600) com estudos de MMN sintático especificamente, estes últimos existem em pequena quantidade, o que ressalta a importância de replicações. Ainda assim, o MMN já representa um importante instrumento de investigação acerca do processamento linguístico em seu nível mais automático, tendo apresentado contribuições expressivas.

Do ELAN ao MMN, as investigações sobre processamento linguístico com ERPs representam um importante passo nas pesquisas sobre linguagem em sua face representacional

e em sua base neurobiológica. Décadas de pesquisa responderam tantas perguntas quanto levantaram dúvidas, tanto acerca do processamento da linguagem quanto sobre o quão informativos os ERPs são sobre processos cognitivos. O que o quadro revela é uma necessidade por parcimônia e cautela na realização de experimentos linguísticos com EEG e na representação dos resultados. Os dados de ERP são, ao mesmo tempo, micro e macro: micro pois as respostas com alta precisão temporal, em especial quando associadas a características topográficas e espaciais, permitem a investigação de vários processos e estágios; macro pois os dados de EEG não permitem uma dissociação minuciosa das fontes geradoras e, potencialmente, um mesmo ERP pode refletir um conjunto de processos. O MMN, enquanto resposta neuronal automática, precoce e independente de atenção, tem lugar de destaque nas investigações sobre a linguagem, apesar de suas limitações.

No capítulo a seguir, apresentaremos a metodologia referente ao nosso experimento. Ressalta-se que o estudo que realizamos foi desenhado para eliciar o efeito de *mismatch negativity*, no intuito de testar a modulação do chamado MMN sintático. Os demais ERPs não – E/LAN, N400 e P600 – não deixam de ser importantes para análise e discussão dos achados, tendo em vista que o contraste entre padrões de respostas encontrados e não encontrados é informativo.

Capítulo 4 – Metodologia

“It is not our part to master all the tides of the world, but to do what is in us...”

Gandalf, O Cinzento

O experimento consiste em um paradigma de *multifeature* com escuta passiva, um paradigma experimental típico na eliciação do componente de MMN (Näätänen *et al.*, 2004; Partanen *et al.*, 2011). O paradigma *multifeature* refere-se à ocorrência de repetições de mais de um tipo de estímulo raro (estímulos desviantes) entre repetições mais frequentes de um estímulo padrão. Diferentemente do paradigma *oddball*, mais tradicional em estudos de MMN, mais de um tipo de estímulo desviante ocorre no mesmo bloco em meio às repetições mais frequentes do estímulo padrão (*e.g.*, repetição mais frequente de uma sílaba /ba/ e repetições mais raras de sílabas /bo/ e /bu/). Isso permite que mais de uma condição seja testada sem que isso aumente o tempo de teste, já que ao invés de ter em um experimento, por exemplo, dois blocos em que cada um conta 800 repetições do estímulo padrão e 200 repetições de um tipo de estímulo desviante, o que condiz com o paradigma *oddball*, poderia haver apenas um bloco com 600 repetições do estímulo padrão e 200 repetições de cada tipo de estímulo desviante no mesmo bloco, reduzindo pela metade a duração do experimento, o que condiz com o paradigma *multifeature*.

A escuta passiva significa que não há tarefa que envolva os estímulos auditivos, mas há uma tarefa distratora que envolve assistir a trechos de episódios mudos de uma série (sem legenda) e responder a um questionário sobre eles.

As variáveis independentes são a gramaticalidade de cada sintagma (“gramatical”, “1 violação” ou “2 violações”), o tipo de estímulo (nos blocos 1 e 2, “gramatical padrão”, “1 violação desviante” e “2 violações desviante; nos blocos 3 e 4, “1 violação padrão”, “gramatical desviante” e “2 violações desviante”) e também incluímos como fator na análise a região topográfica (“fronto-central”, “anterior esquerdo”, “anterior direito”, “posterior esquerdo”, “posterior direito”). A violação gramatical única decorre de violação de concordância de pessoa (“eu *adota”), enquanto a violação gramatical combinada, na condição “2 violações”, decorre de violação por concordância de pessoa e de número (“eu *adotam”).

Neste experimento, além do cálculo do MMN clássico (MMNc), em que a média das respostas ao estímulo desviante (*e.g.*, “eu *adota” como desviante nos blocos 1 e 2) é comparada com a média das respostas ao estímulo padrão do mesmo bloco (*e.g.*, “eu adoto”

como padrão nos blocos 3 e 4), calcularemos também o MMN de identidade (MMNi, Pulvermüller; Shtyrov, 2006). No MMN de identidade, a subtração das ondas é feita entre o mesmo estímulo quando ocorre como desviante (e.g., “eu *adota” como desviante nos blocos 1 e 2) e quando ocorre como padrão (e.g., “eu *adota” como padrão nos blocos 3 e 4) (Cf. 4.3. para mais detalhes). A proposta é observar potenciais efeitos de MMN que sejam moduláveis especificamente por processamento morfossintático e que não reflitam apenas efeitos por mudanças acústicas nos estímulos.

O ideal seria que o MMNi fosse calculado para todos os estímulos, mas para isto deve haver dois blocos para cada estímulo usado, o que incorreria em um estudo demasiado longo. O tempo de experimento, por sua vez, tem o potencial de interferir na qualidade dos sinais, o que tornaria a análise problemática e inviável. Por isso, optamos por calcular o MMNi apenas das condições “gramatical” e “1 violação”, já que consideramos que uma diferença entre os dois seria suficiente para demonstrar que o MMN encontrado no experimento não decorre apenas de questões acústicas que influem sobre a janela sensorial inicial, ao passo que a comparação de interesse, entre todos os níveis de gramaticalidade, ocorreria pelo cálculo do MMN clássico.

4.1 Hipótese e expectativas

Tem-se por hipótese que, no curso da compreensão da linguagem, realizamos processamento morfossintático reflexo via *parsing*. Desse modo, esperamos que haja uma resposta neuronal (MMN sintático) em sintagmas com violação gramatical (*i.e.*, “eu *adota”, “eu *adotam”), quando em condição de estímulo desviante, em contraste com o sintagma sem violação gramatical (“eu adoto”) em condição de estímulo desviante. A condição de sintagma com “2 violações” (*i.e.*, “eu *adotam”) teria efeito maior do que a condição “1 violação” (*i.e.*, “eu *adota”), já que a detecção de mais de um tipo de violação incorreria em maior dificuldade de processamento pelo *parser*. Caso a hipótese seja confirmada, haverá uma indicação de que os dados deste experimento dialogam com a visão de processamento via *parsing* e combinatório automático da linguagem, com os traços morfossintáticos abstratos que dão base a este processamento representados na nossa memória.

Quanto às expectativas para cada tipo de MMN analisado, a hipótese será confirmada caso o efeito de MMNc, nos blocos 1 e 2, nas condições em que os sintagmas apresentam violação gramatical seja significativamente maior que o efeito de MMNc na condição em que

o estímulo é gramatical. Também deve haver diferença entre os picos de MMNc relativos à condição de “1 violação” e à de “2 violações”, com a amplitude média sendo maior no caso do último. Ademais, espera-se que o haja um efeito de MMNi “1 violação” seja mais negativo que o MMNi gramatical caso haja (i) efeito de gramaticalidade e (ii) um efeito real de MMN, que não provém de influência de processamento acústico sensorial prévio à janela do MMN. Neste caso, o MMNi é apenas confirmatório de que os efeitos do MMNc não são puramente fruto de influência de respostas neuronais relacionadas a processamento acústico, não constituindo a principal comparação de interesse deste experimento. Nos blocos 3 e 4, em que o estímulo com 1 violação ocorre como padrão e o estímulo gramatical ocorre como um dos desviantes, espera-se que o estímulo gramatical apresente maior amplitude negativa, já que o efeito de MMN deriva da detecção do desvio do padrão.

A hipótese alternativa seria que o processamento linguístico não envolve *parsing* de morfemas flexionais (ou não sempre envolve). Neste caso, espera-se que haverá resposta neuronal semelhante nos sintagmas com violação gramatical, seja com “2 violações” ou “1 violação”, que pode ser explicada pela detecção de violação de probabilidade (*i.e.*, o item lexical que vem em seguida não corresponde ao provável). A hipótese alternativa se confirma caso os picos de MMN das condições “2 violações” e “1 violação” não tenham diferença estatisticamente significativa.

4.2 Estímulos e gravação

O experimento adotou um estímulo por condição, conforme padrão de experimentos de MMN. Os estímulos estão resumidos na Tabela 1. Todos os estímulos são sintagmas que variam em gramaticalidade (“gramatical”, “1 violação” ou “2 violações”).

Tabela 1 - estímulos por condição

Gramaticalidade	Estímulo
Gramatical	Eu adoto
1 violação	Eu adota*
2 violações	Eu adotam*

Fonte: elaboração própria

Os verbos foram escolhidos em decorrência de uma futura comparação com verbos de alta frequência que são pares mínimos com os incluídos neste experimento. Apenas as flexões

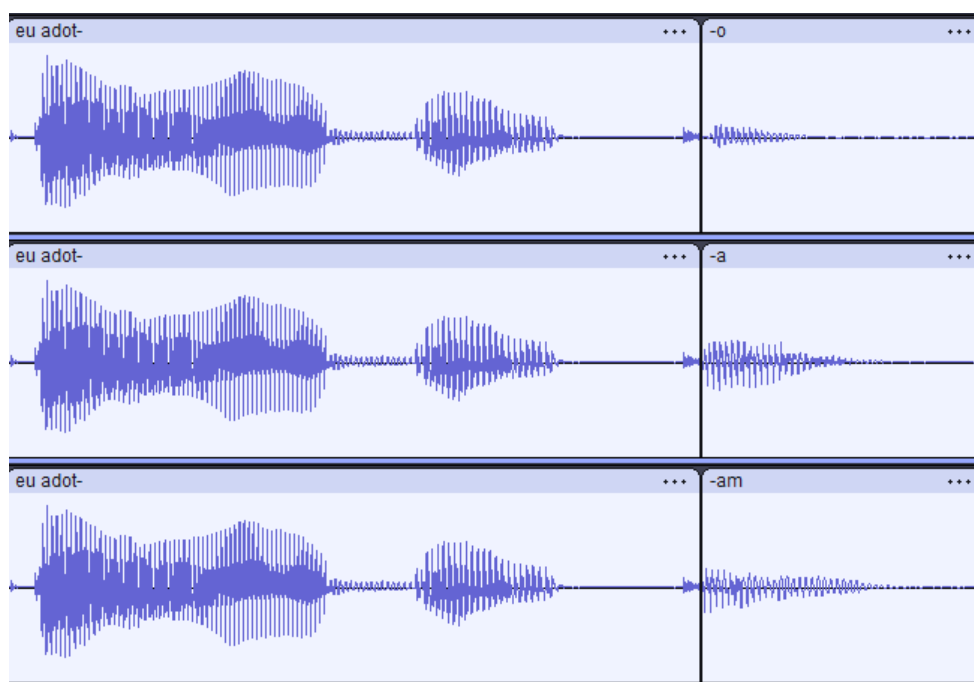
dos verbos “adorar” e “adotar” formam pares mínimos que estão todas na mesma faixa de frequência (*i.e.*, as três flexões de “adorar” são de alta frequência), como verificado no corpus LexPorBR (Estivalet; Meunier, 2015). Como o experimento ficaria demasiadamente longo se variássemos a condição de frequência, optamos por dividir o experimento. A escolha de começar pelo verbo de baixa frequência deve-se por um consenso na literatura sobre processamento morfológico que palavras de baixa frequência são segmentadas em morfemas no processamento, o que evita um possível efeito de MMN lexical que ocultaria efeitos gradativos de sMMN, já que respostas de MMN lexical tem alta amplitude. Todos os sintagmas são compostos pelo pronome pessoal de primeira pessoa “eu” seguido por flexões dos verbos “adotar”. A escolha pelo pronome ocorreu em função de permitir escolhas de verbos com violação gradada do mesmo tipo (concordância com pronome) que tem a menor variação fonológica e de duração possível.

Há uma fala natural, sem pausa entre o pronome e o verbo, para evitar um efeito de lista (em que o estímulo não é reconhecido como sintagma, mas como palavras separadas). Cada estímulo na condição tem aproximadamente 1000ms de duração, seguido por um *jitter* de 500ms, de modo que o *stimulus onset asynchrony* (SOA) total é de 1500ms. O ponto de desvio (PD) de cada estímulo ocorreu após o fonema /t/ na sílaba final, aos 709ms.

A gravação dos estímulos foi feita por uma falante mulher em um aplicativo de gravação de um smartphone Samsung S23 Ultra em ambiente silencioso. A voluntária foi instruída a repetir 5 vezes cada uma das seguintes frases: “eu adoto”, “ele adota” e “eles adotam”. A entonação mais clara e natural do sintagma “eu adoto” foi escolhida. O trecho “eu adot-” e os segmentos /o/, /a/ e /am/ foram extraídos das frases gravadas. Para garantir que um possível efeito de recorte no *splicing* não seja responsável pela distinção entre o estímulo gramatical “eu adoto” e suas versões agramaticais, a vogal /o/ de outra gravação da frase “eu adoto” foi recortada e inserida na base “eu adot-”. Uma versão de cada um dos estímulos do experimento foi criada dessa forma, para eliminar variações fonológicas nas comparações até o ponto de desvio, que é após a consoante /t/. Por exemplo, no contraste entre “eu adoto” e “eu *adota”, a variação acústica e fonológica restringe-se ao segmento final, de forma que se reduz o efeito da mudança acústica no efeito de MMN. Em outras palavras, os estímulos são acusticamente idênticos até o ponto de desvio. Como a diferença entre os estímulos só é percebida após o ponto de desvio, é o PD que constitui o baseline. O *splicing* foi feito no programa Audacity (versão 3.7.3). Utilizamos o Praat (versão 6.4) para manipular a intensidade sonora média, sendo ela mantida em 60 dB (mínimo 55, máximo 65) para que o volume ficasse nítido e em nível confortável.

Os arquivos de dos estímulos em si são similares em duração, com cerca de 1000ms, pois conta com um trecho em que há uma finalização natural das gravações, com uma pequena expiração. Apesar de parecer inaudível, o corte dos trechos de expiração estava provocando um problema de reconhecimento nos estímulos, com alguns relatos de efeito de estranhamento após repetições dos estímulos. O trecho audível pós-ponto de desvio /o/, na sílaba final, tem duração de aproximadamente 120ms e intensidade média de 47.9 dB. O trecho audível /a/ da sílaba final tem duração de aproximadamente 162ms e intensidade média de 54 dB. Por fim, o trecho audível /am/ da sílaba final tem duração de aproximadamente 179ms e intensidade média de 52.9 dB.

Figura 9 - screenshot do oscilograma do splicing dos estímulos auditivos no Praat.



Fonte: elaboração própria

Os arquivos de áudio dos estímulos estão disponíveis na plataforma OSF pelo link https://osf.io/8ytvz/?view_only=6af160c9884f42d0987c1ea685c3f61f . O mesmo link dá acesso ao arquivo em PDF com o questionário usado para a tarefa e com o registro de consentimento livre e esclarecido (RCLE).

Os primeiros 10 estímulos de cada bloco foram estímulos padrão. A lista de estímulos foi pseudorandomizada, de forma que não houvesse repetição consecutiva do estímulo desviante e ao menos um estímulo padrão ocorresse entre cada reprodução de desviante.

4.3 Desenho experimental

Haverá no experimento duas condições de interesse no experimento. Primeiramente, há uma condição de gramaticalidade (gramatical, “1 violação” e “2 violações”). Em decorrência do contexto em que cada estímulo ocorre nos blocos (*i.e.*, como “padrão” ou “desviante”), há um cruzamento com a condição de gramaticalidade da qual decorre uma condição “tipo de estímulo” (nos blocos 1 e 2, “gramatical padrão”, “1 violação desviante” e “2 violações desviante”; nos blocos 3 e 4, “1 violação padrão”, “gramatical desviante” e “2 violações desviante”).

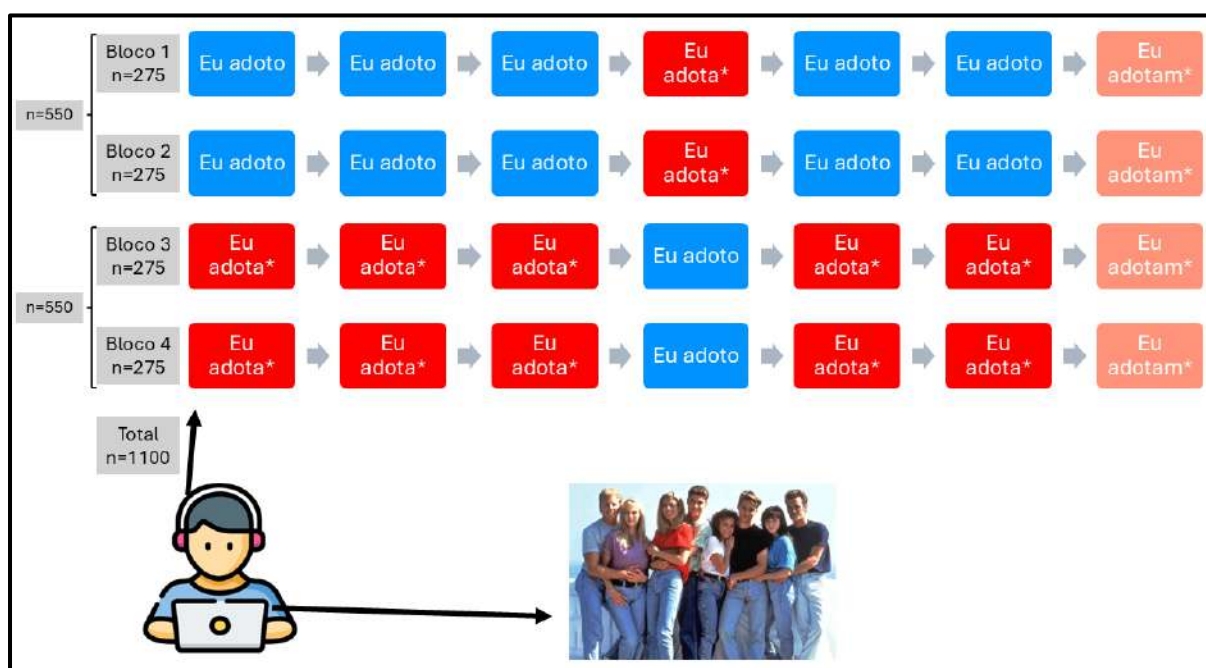
O experimento está dividido em 4 blocos, cada com 275 estímulos, totalizando 1100 estímulos no experimento (4x275). Como todos os participantes verão todas as condições, o desenho experimental é *within subjects*. Os blocos 1 e 2 tem o estímulo da condição “gramatical” como padrão e os blocos 3 e 4 tem o estímulo da condição “1 violação” como padrão. Não randomizamos os blocos para que os estímulos gramaticais começassem como os mais frequentes, já que houve um receio que iniciar o experimento com blocos em que o estímulo com a condição “1 violação” como padrão poderia levar a uma habituação, perda de sensibilidade à gramaticalidade. Como explicado anteriormente, a adoção deste desenho relaciona-se com o cálculo do MMN de identidade, que exige um mesmo estímulo ocorra em um bloco como padrão, e em outro como desviante.

Tabela 2 - desenho experimental e quantidade de estímulos por condição

Bloco	Padrão	Desviante
1 + 2	Gramatical (n=330)	1 violação (n=110)
		2 violações (n=110)
3 + 4	1 violação (n=330)	Gramatical (n=110)
		2 violações (n=110)

Fonte: elaboração própria

Figura 10 – ilustração de reprodução dos estímulos no primeiro bloco e ordem dos sub-blocos



Fonte: elaboração própria

O total de estímulos obedece à proporcionalidade recomendada de ocorrência de estímulos padrão/desviante em paradigma *multifeature*. No presente experimento, há um total de 660 repetições de estímulos padrão e 440 repetições de estímulos desviantes. Os estímulos padrão, assim, correspondem a 60% do total, enquanto os dois desviantes correspondem a aproximadamente 20% do total cada. Cada dois blocos tem o mesmo estímulo como padrão, e dois estímulos como desviantes. Os blocos 1 e 2 apresentam como estímulos desviantes os sintagmas com 1 violação e com 2 violações e como estímulo padrão o sintagma gramatical. Nos blocos 3 e 4, o estímulo padrão é o sintagma com 1 violação e os estímulos desviantes são os sintagmas gramatical e com 2 violações. A divisão foi feita desta forma para que o tempo de experimento corrido não fique prolongado demais para o participante. O recomendado de repetições total para cada tipo de estímulo desviante é de aproximadamente 150 (Näätänen *et al.*, 2007; Duncan *et al.*, 2009), o que é uma quantidade maior do que empregamos a cada par de sub-blocos. Contudo, caso a recomendação fosse seguida à risca, cada bloco e o experimento total ficariam longos, já que se há maior número de estímulos desviantes, também deve aumentar o número de estímulos padrão para que haja manutenção da proporcionalidade. Assim, optou-se por seguir o critério de proporcionalidade estímulo padrão/desviante com uma quantidade menor de estímulos, que parece ser o fator mais uniforme na literatura, ao passo que há certa variabilidade quanto ao total de estímulos empregados.

4.4 Participantes

Os participantes foram estudantes universitários da Universidade Federal do Rio de Janeiro, entre 18 e 29 anos de idade, destros e falantes nativos de Português Brasileiro. Participantes que não fossem destros, não estivessem na faixa etária e não fossem falantes nativos de PB não fizeram parte do experimento. A idade média dos participantes foi de 20,5 anos (desvio padrão: 2,4). Houve 23 participantes no estudo, 12 do sexo masculino. Definimos como critério de exclusão de participante por rejeição de artefatos aqueles cuja rejeição foi acima de 30% dos dados, o que resultou na exclusão de 1 participante. Assim, os dados de 22 participantes foram incluídos na análise. Os participantes relataram ter audição normal, não apresentar condição neurológica subjacente que comprometa a linguagem e ter visão normal ou corrigida por óculos. Todos assinaram um Registro de Consentimento Livre e Esclarecido. O experimento foi aprovado pelo comitê de ética em pesquisa (código: 77879524.2.0000.5582).

4.5 Procedimentos

Os participantes foram instruídos a sentar em uma cadeira de frente a um monitor, em posição confortável, a não se mexer e a evitar piscadas fortes durante o experimento. Eles colocaram um fone de ouvido intra-auricular higienizado (modelo JBL Tune 310C) por onde os estímulos auditivos foram reproduzidos. O experimento consistiu em apresentação auditiva dos estímulos enquanto o participante assistiu a trechos de episódios mutados da série “Barrados no Baile” (90210 Beverly Hills). Os episódios foram editados para que qualquer trecho com cenas que continham grafemas fosse removido. Os episódios foram cortados em trechos que tivessem a mesma duração aproximada de cada bloco, em torno de 7 minutos. Para incentivar os participantes a direcionarem a atenção ao vídeo, os participantes foram instruídos a ignorar os fones de ouvido e, para garantir a manutenção da atenção, houve um questionário feito entre blocos sobre o que o participante pôde depreender sobre a série apenas pelo vídeo. As perguntas múltipla-escolha inquiriram sobre objetos nas cenas, personagens envolvidos em determinadas situações e interpretações sobre o que houve em cenas específicas. Três perguntas

foram feitas para cada trecho assistido, totalizando 12 perguntas. O questionário está disponível no mesmo link para o OSF anterior.

A pergunta foi feita oralmente pelo experimentador e as respostas registradas também pelo experimentador em um Google Formulário. Antes do início do experimento, os participantes foram apresentados aos personagens da série e receberam exemplos de perguntas que poderiam ocorrer no decorrer do experimento (*e.g.*, “O que David faz que assusta as amigas?”). Cada sub-bloco teve duração média de 7 minutos. A duração total do experimento foi de cerca de uma hora e meia, contando com o tempo de (i) preparo do participante relacionado ao equipamento de EEG, (ii) duração dos blocos, (iii) resposta ao questionário após os blocos e (iv) pausa para descanso.

O início dos sub-blocos e do vídeo ocorreram pelo pressionamento de teclas pelo experimentador a partir da confirmação do participante de que estava pronto para iniciar. A apresentação dos estímulos e o envio de um trigger no momento de exibição do estímulo foi feita pelo software E-prime. O vídeo da série foi reproduzido em outro computador, fora do ambiente do E-Prime, para que não houvesse sobrecarga no processamento do E-Prime que viesse a provocar eventuais atrasos na reprodução dos arquivos de áudio ou erros indesejados de execução do experimento.

4.6 Gravação de dados de EEG

Os dados foram gravados a partir de um conjunto de 32 eletrodos Ag/AgCL ativos (actiCAPsystem, BrainProducts), em disposição 10-20. O canal Oz foi movido para a posição do FCz, já que este é um dos canais em que o MMN tipicamente aparece com maior amplitude, incluindo MMN sintático (Pulvermüller; Shtyrov, 2003). Os canais incluídos na coleta, dessa forma, foram os canais Fp1, Fp2, Fz, F3, F7, F4, F8, FCz, FC1, FC5, FT9, FC2, FC6, FT10, Cz, C3, T7, C4, T8, CP1, CP5, TP9, CP2, CP6, TP10, Pz, P3, P7, P4, P8, O1 e O2. A filtragem *online* foi de 0.01-50Hz (*notch* de 60Hz) apenas para fins de visualização, com taxa de amostragem de 500 Hz na gravação dos dados. A referência tanto *online* quanto *offline* foi nos eletrôdos colocados nos mastóides (canais TP9 e TP10). O sinal de EEG foi captado pelo amplificador actiCHamp da Brain Products. O amplificador também recebe o sinal de *trigger*, que é enviado do computador no qual é feita a apresentação dos estímulos com E-prime via um adaptador no *button box* Chronus para o computador onde os dados eram gravados, através do programa PyCorder. A impedância foi mantida abaixo de 20 k Ω .

4.6 Processamento de dados

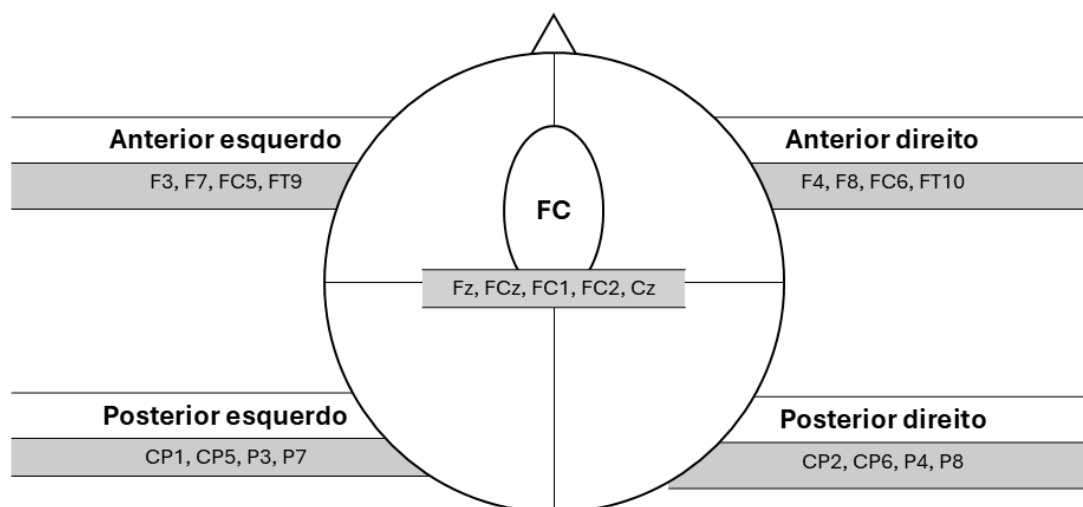
O pré-processamento e o processamento dos dados foi executado através do programa BrainVision Analyzer. Houve filtragem *offline* com passa-alto de 0.1Hz e passa-baixo de 40Hz (*notch* de 60Hz aplicado). O EEG foi inicialmente segmentado em épocas de -100 a 1500ms relativo ao início do estímulo. O trecho -100 a 0ms foi utilizado para correção de *baseline*. A detecção e rejeição de artefatos foi executada de forma semi-automática, a partir dos seguintes critérios: variação de voltagem máxima permitida de 50 $\mu\text{V}/\text{ms}$, diferença de valores de amplitude mínima e máxima de 100 μV em intervalo de 100ms e amplitude mínima-máxima permitida $\pm 75 \mu\text{V}$. Em seguida, aplicamos um processo de *ocular correction independent component analysis* (*ocular correction ICA*) para correção de artefatos oriundos de piscadas, ao passo que épocas contendo artefatos relacionados a movimentos oculares horizontais foram removidos dos dados durante a etapa de rejeição de artefatos. O eletrodo escolhido para alimentar o algoritmo de ICA e, por conseguinte, detectar as piscadas foi o FP1, uma vez que seu posicionamento mais próximo à testa em comparação com os demais faz com que os efeitos de piscada sejam registrados de forma mais perceptível nele. Em seguida, uma nova rejeição de artefatos foi executada. A rejeição total de artefatos média foi de aproximadamente 7,35% (DP: $\sim 6,12\%$). Então, uma nova segmentação foi aplicada sobre os dados, para formar épocas de -200 a 750ms relativos ao PD nos estímulos. O trecho de -200 a 0ms foi usado para correção de *baseline*. Depois, geramos médias das amplitudes de cada canal para cada tipo de estímulo em cada sub-bloco. Por fim, as médias foram exportadas por sujeito para análise no RStudio em três intervalos: 150-250ms, 250-350ms, 350-450ms.

4.7 Análise dos dados

No Analyzer, foram gerados os gráficos de ERPs (tanto dos canais quanto de ROIs) e extraídas as amplitudes médias por condição, sujeito e canal, dos seguintes intervalos temporais: 150ms-250ms, 250-350ms, 350-450ms. Os ERPs médios foram gerados a partir da promediação no RStudio. A análise das amplitudes médias foi feita no R Studio. Também foram feitas no R a subtração de amplitudes médias e geração de amplitudes médias de regiões topográficas (fazendo média a partir dos valores dos canais que compõem determinada ROI). Optamos por extrair a amplitude média de cada par de blocos, sem separá-los. As subtrações

de amplitudes médias foram realizadas em três formas: (i) para calcular o MMN clássico, (ii) para calcular o MMN de identidade das condições “gramatical” e “1 violação” e (iii) para observar efeitos de agramaticalidade. Definimos uma região de interesse (*region of interest*, ROI) fronto-central (FC) para análise do efeito de MMN que compreende os eletrodos FC1, FC2, Fz, FCz e Cz, já que estes eletrodos compreendem a topografia em que o MMN é tipicamente eliciado, a região fronto-central (Näätänen, 1995; Pulvermüller; Shtyrov, 2003; Pulvermüller; Shtyrov, 2006). Para observar efeitos topográficos no contraste por gramaticalidade, dividimos os eletrodos em cinco regiões topográficas (Fig. 11): fronto central (FC1, FC2, Fz, FCz, Cz), anterior esquerda (F3, F7, FC5, FT9), anterior direita (F4, F8, FC6, FT10), posterior esquerda (CP1, CP6, P3, P7) e posterior direita (CP2, CP6, P4 e P8).

Figura 11 - distribuição de eletrodos por região topográfica



Fonte: elaboração própria

Em cada intervalo, as amplitudes médias das condições “1 violação desviante” e “2 violações desviante” dos blocos 1 e 2 foram, cada, subtraídas das amplitudes médias da condição “gramatical padrão”, no intuito de calcular o MMNc. O mesmo foi feito com os blocos 3 e 4, em que o estímulo padrão foi o sintagma com “1 violação” e os desviantes foram os sintagmas nas condições “gramatical” e “2 violações”.

Para calcular o MMNi, as amplitudes médias das condições “gramatical desviante” e “1 violação desviante” foram subtraídas de suas contrapartes no contexto de padrão em cada intervalo. Ou seja, a amplitude média da condição “gramatical padrão” dos blocos 1 e 2 foi subtraída da amplitude média da condição “gramatical desviante” nos blocos 3 e 4, com a mesma subtração feita para a condição “1 violação”.

Para detectar efeitos gramaticalidade, três subtrações foram realizadas. Primeiramente, subtraímos a amplitude média da condição “2 violações desviante” nos blocos 1 e 2 da amplitude média da condição “1 violação desviante” nos mesmos blocos, para cada intervalo. Isso permite detectar efeitos cumulativos de agramaticalidade. Também fizemos a subtração das mesmas amplitudes médias com a amplitude média da condição “gramatical desviante” nos blocos 3 e 4, como forma de observar efeitos de gramaticalidade não relacionados ao efeito de MMN, em cada intervalo. A opção por não utilizar os estímulos padrão para a análise de efeitos de gramaticalidade foram para manter o contexto de ocorrência dos estímulos constante (isto é, todos como desviantes).

4.8 Protocolo estatístico

Executamos a análise estatística através do programa RStudio (versão 2025.09.2+418, R Core Team, 2013). Adotamos o modelo de efeitos mistos, através da aplicação da função `lmer` do pacote `lme4` (Bates *et al.*, 2015). Para comparar modelos de efeitos mistos mais simples e mais complexos (ou seja, para comparação aninhada), utilizamos análise de variância (*Analysis of Variance*, ANOVA). O efeito aleatório em todos os modelos foi “participante”, com apenas o *slope* aleatório tendo sido adotado nos modelos. A variável dependente foi “amplitude média”. As variáveis independentes de interesse foram “tipo de estímulo” e “gramaticalidade”. Testes de Tukey HSD foram aplicados para a realização de comparações de pares múltiplos post-hoc pelo pacote `lsmeans` (Lenth, 2015). Para testar efeitos de regiões topográficas quando havia mais de uma região topográfica com efeitos estatisticamente significativos, empregamos modelos com “região topográfica” como variável independente e “subtração” como variável dependente (*i.e.*, o resultado da subtração da amplitude média da condição “1 violação” e da amplitude média da condição “2 violações”). A avaliação da normalidade dos dados foi executada através de inspeção de gráficos de histograma de efeitos residuais dos modelos e de gráficos de *Q-Q plot*.

4.9 Percurso do preparo do experimento: testes piloto e modificações

Este experimento é o resultado de anos de estudo e ponderações sobre replicação com adaptação para a língua portuguesa e para as condições de aplicação de experimentos no Brasil.

Ressalta-se que todos os testes piloto, diferentemente do experimento final, foram realizados sob o paradigma *oddball*, não sob o paradigma *multifeature*.

Quatro testes pilotos foram realizados para verificar a adequação do desenho experimental. O primeiro envolveu a escuta dos estímulos auditivos sem gravação de dados de EEG. Ao contrário da proposta final, inicialmente propunha-se investigar em sessões separadas, para manter o tempo de experimentação consecutivo mais curto, uma condição de alta frequência (com o verbo “adorar”) e uma condição de baixa frequência (com o verbo “adotar”). Também, diferentemente do experimento final, as sentenças experimentais eram “ele adota”, “ele *adotam” (violação de concordância de número) e “ele *adotem” (violação combinada de conjugação de modo e de concordância de número). A escolha em um primeiro momento de não usar violação de pessoa decorreu da preocupação em engajar efeitos não-sintáticos, já que a alternativa pensada originalmente, e utilizada no estudo que inspirou este experimento, envolvia uma violação de concordância de pessoa que também pode envolver processos cognitivos discursivos. Esta decisão foi revista posteriormente por sugestões da banca de qualificação, conforme será explicado. Ambos os testes pilotos foram rodados com a condição de baixa frequência. Dessa forma, a participante voluntária do primeiro piloto escutou 6 blocos que totalizaram 1.878 estímulos: dois blocos em que o estímulo padrão era gramatical (“ele adota”) e o estímulo desviante era da condição violação única (“ele *adotam”), dois blocos em que o estímulo padrão era gramatical e o estímulo desviante era da condição violação combinada (“ele *adotem”) e dois blocos em que o estímulo padrão era da condição de violação única (“ele *adotam”) e o estímulo desviante era da condição gramatical (“ele adota”). A comparação original que se pretendia era de cálculo do MMN “tradicional”, não de identidade, uma decisão que foi revista posteriormente e que resultou no acréscimo de blocos no experimento.

O filme distrator testado foi um documentário mudo sobre a natureza. Entre cada bloco, a participante tinha que responder quais animais haviam aparecido no decorrer do trecho assistido durante o bloco. Apesar de a participante não ter deixado de mencionar nenhum animal, houve relato de muitos períodos de tédio e momentos de reação emocional com contração facial quando apareciam animais considerados “fofos” (ex.: coalas). No caso dos momentos de tédio, a participante relatou que foi quando ela mais prestava atenção involuntariamente aos estímulos auditivos no fone, de forma que poderia prejudicar a obtenção de um efeito MMN, que requer atenção direcionada a outro estímulo. As reações emocionais poderiam também suscitar movimentos na face que poderiam reverberar nos dados de EEG.

Outro problema encontrado dizia respeito à qualidade do áudio das gravações: havia uma percepção equivocada do segmento final do estímulo, como se o que estivesse sendo reproduzido fosse a frase /ele adot/ seguido por um ruído sem identificação, semelhante ao segmento /am/. As hipóteses levantadas inicialmente foram relacionadas ao procedimento de gravação e ao microfone usado. A reprodução individual do estímulo não induzia a esse efeito, mas a reprodução consecutiva, sim. Isso foi relatado pela participante e atestado pelo experimentador posteriormente. No terceiro bloco, a participante também relatou que todos os estímulos reproduzidos estavam sendo emitidos como ruídos, o que aparentemente foi devido a uma falha no software em que o experimento foi rodado, o E-Prime. Como não houve registro de falha no log emitido pelo programa, imaginou-se que poderia ter sido um caso à parte.

No segundo teste piloto, que contou com gravação de dados de EEG, adequamos o experimento da seguinte forma: o filme mudo passou a ser um episódio da série “Barrados no Baile”, com um questionário sobre o conteúdo do episódio entre cada bloco. A gravação seguiu os parâmetros determinados na subseção 4.6. Ademais, após duas tentativas de regravar os estímulos, uma com o mesmo voluntário anterior e uma com outro voluntário, terem incorrido no mesmo problema relatado anteriormente, mesmo com mudança do microfone utilizado e do ambiente, que passou a ser uma cabine com isolamento acústico, optou-se por solicitar a uma voluntária que gravasse os estímulos. A suposição foi de que a voz mais aguda e menos grave feminina não provocasse o efeito induzido, o que se mostrou eficaz.

Após o segundo piloto, incluímos dois blocos em que o estímulo das condições “violação única” e “violação combinada” também ocorressem como padrão. Isso ocorreu devido a uma releitura dos artigos e melhor compreensão da importância de calcular o “MMN de identidade”, o qual requer que cada tipo de estímulo ocorra como padrão em um bloco e como desviante em outro.

O segundo piloto contou com 8 participantes, e outros dois problemas surgiram nesta etapa. O primeiro ocorreu com o primeiro participante, que reportou durante o quinto bloco que todos os estímulos foram reproduzidos de forma defeituosa, de modo semelhante ao que ocorrera anteriormente. Mais uma vez, não houve registro de erro pelo E-Prime. O segundo ocorreu com o segundo participante, quando o E-Prime, sem motivo aparente, interrompeu seu funcionamento. Dada a suposição de que os defeitos poderiam estar relacionados com o computador em que o experimento era executado, optou-se por trocar o computador, o que foi bem-sucedido, dado que os outros 6 participantes do nosso terceiro teste piloto não reportaram defeitos de qualquer natureza.

Mais duas questões surgiram após a rodagem do terceiro teste piloto, na fase de pré-processamento dos dados no Analyzer. Primeiramente, percebeu-se que havia falta de intervalo entre estímulos em decorrência de um erro na configuração no E-Prime. Após configurar corretamente, o intervalo entre estímulos passou a ser executado. A segunda diz respeito à qualidade do sinal. Apesar de a impedância nos eletrodos ter ficado abaixo de 20 k Ω , os dados ficaram demasiadamente ruidosos em todos os participantes. Um motivo elencado para explicar tal fato foi que a repetição exaustiva sem intervalo entre estímulos pode ter deixado os participantes inquietos, ainda que na gravação houvesse um breve trecho de silêncio antes da reprodução do estímulo. A ausência de intervalo nos estímulos e o alto grau de ruído nos dados impediu que fosse viável dar prosseguimento à análise.

O terceiro teste piloto, que teve 3 participantes, contou com mais uma alteração no desenho, devido a uma preocupação com o controle do experimento após releitura de estudos de MMN. Como a maior parte dos estudos de sMMN não inclui uma condição em que o mesmo verbo ocorre sem provocar agramaticalidade, e como o MMN também é sensível a mudanças acústicas e fonológicas nos estímulos, é possível que o efeito de MMN se deva primordialmente a variações acústicas e/ou fonológicas. Por exemplo, Pulvermüller e Shtyrov (2003) encontraram o efeito de sMMN ao contrastar as sentenças *we come* e *we *comes*. Se os autores não tivessem uma condição em que os verbos ocorreram sem pronome (logo, sem efeitos de gramaticalidade) e que obteve um efeito de MMN menor, o efeito de sMMN poderia ter sido explicado apenas por uma mudança acústica, já que para que haja agramaticalidade, foi necessário acrescentar um afixo “-s” ao final do verbo. Por isso, optou-se por abandonar a variável frequência em favor de uma variável de contexto sentencial (ou seja, contrastando ele adota x adota), já que um experimento que mantivesse ambas as variáveis ficaria demasiadamente extenso.

Tentamos representar um controle introduzido por Pulvermüller e Shtyrov, que, para poder comparar estímulos com e sem contexto sentencial, introduziram um ruído filtrado que tinha envelope e características espectrais que imitavam o pronome “we”, como uma forma de manter similaridade acústica e de duração mesmo na condição sem contexto sentencial. Ou seja, tanto o estímulo composto por ruído filtrado e verbo “come(s)” quanto as sentenças “we come(s)” tinham a mesma duração e envelopes parecidos no segmento prévio ao verbo. No entanto, após diversas tentativas de reproduzir o mesmo tipo de ruído filtrado, observamos que a única forma de manter aspectos acústicos semelhantes entre ruído e pronome ao ponto de as mudanças não poderem ser, de forma nenhuma, *confounds* que expliquem os efeitos obtidos, seria se o ruído fosse exatamente idêntico ao som de “ele” ou tão próximo ao som de “ele” que

o ruído poderia ser reconhecido como a palavra “ele”, o que viola a lógica de uma condição sem contexto sentencial.

Por isso, os estímulos fora de contexto sentencial ocorreram de forma isolada, sem ruído prévio, com a garantia de que os segmentos dos estímulos que provocam desvio do estímulo padrão são acusticamente idênticos tanto na condição com quanto sem contexto sentencial. Ou seja, quando os verbos “adota”, “adotam” e “adotem” ocorreram como desviantes nos blocos com pronome e sem pronome, seriam os mesmos segmentos finais que desviariam do padrão, obtidos do mesmo *splicing*, o que garante que eram acusticamente idênticos (exceto por um pequeno efeito *fade-in* no início do verbo sem contexto sintagmático). A comparação entre o efeito de MMN com verbos isolados com o efeito de MMN de verbos com pronome permitiria avaliar possíveis dissociações entre efeitos acústicos e efeitos sintáticos enquanto.

Contudo, a soma do acréscimo de blocos para o cálculo do MMN de identidade após o primeiro piloto e do acréscimo da condição sem contexto sintagmático incorreu em um experimento com uma duração total de 3 horas. A partir do redesenho, havia 16 blocos no total. No pré-processamento dos dados e na observação dos participantes enquanto faziam o experimento, foi perceptível que o cansaço e o incômodo estavam afetando a qualidade dos dados.

Por isso, após contribuições da banca da qualificação, decidimos (i) pela adoção do paradigma *multifeature*, o que reduziu o tempo de experimento, e (ii) pelo cálculo do MMN de identidade apenas dos estímulos nas condições “gramatical” e “1 violação” e de seus respectivos verbos sem contexto sintagmático. Isso reduziu o experimento em oito blocos. Em um cenário ideal, todos os MMN de identidade seriam calculados, mas também não é útil ter um experimento demorado que leva a sinais com muitos artefatos que incorram em alta rejeição de artefato, o que inviabiliza qualquer análise. A lógica foi que, se houvesse MMN de identidade para duas das três condições de gramaticalidade, isso já seria suficiente para reduzir a possibilidade de mesmo o potencial MMN clássico ser provocado apenas por influência de fatores acústicos. Ou seja, esta medida permitiria maior segurança em adotar o cálculo do MMN clássico como parâmetro para a discussão. Mais uma alteração foi feita nos estímulos: apesar de uma rejeição inicial de incluir uma condição de violação de concordância de pessoa, houve uma preocupação da banca de qualificação de que a ausência de um pronome relativo “que” não incorresse em um efeito de violação gramatical na condição de violação combinada (“ele *adotem”). Ademais, isso significaria comparar fenômenos diferentes, um que envolve concordância com o pronome pessoal (violação por concordância de número) e um outro que envolve contexto sintático (violação de conjugação esperada por ausência de conjunção

integrante). Por este motivo, atendemos à sugestão de um dos membros da banca de usar o pronome “eu” e violações de concordância de pessoa (“eu *adota”) e de pessoa e de número (“eu *adotam”), o que havia sido discutido originalmente.

A alteração final ocorreu após os seis primeiros participantes do experimento reportado nesta tese. A redução de tempo do experimento para 1 hora e 30 minutos ainda provocou preocupações por cansaço e inquietação dos participantes. Por isso, a partir do sexto participante, decidimos que a condição controle sem contexto sintagmático seria testada com outro grupo, em uma comparação entre sujeitos. Tal alteração não provocou descarte dos dados dos seis primeiros participantes pois a versão final do experimento é equivalente à primeira parte do experimento realizado por estes seis participantes, de forma que apenas não incluímos na análise os quatro últimos blocos registrados por estes participantes.

A segunda parte do experimento, em que a condição sem contexto sintagmático seria testada, não foi realizada em decorrência da análise dos dados da primeira parte do experimento. Esta análise apontou, como será evidenciado, que o efeito encontrado não é de *mismatch negativity*, mas um efeito direto de processamento morfossintático.

Capítulo 5 – Resultados

“*When in doubt, follow your nose.*”

Gandalf, O Cinzento

Reportaremos os resultados da seguinte forma segundo as seguintes divisões: (i) efeito analisado (*mismatch negativity* clássico, *mismatch negativity* de identidade e gramaticalidade) e (ii) intervalos de interesse a cada efeito analisado (150-250, 250-350 e 350-450ms). As diferentes análises se justificam em decorrência da janela temporal típica de efeitos de MMN e de gramaticalidade (como ELAN e LAN), além de uma possível sustentação do efeito que se traduz em latência mais longa, como visualmente observado nos gráficos. Quando a diferença entre modelo nulo e modelo mais complexo nas comparações aninhadas foi estatisticamente significativa, reportamos os valores *eta squared* referentes ao modelo mais complexo (R2 condicional e R2 marginal).

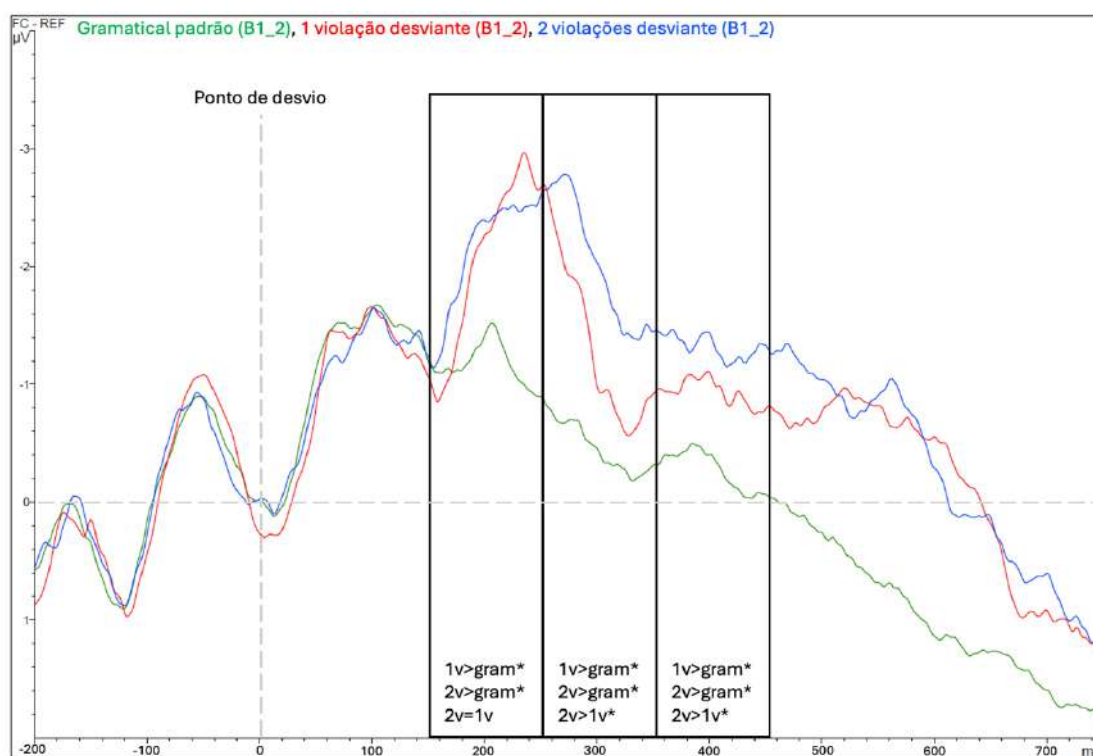
5.1 Mismatch Negativity

O *mismatch negativity* é a comparação mais clássica, que objetiva averiguar se há sensibilidade a um desviante e se há diferença na sensibilidade entre desviantes comparado a o mesmo contexto padrão. Para isso apresentaremos a comparação do estímulo desviante de um dado bloco com o estímulo padrão do mesmo bloco. Nos blocos 1 e 2, as comparações resultantes são “eu *adota” (1 violação, desviante)-“eu adoto” (gramatical, padrão) e “eu *adotam” (2 violações, desviante)-“eu adoto” (gramatical, padrão). Nos blocos 3 e 4, as comparações resultantes são “eu adoto” (gramatical, desviante)-“eu *adota” (1 violação, padrão) e “eu *adotam_desviante” (2 violações, desviante)-“eu *adota” (1 violação, padrão). Como o MMN possui efeito mais forte na região topográfica fronto-central (Pulvermüller; Shtyrov, 2003; Näätänen *et al.*, 2007; Pulvermüller *et al.*, 2008; Whiting; Marslen-Wilson; Shtyrov, 2013; Leminen *et al.*, 2013), a análise do MMN levará em o ROI pré-estabelecido (fronto-central).

5.1.1 Mismatch Negativity clássico – blocos 1 e 2, estímulo gramatical padrão

Na Figura 12 estão apresentados os ERPs referente à comparação clássica do MMN extraídos da região de interesse “fronto-central”, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão. Podemos observar que a partir de 150ms após o ponto desvio do estímulo, as condições padrão e desviantes começam a se distinguir com amplitudes maiores para os desviantes. Nos dois intervalos posteriores, é o desviante com 2 violações que apresenta amplitudes mais negativas. A seguir apresentamos as análises estatísticas por intervalo.

Figura 12 - gráfico de ERPs referentes à comparação clássica do MMN na região de interesse fronto-central, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.



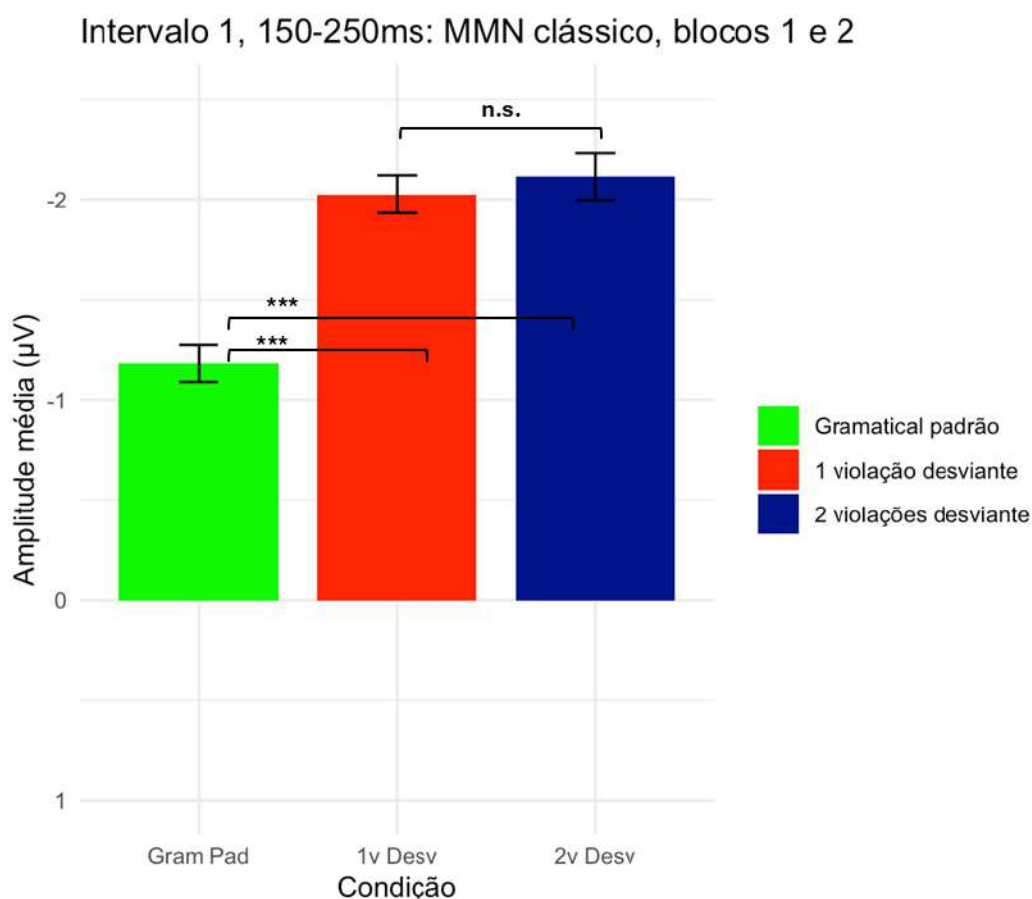
Fonte: elaboração própria

Intervalo 1: 150-250ms. No intervalo 1, fizemos uma comparação aninhada entre o modelo com “tipo de estímulo” (“gramatical padrão”, “1 violação desviante”, “2 violações desviante”) como variável independente (meanamp~tipo + (1|participante)) (R^2 condicional= 0.571 | R^2 marginal= 0.072) e o modelo nulo. A diferença foi significativa ($\chi^2 = 102.45$ | $DF = 2$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^*$), o que demonstra que a variável “tipo de estímulo” modulou os dados de amplitude média na região fronto-central.

Uma comparação de pares post-hoc com ajuste de Tukey mostrou que a diferença entre tipos de estímulo é significativa para os pares “1 violação desviante” x “gramatical padrão” (estimate= -0.8447 | SE= 0.0978 | $DF = 640$ | t.ratio= -8.633 | p.value < .0001*) e “2 violações

desviante” x “gramatical padrão” (estimate= -0.9325 | SE= 0.0978 | DF= 640 | t.ratio= -9.531 | p.value<.0001*). Ambas as comparações significativas apontam para amplitude média mais negativa nas condições com violação comparadas com a condição gramatical. O par “2 violações desviante” e “1 violação desviante” não atingiu diferença estatisticamente significativa (estimate= -0.0878 | SE= 0.0978 | DF= 640 | t.ratio= -0.898 | p.value= 0.6419). A figura 12 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 13 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 1, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.



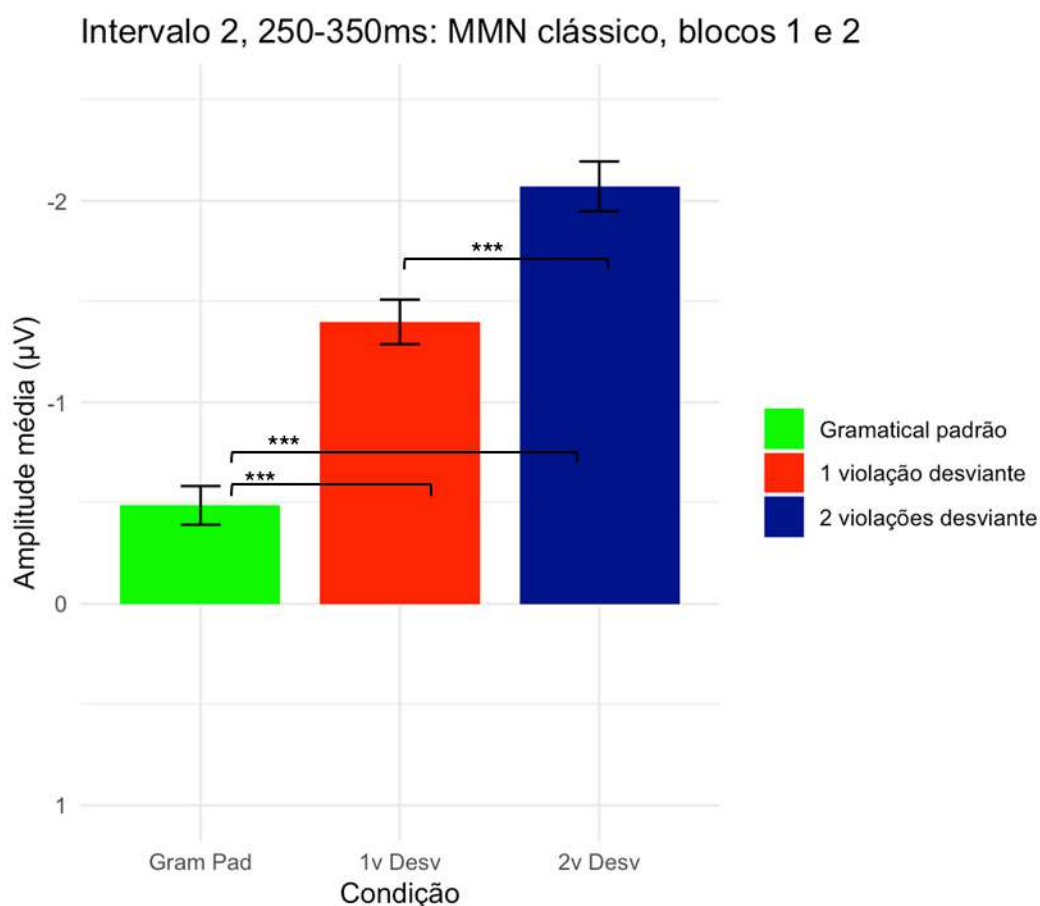
Fonte: elaboração própria

Intervalo 2: 250-350ms. A comparação aninhada realizada no intervalo 2 que contrastou o modelo com “tipo de estímulo” como variável independente (R^2 condicional= 0.546 | R^2 marginal= 0.138) com o modelo nulo apontou uma diferença estatisticamente significativa ($\chi^2 = 173.81$ | $DF = 2$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^{***}$). Isso mostra que a variável “tipo de estímulo” modula a amplitude média na região fronto-central.

Uma comparação de pares *post-hoc* com ajuste de Tukey mostrou que a diferença entre tipos de estímulo é significativa para a comparação entre todos os pares: “1 violação desviante”

x “gramatical padrão” (estimate= -0.911 | SE= 0.113 | DF= 640 | t.ratio= -8.078 | p.value <.0001*), “2 violações desviante” x “gramatical padrão” (estimate= -1.586 | SE= 0.113 | DF= 640 | t.ratio= -14.061 | p.value<.0001***) e “2 violações desviante” x “1 violação desviante” (estimate= -0.675 | SE= 0.113 | DF= 640 | t.ratio= -5.982 | p.value<.0001***). A comparação por pares mostrou que a amplitude média é mais negativa nas condições com violação desviantes do que a amplitude média em resposta à condição gramatical padrão. A comparação entre a condição “1 violação desviante” e a condição “2 violações desviante” mostra que a condição com “2 violações” elicia amplitude média mais negativa. A figura 13 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 14 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 2, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.



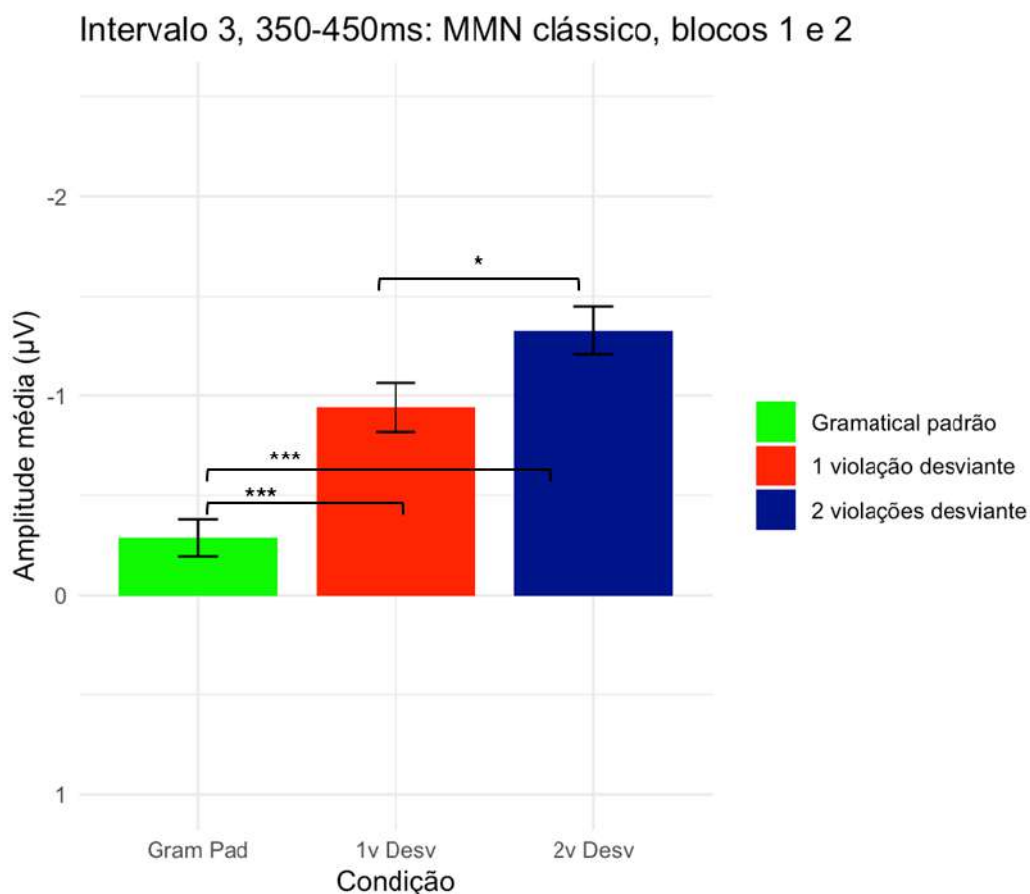
Fonte: elaboração própria

Intervalo 3: 350-450ms. A comparação aninhada apontou para uma diferença estatisticamente significativa entre os modelos nulo e o modelo com “tipo de estímulo” como variável independente (R^2 condicional= 0.465 | R^2 marginal= 0.063) (χ^2 = 73.241 | DF= 2

| $\Pr(>\text{Chisq}) < .0001^*$). Novamente, a análise demonstra que a variável “tipo de estímulo” modula a amplitude média das respostas eletrofisiológicas.

A análise *post-hoc* de pares com ajuste de “Tukey” mostrou que, também no intervalo 3, todos os contrastes são estatisticamente significativos: “1 violação desviante” x “gramatical padrão” (estimate= -0.653 | SE= 0.119 | DF= 640 | t.ratio= -5.466 | p.value <.0001*), “2 violações desviante” x “gramatical padrão” (estimate= -1.039 | SE= 0.119 | DF= 640 | t.ratio= -8.701 | p.value<.0001*) e “2 violações desviante” x “1 violação desviante” (estimate= -0.386 | SE= 0.119 | DF= 640 | t.ratio= -3.235 | p.value= 0.0037*). Assim como no intervalo 2, a análise aponta para (i) amplitudes médias mais negativas em resposta às condições desviantes com violação em comparação com a condição gramatical padrão e (ii) amplitude média mais negativa eliciada pela condição “2 violações desviante” em comparação com a condição “1 violação desviante”. A figura 14 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 15 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 3, com estímulos dos blocos 1 e 2, condição “gramatical” como padrão.



Fonte: elaboração própria

Considerações parciais:

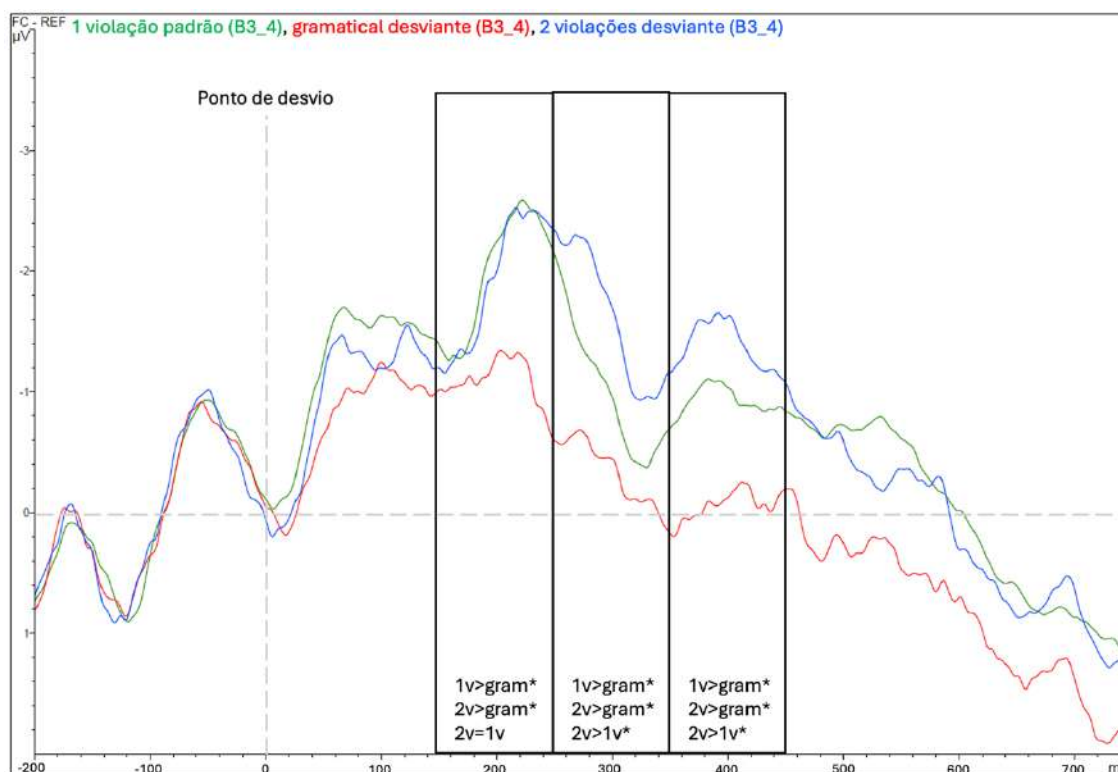
- Em consonância com o esperado pela literatura e pelo potencial de interesse, o MMN, os estímulos desviantes contendo violações (condições “1 violação” e “2 violações”) apresentam maior amplitude negativa do que a condição “gramatical”.
- Também, conforme a hipótese principal, a condição com “2 violações desviante” foi mais negativa que a condição com “1 violação desviante”, o que pode dialogar com um efeito de custo acumulado para o *parsing* morfossintático.
- Mas um dado surpreendente é o fato de que a latência do efeito tenha se mantido em todos os três intervalos. Um efeito sustentado na condição “2 violações” seria condizente com o esperado, mas a sustentação do efeito também na comparação entre as condições “1 violação desviante” e “gramatical padrão” surpreende, já que o MMN não tem tipicamente uma latência longa³. Este efeito fica ilustrado na figura 12, anteriormente apresentada, que mostra a amplitude por tipo de estímulo na região de interesse fronto-central.

5.1.2 Mismatch Negativity clássico – blocos 3 e 4, estímulo “1 violação” padrão

Na Figura 16, vemos os ERPs referentes à comparação clássica do MMN na região de interesse “fronto-central”, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão. Diferentemente dos ERPs dos blocos 1 e 2, o estímulo padrão não elicia a resposta com menor amplitude. Em vez disso, o estímulo desviante gramatical elicia uma amplitude menos negativa, enquanto o estímulo padrão “1 violação” e o desviante de duas violações apresentam amplitudes mais negativas. A seguir apresentamos as análises por intervalo.

³ Destaca-se, contudo, que há a possibilidade de picos tardios de MMN (e.g., Zachau et al., 2005), ainda que este não pareça ser o caso, já que não há mais pico de atividade negativa nos intervalos subsequentes nas condições “1 violação desviante” e “gramatical padrão”.

Figura 16 – gráfico de ERPs referentes à comparação clássica do MMN na região de interesse fronto-central, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.



Fonte: elaboração própria

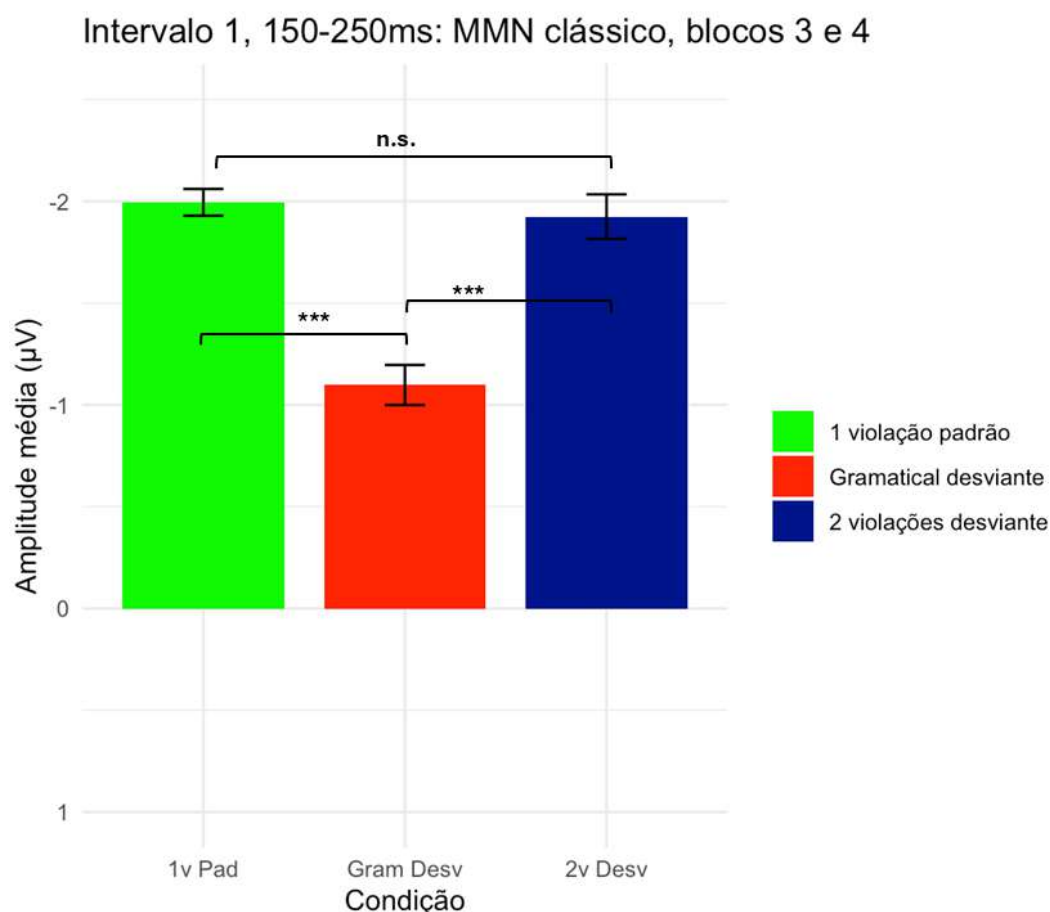
Intervalo 1: 150-250ms. A comparação aninhada no intervalo 1 entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “tipo de estímulo” (“1 violação padrão”, “gramatical desviante”, “2 violações desviante”) (R^2 condicional= 0.346 | R^2 marginal= 0.081) resultou em diferença estatisticamente significativa ($\chi^2= 76.545$ | $DF= 2$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^*$). Isso aponta para modulação da amplitude média pela variável “tipo de estímulo”.

A comparação de pares na análise *post-hoc* com ajuste de Tukey indicou diferenças estatisticamente significativas entre os pares “1 violação padrão” x “gramatical desviante” (estimate= -0.8972 | SE= 0.111 | $DF= 640$ | t.ratio= -8.095 | p.value < .0001*) e “2 violações desviante” e “gramatical desviante” (estimate= -0.8271 | SE= 0.111 | $DF= 640$ | t.ratio= -7.462 | p.value < .0001*). O par “2 violações desviante” e “1 violação padrão” não atingiu diferença significativa (estimate= 0.0701 | SE= 0.111 | $DF= 640$ | t.ratio= 0.632 | p.value= 0.8023).

Dois dados surpreendem neste ponto: o estímulo padrão na condição “1 violação” foi mais negativo que a condição “gramatical” como estímulo desviante, o que não é o esperado para efeitos de MMN mesmo quando se considera a violação morfossintática no estímulo padrão. Além disso, a ausência de diferença entre a condição “2 violações desviante” e “1

violação padrão” reforça a atipicidade do efeito no que tange o esperado de uma resposta MMN, já que respostas médias a estímulos desviantes devem ser mais negativas que respostas ao estímulo padrão, o que já foi identificado no intervalo 1 nos blocos 1 e 2. Ou seja, no intervalo 1, os blocos 3 e 4 apresentaram resultados que seguiram padrão semelhante aos blocos 1 e 2 quando se considera apenas a gramaticalidade dos estímulos, sem o efeito do contexto (desviante ou padrão). A figura 17 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 17 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 1, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.

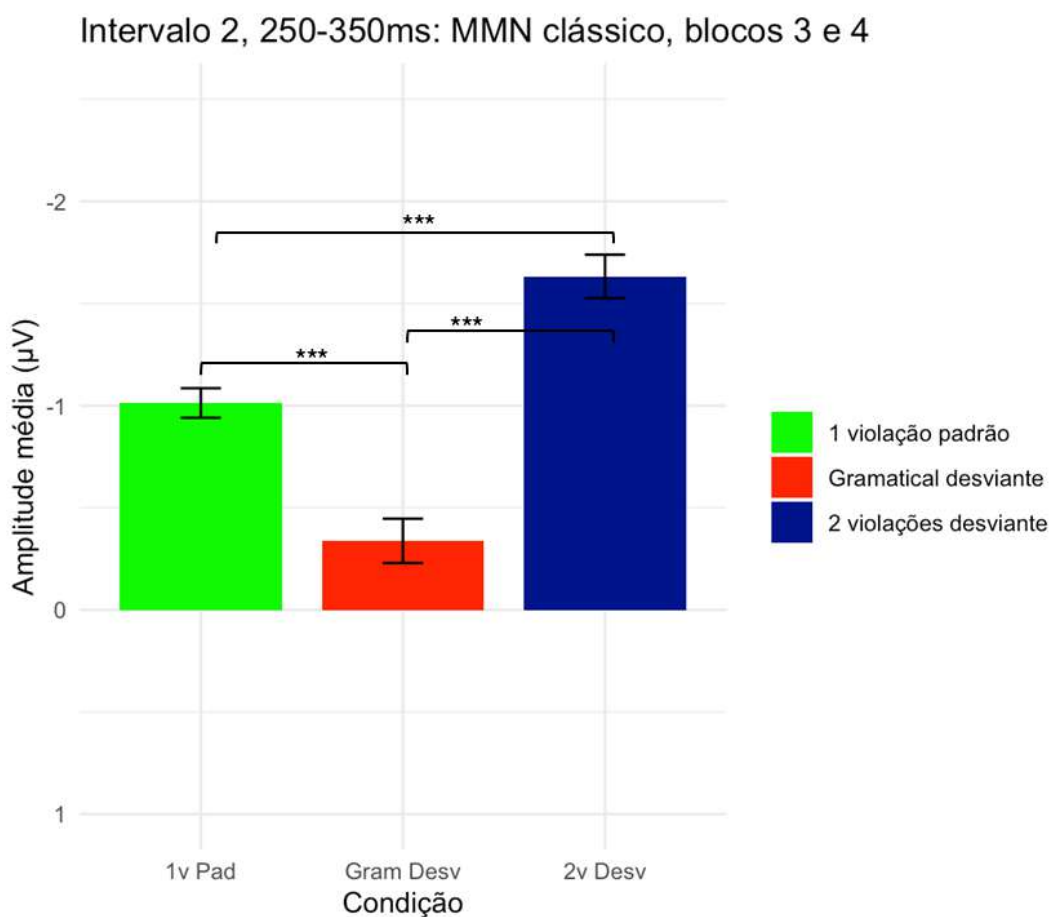


Intervalo 2: 250-350ms. Também no intervalo 2, a comparação aninhada apontou para diferença significativa entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “tipo de estímulo” (R^2 condicional= 0.374 | R^2 marginal= 0.119) (χ^2 = 114.75 | DF = 2 | $Pr(>\chi^2)$ <.0001*). Logo, a variável “tipo de estímulo” modulou a amplitude média.

A análise *post-hoc* com ajuste de Tukey resultou em diferenças estatisticamente significativas em todas as comparações de pares: “1 violação padrão” x “gramatical desviante”

(estimate= -0.675 | SE= 0.116 | DF= 640 | t.ratio= -5.834 | p.value< .0001*), “2 violações desviante” x “gramatical desviante” (estimate= -1.295 | SE= 0.116 | DF= 640 | t.ratio= -11.192 | p.value< .0001*) e “2 violações desviante” e “1 violação padrão” (estimate= -0.620 | SE= 0.116 | DF= 640 | t.ratio= -5.358 | p.value< .0001*). Como no intervalo 1, o intervalo 2 apresentou amplitudes médias mais negativas na comparação entre as condições com violação e a condição gramatical, com a condição “1 violação” eliciando amplitudes mais negativas que a condição “gramatical” mesmo que a primeira tenha ocorrido como padrão e, a segunda, como desviante. Ademais, a condição “2 violações desviante” apresentou amplitude média mais negativa que a condição “1 violação padrão”. A figura 18 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 18 – gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 2, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.



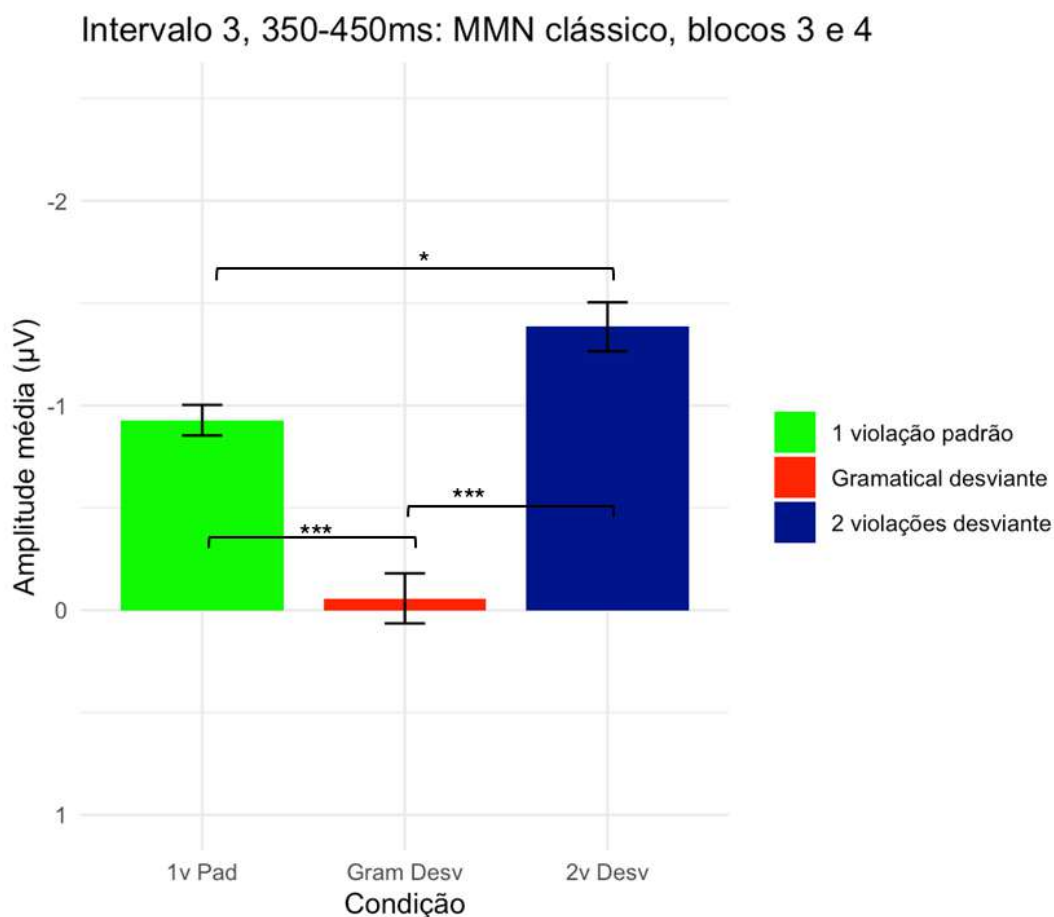
Fonte: elaboração própria

Intervalo 3: 350-450ms. A comparação aninhada no intervalo 3 resultou em diferença significativa entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “tipo de estímulo”

(R^2 condicional= 0.311 | R^2 marginal= 0.107) (Chisq = 94.782 | DF = 2 | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). Ou seja, as amplitudes médias foram moduladas pela variável “tipo de estímulo”.

Também no intervalo 3, a análise *post-hoc* com ajuste de Tukey resultou em diferenças estatisticamente significativas em todas as comparações de pares: “1 violação padrão” x “gramatical desviante” (estimate= -0.870 | SE= 0.134 | DF = 640 | t .ratio= -6.516 | p .value< .0001*), “2 violações desviante” x “gramatical desviante” (estimate= -1.327 | SE= 0.134 | DF = 640 | t .ratio= -9.933 | p .value< .0001*) e “2 violações desviante” e “1 violação padrão” (estimate= -0.456 | SE= 0.134 | DF = 640 | t .ratio= -3.417 | p .value= 0.0019*). Assim, temos como resultado amplitudes médias mais negativas por condição de gramaticalidade (2 violações > 1 violação > gramatical), independentemente de o estímulo na condição “1 violação” ser o estímulo padrão nos blocos 3 e 4. A figura 19 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 19– gráfico de comparação clássica do MMN no intervalo 3, com estímulos dos blocos 3 e 4, condição “1 violação” como padrão.

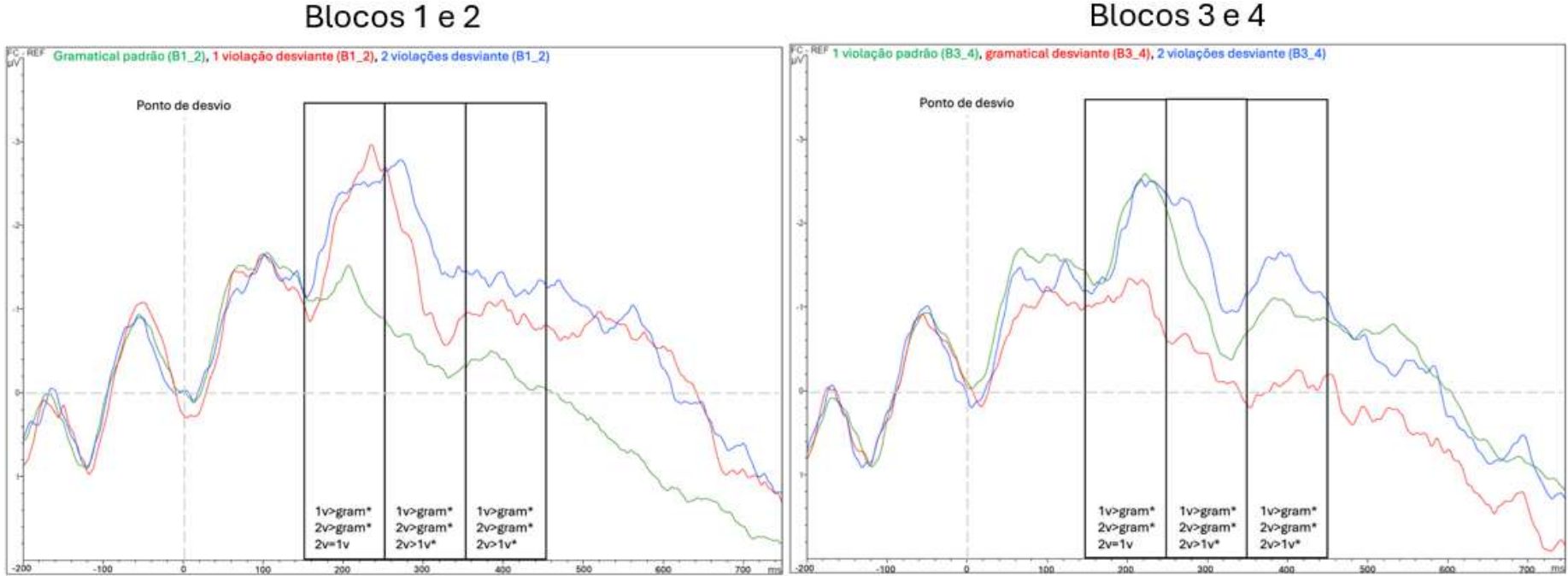


Fonte: elaboração própria

Considerações parciais:

- Os resultados da análise dos estímulos nos blocos 3 e 4, em que o estímulo padrão foi o estímulo na condição “1 violação” enquanto os estímulos desviantes foram os estímulos nas condições “gramatical” e “2 violações”, estão em desacordo com o esperado para estudos de MMN. Um dos motivos é o fato de que o estímulo “1 violação padrão” eliciou amplitude média mais negativa que o estímulo “gramatical desviante”.
- Como também será abordado a seguir, a diferença entre as condições “gramatical” como padrão nos blocos 1 e 2 e como desviante nos blocos 3 e 4 não reflete também o esperado para efeitos de MMN, já que não apresentam diferença estatisticamente significativa nos intervalos 1 e 2 e a condição “gramatical” como padrão evoca maior negatividade que a condição “gramatical” como desviante em outro intervalo.
- Na realidade, o que se observa nos blocos 3 e 4 é um padrão de resposta parecido com os blocos 1 e 2. Ou seja, independentemente do contexto (ser padrão ou desviante), no intervalo 1 não há diferença significativa entre as condições “1 violação” e “2 violações”, ao passo que essa diferença é detectada nos intervalos 3 e 4, com a condição “2 violações” eliciando amplitudes médias mais negativas.
- A Figura 20, apresentada abaixo, ilustra as comparações feitas entre os blocos 1 e 2 e os blocos 3 e 4, assim como os apontamentos prévios.

Figura 20 - gráficos de ERP da comparação clássica do efeito de MMN nos blocos 1 e 2 ("gramatical" padrão) e nos blocos 3 e 4 ("1 violação" desviante).



Fonte: elaboração própria

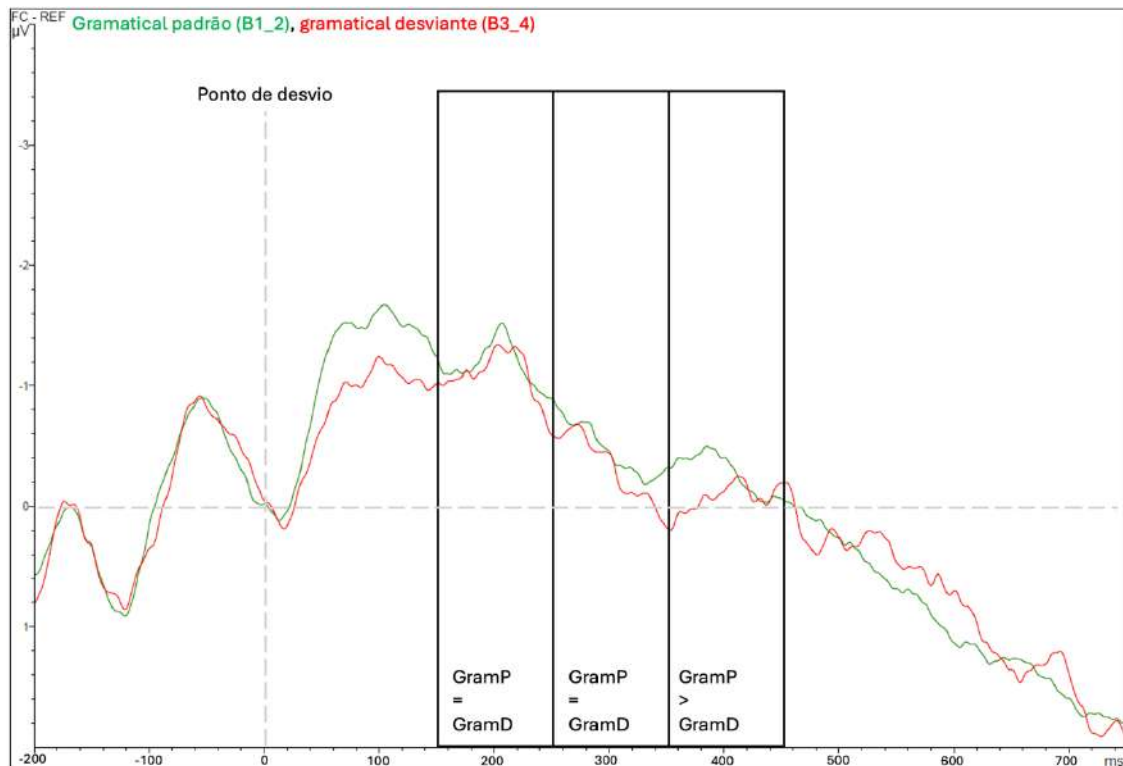
5.1.3 MMN de identidade – condição “gramatical”

Em seguida, reportaremos o *mismatch negativity* de identidade. Esta comparação envolve contrastar as respostas médias aos mesmos estímulos quando ocorrem em contextos diferentes. Dessa forma, compararemos as respostas médias ao estímulo “eu adoto” (gramatical, desviante, blocos 3 e 4) com as respostas ao estímulo “eu adoto” (gramatical, padrão, blocos 1 e 2). Também compararemos as respostas médias ao estímulo “eu *adota” (1 violação, desviante, blocos 1 e 2) e ao estímulo “eu *adota” (1 violação, padrão, blocos 3 e 4).

Portanto, o MMN de identidade compara o estímulo na condição “gramatical” como desviante (nos blocos 3 e 4) com o estímulo na condição “gramatical” como padrão (nos blocos 1 e 2). Ou seja, ao comparar o mesmo estímulo auditivo em contextos de ocorrência diferentes (como desviante em dois blocos, ou como padrão em dois outros blocos), torna-se viável excluir contribuições de diferenças acústicas entre os estímulos para os efeitos encontrados.

Na Figura 21, vemos os ERPs referentes à comparação do MMN de identidade “gramatical” na região de interesse “fronto-central”. Ao contrário do esperado, não há diferença significativa entre o estímulo “gramatical” na condição “padrão” (blocos 1 e 2) e o estímulo “gramatical” na condição “desviante” (blocos 3 e 4) nos intervalos 1 e 2, ao passo que no intervalo 3 há uma diferença com a direcionalidade oposta ao esperado, na qual o estímulo gramatical “padrão” é mais negativo. Reportamos a análise por intervalos a seguir.

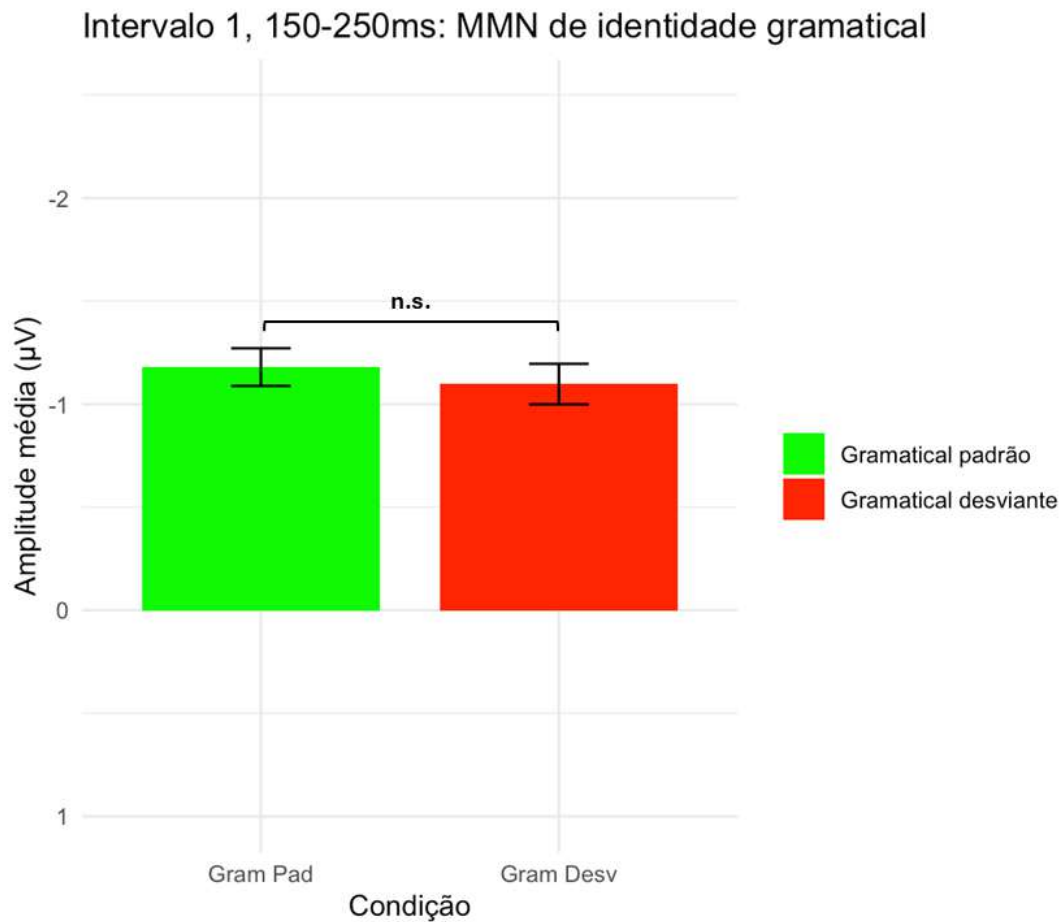
Figura 21 – gráfico de ERP referente à análise do MMN de identidade “gramatical” na região de interesse fronto-central.



Fonte: elaboração própria

Intervalo 1: 150-250ms. A comparação aninhada entre o modelo nulo e modelo com a variável independente “contexto” (padrão ou desviante) não atingiu diferença estatisticamente significativa ($\chi^2 = 0.6899$ | $DF = 1$ | $\Pr(>\chi^2) = 0.4062$). A figura 22 ilustra a comparação entre as médias.

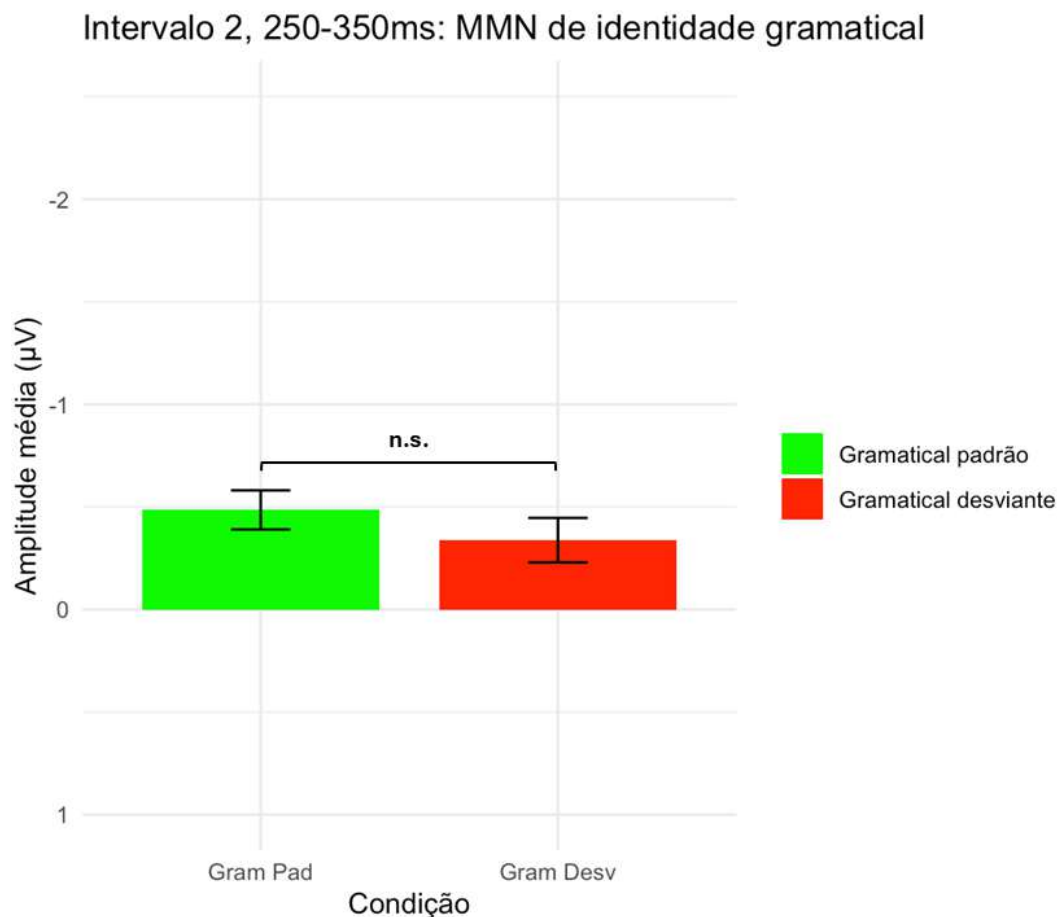
Figura 22– gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 1.



Fonte: elaboração própria

Intervalo 2: 250-350ms. Como no intervalo 1, o intervalo 2 não apresentou diferença estatisticamente significativa na comparação entre o modelo nulo e modelo com a variável independente “contexto” ($\text{Chisq} = 2.0526 \mid \text{DF} = 1 \mid \text{Pr}(> \text{Chisq}) = 0.1519$). A figura 23 ilustra a comparação entre as médias.

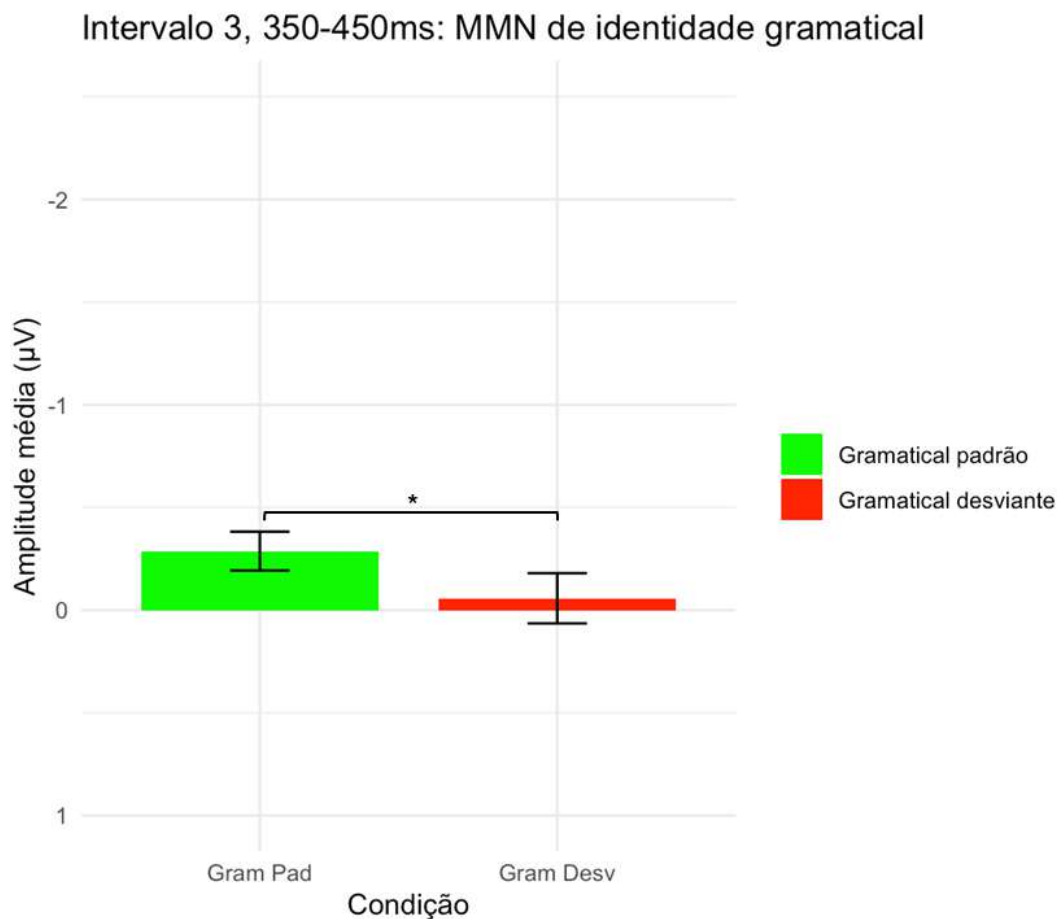
Figura 23 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 2.



Fonte: elaboração própria

Intervalo 3: 350-450ms. A comparação aninhada entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “contexto” (R^2 condicional= 0.441 | R^2 marginal= 0.005) resultou em diferença estatisticamente significativa ($\chi^2 = 3.9488$ | $DF = 1$ | $\Pr(>\chi^2) = 0.0469^*$). Logo, diferentemente dos intervalos 1 e 2, o intervalo 3 apresentou modulação da amplitude média pelo contexto de ocorrência do estímulo “gramatical” (como padrão nos blocos 1 e 2, ou desviante nos blocos 3 e 4). A regressão linear de efeitos mistos mostrou que o estímulo gramatical na condição “padrão” eliciu amplitude média mais negativa que o estímulo gramatical na condição “desviante” (estimate= -0.23003 | Std. Error= 0.11549 | $DF = 418$ | t .value= -1.992 | $\Pr(>|t|) = 0.047^*$). A figura 24 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 24 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “gramatical” no intervalo 3.



Fonte: elaboração própria

Considerações parciais:

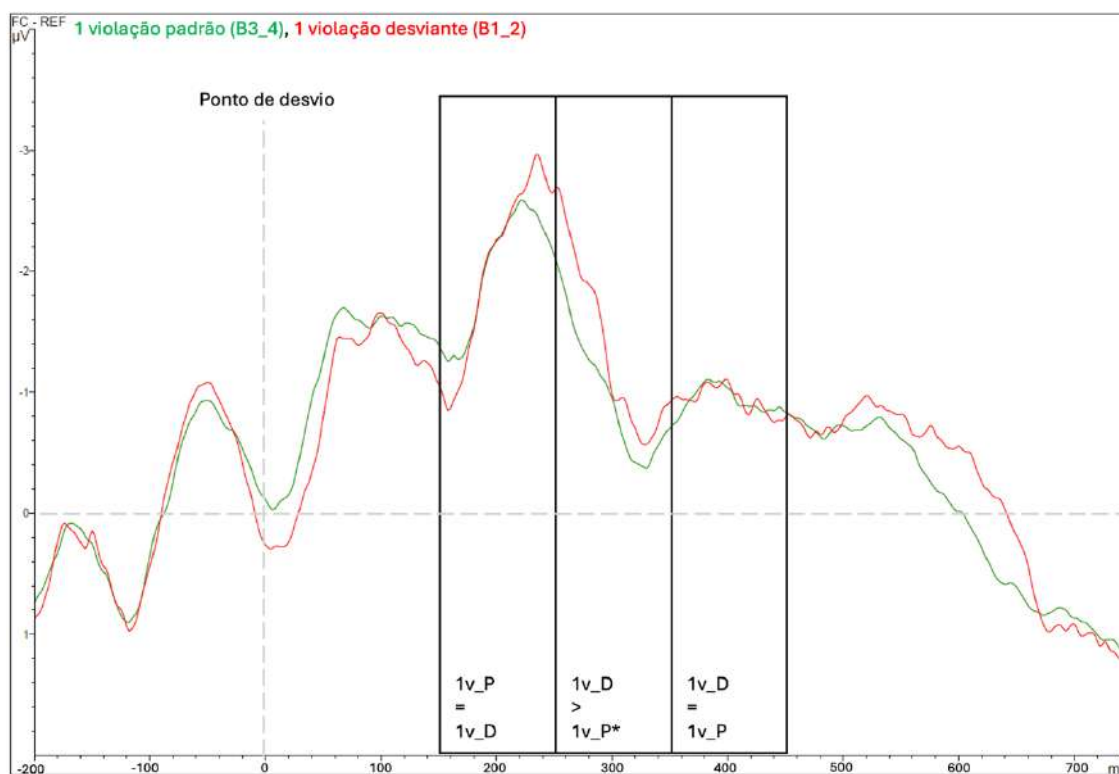
- Os resultados de MMN de identidade, por comparação do mesmo estímulo em condições de apresentação distintas (ora como padrão, ora como desviante), deveriam evidenciar que o efeito de MMN realmente deriva do contraste entre desviante e padrão, e não de diferenças acústicas ou fonológicas. No entanto, não observamos diferença entre as condições desviante e padrão nos primeiros dois intervalos e a diferença observada no 3º intervalo foi o contrário do esperado.
- Ou seja, os resultados relacionados à comparação para detecção do MMN de identidade na condição “gramatical”, junto com a outros fatores, sugerem que o experimento possivelmente não eliciou o efeito de MMN esperado, ainda que só seja possível afirmar com mais afinco (mas com cautela) que nos blocos 3 e 4 este efeito possa ter sido inteiramente ausente.

- Dois fatores que levam a essa conclusão nesta comparação específica são a latência e a ordem de força do efeito:
 - Primeiramente, o pico de amplitude de MMN tipicamente ocorre entre 100 e 250ms após o ponto de desvio (ou após o estímulo, a depender do *baseline*). O efeito tardio poderia se tratar de um MMN mais tardio, contudo os efeitos de gramaticalidade na comparação clássica reportada nas subseções 5.1.1 e 5.1.2 mostram que as diferenças significativas começaram já no intervalo 1. Isso é, se todos os efeitos ocorressem apenas a partir do intervalo 3, poder-se-ia abrir a possibilidade de um efeito de MMN tardio, o que não é caso.
 - Em segundo lugar, o que direciona ainda mais a visão do efeito como uma resposta não-MMN, o estímulo gramatical no contexto “padrão” obteve resposta mais negativa que o estímulo no contexto “desviante”. Isto é, parece que não houve processamento do estímulo gramatical como um “desviante” de fato nos blocos 3 e 4.

5.1.4 MMN de identidade – estímulo “1 violação”

Na Figura 25, vemos os ERPs referentes à comparação do MMN de identidade “1 violação” na região de interesse “fronto-central” (“1 violação desviante” vs. “1 violação padrão”). No intervalo 2, há uma diferença estatisticamente significativa na direcionalidade esperada, quando a condição “1 violação” como desviante elicia amplitude mais negativa do que a condição “1 violação” como padrão. Destaca-se, no entanto, que a análise clássica de MMN dos blocos 3 e 4 descarta que a negatividade adicional seja interpretada como um efeito de detecção de estímulo desviante, típico de um efeito de MMN. Em seguida, detalhamos a análise por intervalos.

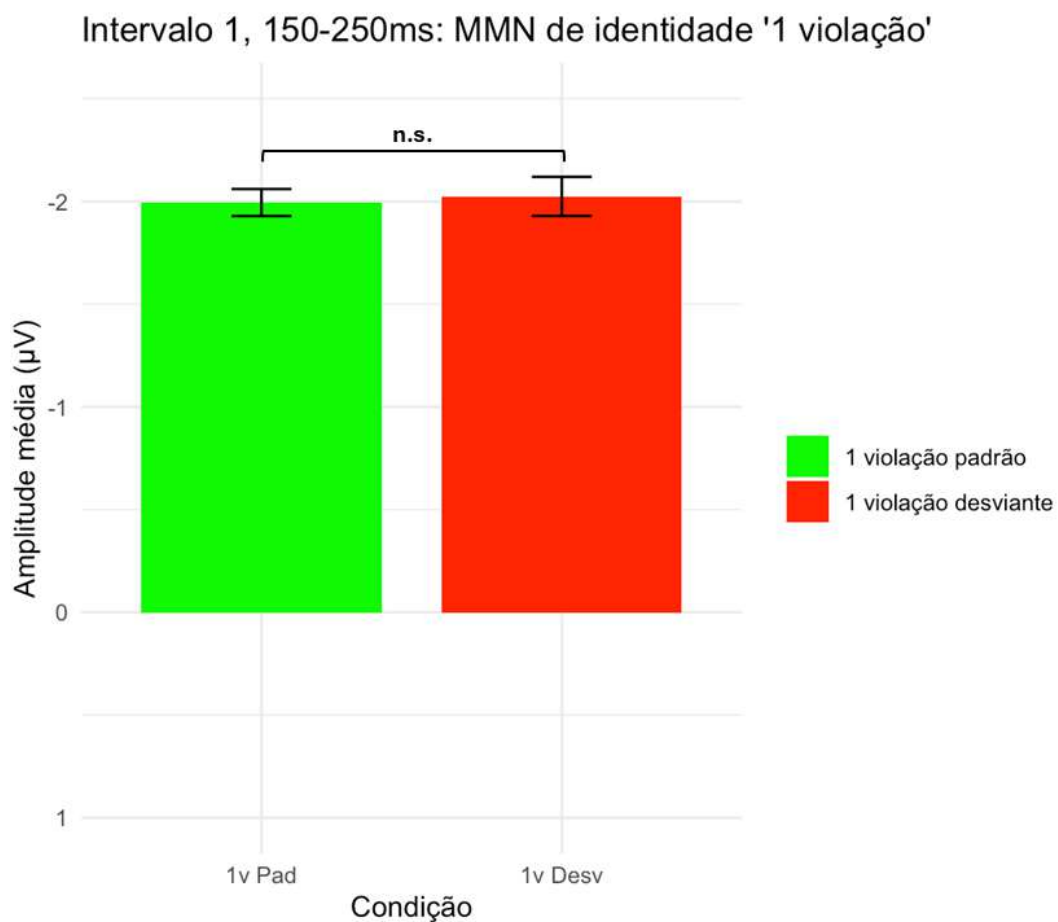
Figura 25 – gráfico de ERP referente à análise do MMN de identidade “1 violação” na região de interesse fronto-central.



Fonte: elaboração própria

Intervalo 1: 150-250ms. A comparação aninhada no intervalo 1, que contrastou o modelo nulo com o modelo contendo a variável independente “contexto” (estímulo “1 violação” padrão ou estímulo “1 violação” desviante), não apontou para diferença estatisticamente significativa ($\text{Chisq} = 0.147 \mid \text{DF} = 1 \mid \text{Pr}(> \text{Chisq}) = 0.7014$). Ou seja, o contexto de ocorrência do estímulo na condição “1 violação” (como desviante nos blocos 1 e 2, como desviante nos blocos 3 e 4) não modulou a amplitude média em resposta ao estímulo. A figura 26 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 26 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 1.

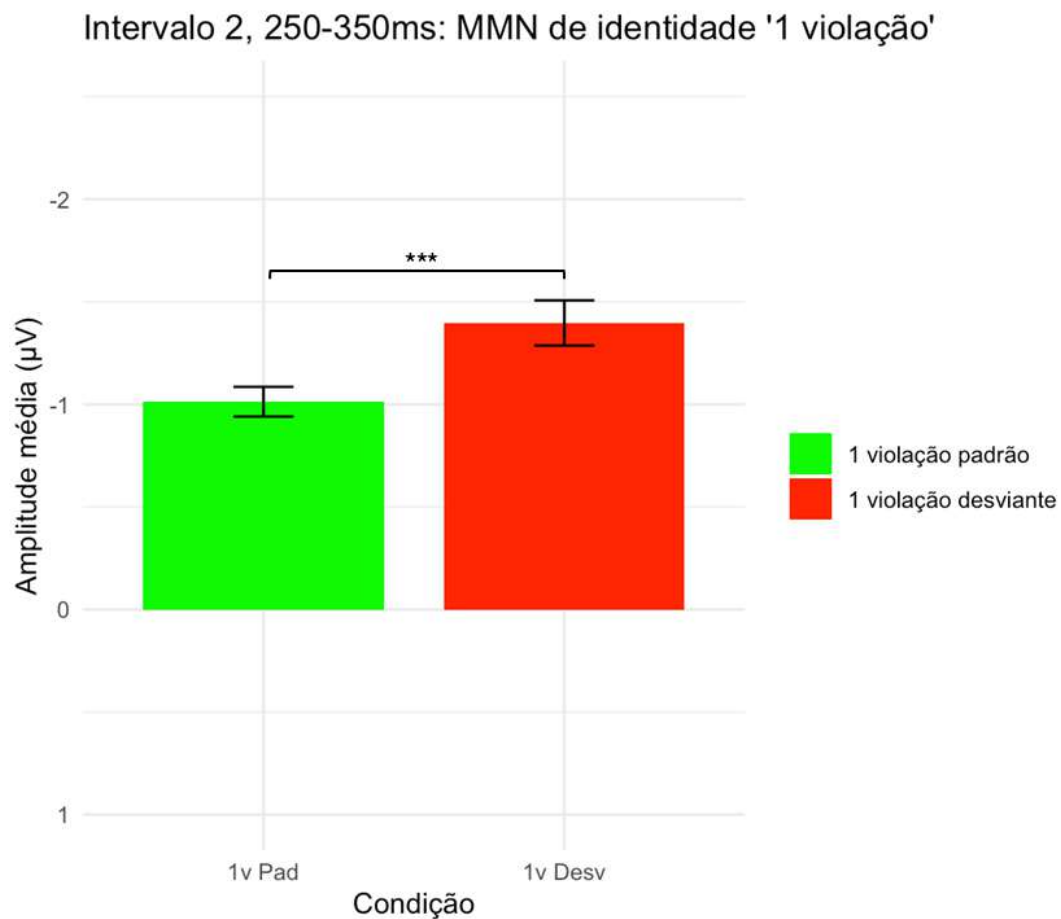


Fonte: elaboração própria.

Intervalo 2: 250-350ms. Já no intervalo 2, a comparação aninhada mostrou que o modelo com a variável independente “contexto” (R^2 condicional= 0.474 | R^2 marginal= 0.019) teve diferença estatisticamente significativa em relação ao modelo nulo ($\chi^2 = 15.623$ | $DF = 1$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^*$). Dessa forma, o contexto de ocorrência do estímulo na condição “1 violação” modulou a amplitude média eliciada pelo estímulo.

Pelo resultado da regressão linear de efeitos mistos, verifica-se que o estímulo na condição “1 violação desviante” eliciou amplitude média mais negativa que a condição “1 violação padrão” (estimate= 0.38386 | Std. Error= 0.09621 | $DF = 418$ | $t.value = 3.990$ | $\Pr(>|t|) < .0001^{***}$). A figura 27 ilustra a comparação entre as médias.

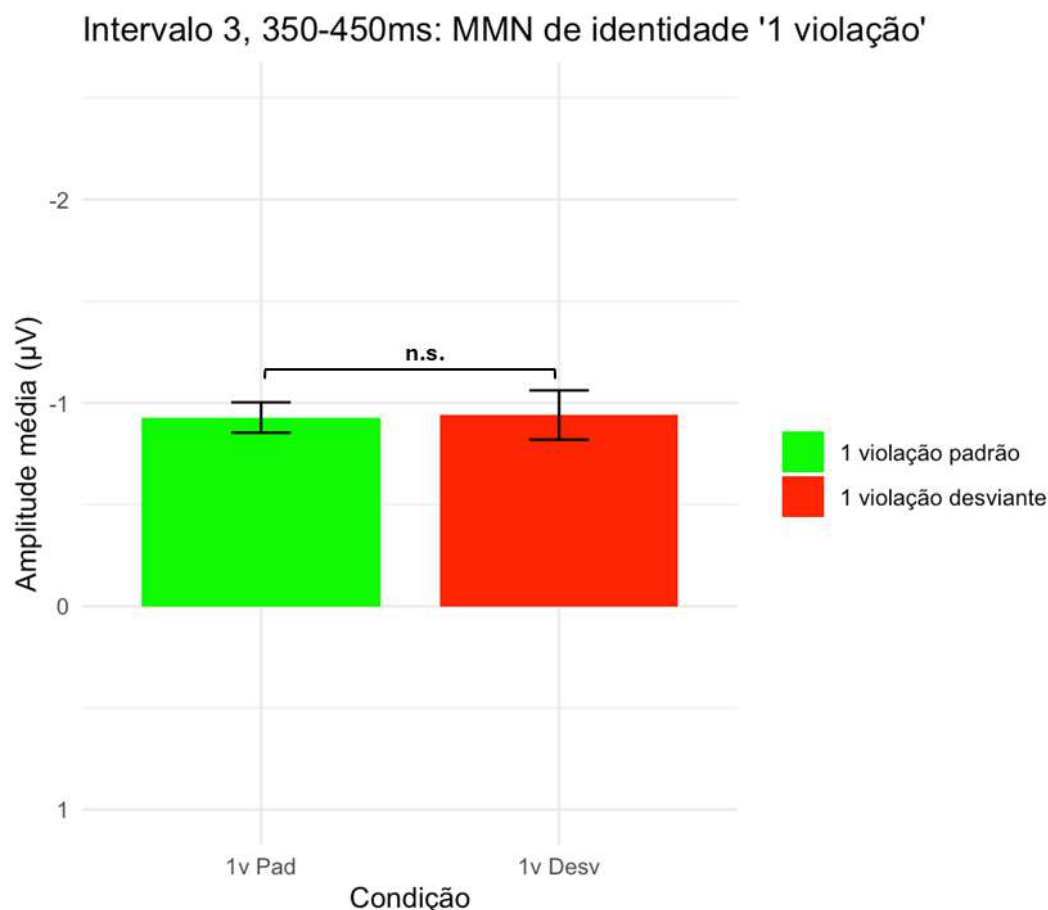
Figura 27 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 2.



Fonte: elaboração própria.

Intervalo 3: 350-450ms. A comparação aninhada no intervalo 3 não resultou em diferença significativa entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “contexto” ($\chi^2 = 0.0142$ | $DF = 1$ | $\Pr(>\chi^2) = 0.9051$). Ou seja, não houve modulação da resposta pelo “contexto” de ocorrência do estímulo na condição “1 violação”. A figura 28 ilustra a comparação entre as médias.

Figura 28 – gráfico com comparação de amplitudes médias referente à análise do MMN de identidade “1 violação” no intervalo 3.

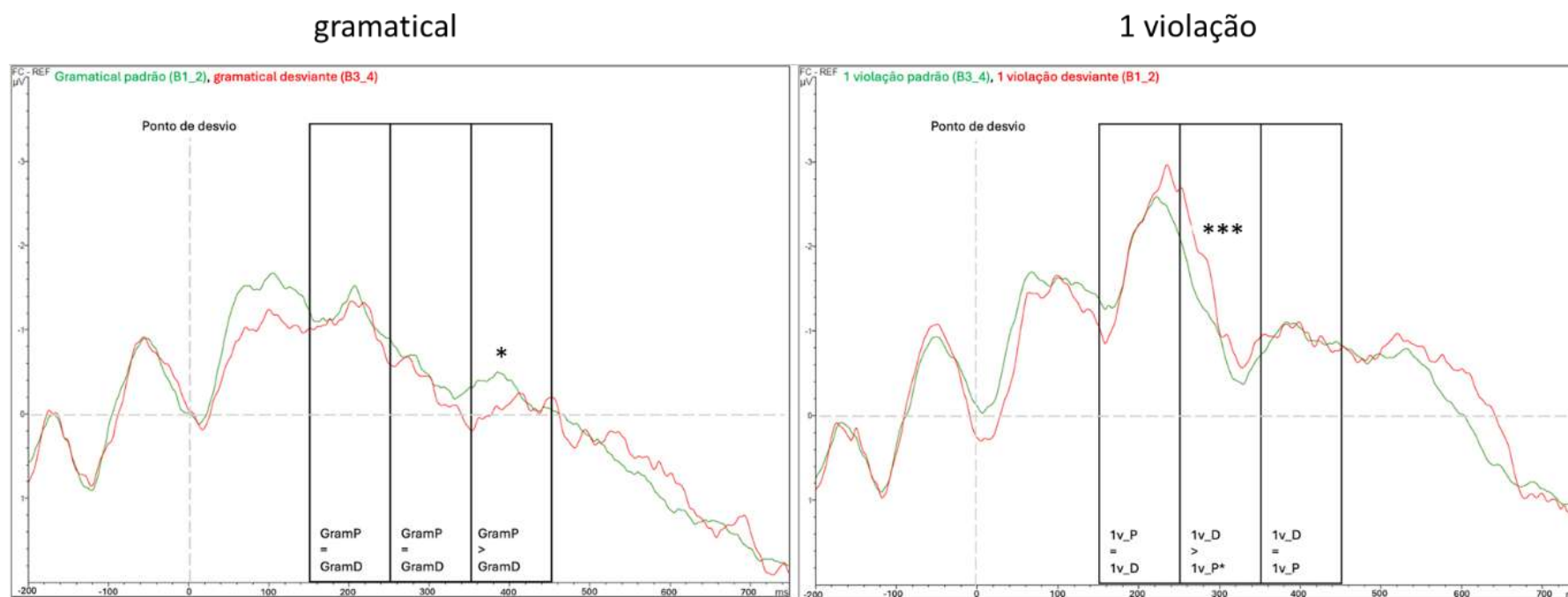


Fonte: elaboração própria.

Considerações parciais. A análise mostrou um efeito condizente com o esperado de um MMN de identidade na condição “1 violação”, mas apenas no 2º intervalo, ao apresentar amplitude média mais negativa para o mesmo estímulo no contexto de ocorrência como “desviante” do que como “padrão”. Contudo, ao considerar os resultados reportados nas subseções anteriores, com padrões de respostas semelhantes entre blocos 1 e 2 e blocos 3 e 4 modulados pela gramaticalidade mas não pelo tipo de estímulo (“desviante” vs. “padrão”), é possível que os efeitos encontrados nos blocos 1 e 2 reflitam processamento modulado por influência direta de gramaticalidade dos estímulos, sem que uma possível contribuição da resposta eletrofisiológica MMN possa ser descartada. A ausência de diferença significativa nos intervalos 1 e 2 na comparação entre o estímulo “gramatical desviante” e “gramatical padrão” reforçam essa perspectiva, como explicado na subseção 5.1.3, em especial ao considerar também que, no intervalo 3, o estímulo “gramatical padrão” obteve amplitude mais negativa do que o “gramatical desviante”, contrário ao padrão esperado para o MMN de identidade.

Mesmo que a diferença detectada entre amplitudes eliciadas por um estímulo desviante “agramatical” (como o foi nos blocos 1 e 2) e um estímulo padrão “1 violação” (Cf. fig. 29) pareça refletir um efeito MMN, podemos suspeitar que, em seus respectivos blocos, não foi de fato processado como estímulo “padrão”, pois se assim o fosse, a comparação de MMN clássica nos blocos 3 e 4 deveria ter resultado em uma maior negatividade do estímulo desviante “gramatical” em contraste com o estímulo padrão “1 violação” dos mesmos blocos.

Figura 29 – comparação de MMNs de identidade "gramatical" e "1 violação".



Fonte: elaboração própria

Todo o exposto até o momento leva a duas possibilidades: ou não houve qualquer efeito de MMN em nosso estudo (o que não é viável cravar), mas apenas um efeito direto de processamento morfossintático, ou pode ter havido uma contribuição de um efeito de MMN apenas no intervalo 1 dos blocos 1 e 2 (em que o estímulo padrão era o gramatical), ao passo que os demais efeitos podem refletir processos relacionados a custo de processamento morfossintático. Qualquer das duas explicações que seja a mais adequada, ela fica demonstrada a influência de processos linguísticos que ensejam uma comparação por “gramaticalidade”.

Por isso, decidimos realizar uma análise que tem a “gramaticalidade” e “região” como variáveis de interesse, ao passo que o contexto de ocorrência do estímulo foi mantido constante (todos como “desviantes”). Ou seja, comparamos os estímulos nas condições “gramatical” (como “desviante” nos blocos 3 e 4), “1 violação” (como “desviante” nos blocos 1 e 2) e “2 violações” (como “desviante” nos blocos 1 e 2). Diferentemente da análise de MMN que tem a região fronto-central como região de interesse, a análise de efeitos de gramaticalidade testou efeitos em todas as regiões: anterior esquerda, anterior direita, posterior esquerda, posterior direita e fronto-central.

5.2 Gramaticalidade

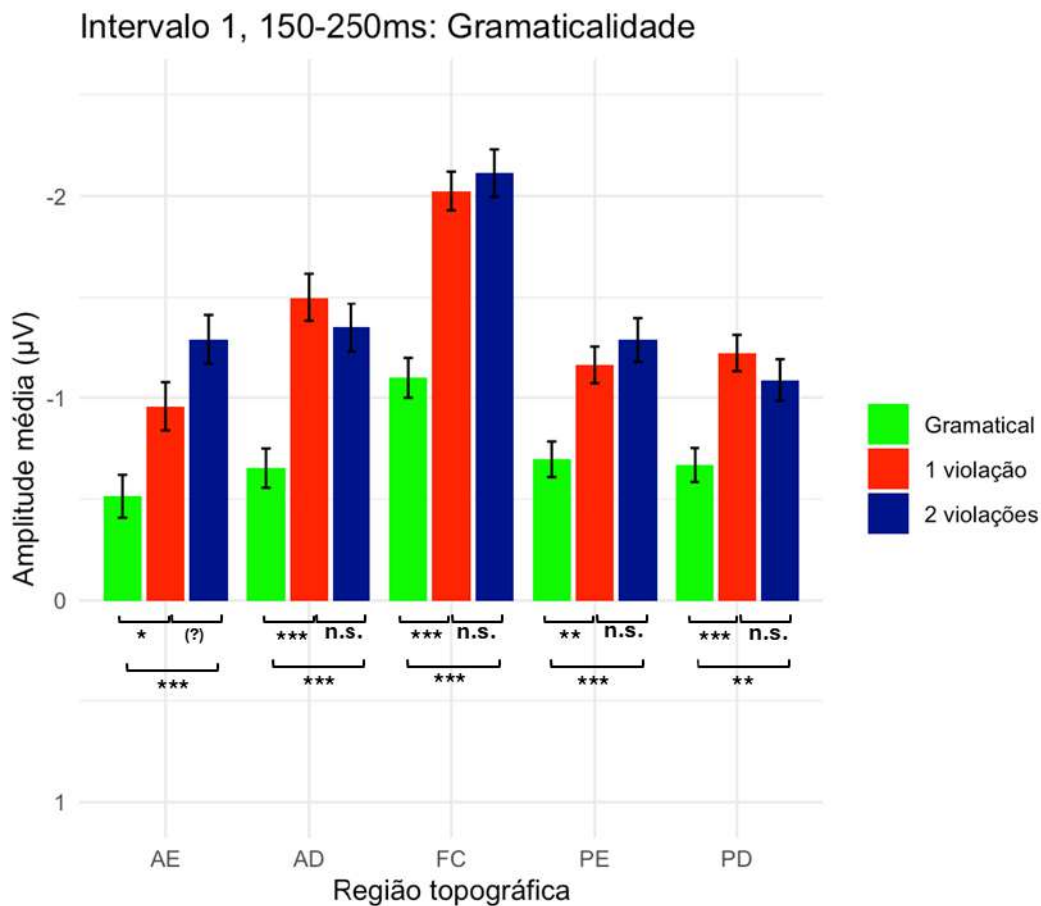
Esta última análise será por efeito apenas de gramaticalidade. Nesta análise, utilizaremos apenas estímulos que ocorreram como “desviantes”. Ou seja, a comparação será entre “eu *adota” (1 violação, desviante, blocos 1 e 2)-“eu adoto” (gramatical, desviante, blocos 3 e 4), entre “eu *adotam” (2 violações, desviante, blocos 1 e 2)-“eu adoto” (gramatical, desviante, blocos 3 e 4) e entre “eu *adotam” (2 violações, desviante, blocos 1 e 2)-“eu *adota” (1 violação, desviante, blocos 1 e 2). Essa análise permite excluir o efeito de contexto de ocorrência do estímulo (*i.e.*, desviante ou padrão) e aproximar o número de observações de cada condição.

A análise por efeito de gramaticalidade considerará todas as regiões definidas (anterior esquerda, anterior direita, posterior esquerda, posterior direita e fronto-central). Em todos os intervalos, para testarmos efeitos de região, começamos com uma comparação aninhada entre o modelo mais complexo, em que região e gramaticalidade interagem (meanamp~gramaticalidade*região), e o modelo mais simples, em que não há interação (meanampl~gramaticalidade+região). Em seguida, dividimos o conjunto de dados em subconjuntos de dados que continham apenas as amplitudes médias dos eletrodos associados a

uma dada região (*e.g.*, anterior esquerda) e comparamos um modelo nulo com um modelo que inclui a variável independente “gramaticalidade” para testar se a amplitude média naquela região foi modulada pela variável “gramaticalidade”. Caso o resultado apontasse para uma diferença estatisticamente significativa, então prosseguíamos para uma análise *post-hoc* que contrastava os pares de condições “1 violação” e “gramatical”, “2 violações” e “gramatical”, e “2 violações” e “1 violação”.

Intervalo 1: 150-250ms. Observamos na figura 30 as amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 1. De modo geral, amplitudes médias são mais negativas para as condições agramaticais, com variação na força do efeito de gramaticalidade entre regiões, sendo a região “fronto-central” a que apresenta aparente maior amplitude evocada por todas as condições, por inspeção visual. Há tendências variadas na diferença entre 1 e 2 violações, sendo a de maior destaque a diferença encontrada entre estas condições na região anterior esquerda, que visualmente excede a barra de erro padrão. Apresentaremos em seguida, em detalhes, as análises por região no intervalo 1.

Figura 30 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 1.



Fonte: elaboração própria

A comparação aninhada no intervalo 1 mostrou que houve interação entre as variáveis independentes “gramaticalidade” e “região” (R^2 condicional= 0.302 | R^2 marginal= 0.097), com diferença estatisticamente significativa entre o modelo mais complexo e o modelo mais simples ($\text{Chisq}= 22.5$ | $\text{DF}= 8$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq})= 0.004069^*$). Em decorrência disso, prosseguimos para as análises por região.

No conjunto de dados da região *anterior esquerda*, a comparação aninhada entre o modelo nulo e o modelo com a variável “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.194 | R^2 marginal= 0.042) resultou em uma diferença estatisticamente significativa ($\text{Chisq}= 26.498$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). A tabela 3 resume o resultado da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey:

Tabela 3 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “anterior esquerda”.

Intervalo 1: anterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” – “gramatical”	-0.444	0.149	508	-2.974	0.0086**
“2 violações” – “gramatical”	-0.774	0.149	508	-5.187	<.0001***
“1 violação” – “2 violações”	0.330	0.149	508	2.213	0.07·

Fonte: elaboração própria.

Como observado, a análise *post-hoc* apontou para uma diferença estatisticamente significativa apenas entre as condições com a violação e a condição gramatical ($p < 0.05$), ainda que o contraste da condição “1 violação” e da condição “2 violações” tenha significância marginal. Destaca-se que apesar de a diferença estimada ter valor positivo, isso decorre da ordem da subtração, uma vez que o gráfico na figura 30 mostra que o efeito na condição “2 violações” é mais negativo que na condição “1 violação”.

Como a análise *post-hoc* na comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação” teve significância marginal, apenas neste caso nós realizamos uma segunda análise estatística a partir de um conjunto de dados que continha apenas as condições “2 violações” e “1 violação”

(isto é, filtramos a condição “gramatical” do conjunto de dados que foi analisado). Esta decisão partiu do fato de que a inspeção visual mostra a diferença entre as duas condições citadas e que tal diferença pode não obter valor estatisticamente significativo em decorrência da perda de poder estatístico de uma análise *post-hoc* de pares quando há múltiplos pares. Caso a análise *post-hoc* não tivesse obtido significância marginal, não teríamos continuado com a análise. O resultado da comparação entre o modelo nulo e o modelo com a variável “gramaticalidade”, apenas neste caso contendo apenas os níveis “2 violações” e “1 violação”, atingiu diferença estatisticamente significativa ($\text{Chisq} = 4.6757 \mid \text{df} = 1 \mid \text{Pr}(> \text{Chisq}) = 0.03059^*$). Os conjuntos de dados a seguir voltar a contar com a condição “gramatical”.

No conjunto de dados da região *anterior direita*, a comparação aninhada mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre o modelo nulo e o modelo contendo a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional = 0.264 $\mid$ R^2 marginal = 0.058) ($\text{Chisq} = 39.92 \mid \text{DF} = 2 \mid \text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). A tabela 4 apresenta os resultados da comparação de pares pela análise *post-hoc* com ajuste de Tukey:

Tabela 4 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “anterior esquerda”.

Intervalo 1: anterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.845	0.14	508	-6.028	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-0.695	0.14	508	-4.957	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	-0.150	0.14	508	-1.071	0.5324

Fonte: elaboração própria

A análise *post-hoc* mostra que, no intervalo 1, na região anterior direita, há um efeito com diferença estatisticamente significativa nos contrastes entre condições com violação e condição gramatical, mas não no contraste entre cada condição com violação.

No conjunto de dados da região *fronto-central*, o modelo com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional = 0.443 $\mid$ R^2 marginal = 0.082) obteve diferença estatisticamente significativa em comparação com o modelo nulo ($\text{Chisq} = 90.091 \mid \text{DF} = 2 \mid$

$\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). Portanto, prosseguimos com a análise *post-hoc* com ajuste de Tukey, como reportado na tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “fronto-central”.

Intervalo 1: fronto-central, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.9271	0.115	640	-8.096	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-1.0149	0.115	640	-8.863	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.0878	0.115	640	0.767	0.7234

Fonte: elaboração própria

Também na região *fronto-central*, no intervalo 1, houve diferença significativa na comparação entre o estímulo na condição “gramatical” e os estímulos nas condições com violação, mas não entre cada condição com violação.

No conjunto de dados da região *posterior esquerda*, a comparação aninhada entre os modelos nulo e com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.337 | R^2 marginal= 0.038) atingiu diferença estatisticamente significativa (Chisq = 29.706 | DF = 2 | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). A análise *post-hoc* com ajuste de Tukey encontra-se na tabela 6, abaixo:

Tabela 6 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “posterior esquerda”.

Intervalo 1: posterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.465	0.112	508	-4.141	0.0001**
“2 violações” - “gramatical”	-0.588	0.112	508	-5.232	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.123	0.112	508	1.091	0.5202

Fonte: elaboração própria

Os resultados da análise *post-hoc* mostram que, também na região posterior esquerda, há diferença significativa apenas no contraste entre a condição “gramatical” e as demais condições.

Por fim, no conjunto de dados da região *posterior direita*, a comparação aninhada entre o modelo nulo e o modelo que contém a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.287 | R^2 marginal= 0.036) apontou para uma diferença estatisticamente significativa entre os modelos ($\text{Chisq}= 25.815$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^*$). A análise *post-hoc* com ajuste de Tukey encontra-se resumida na tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 1, na região topográfica “posterior direita”.

Intervalo 1: posterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.552	0.112	508	-4.922	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-0.419	0.112	508	-3.733	0.0006**
“1 violação” - “2 violações”	-0.133	0.112	508	-1.189	0.4603

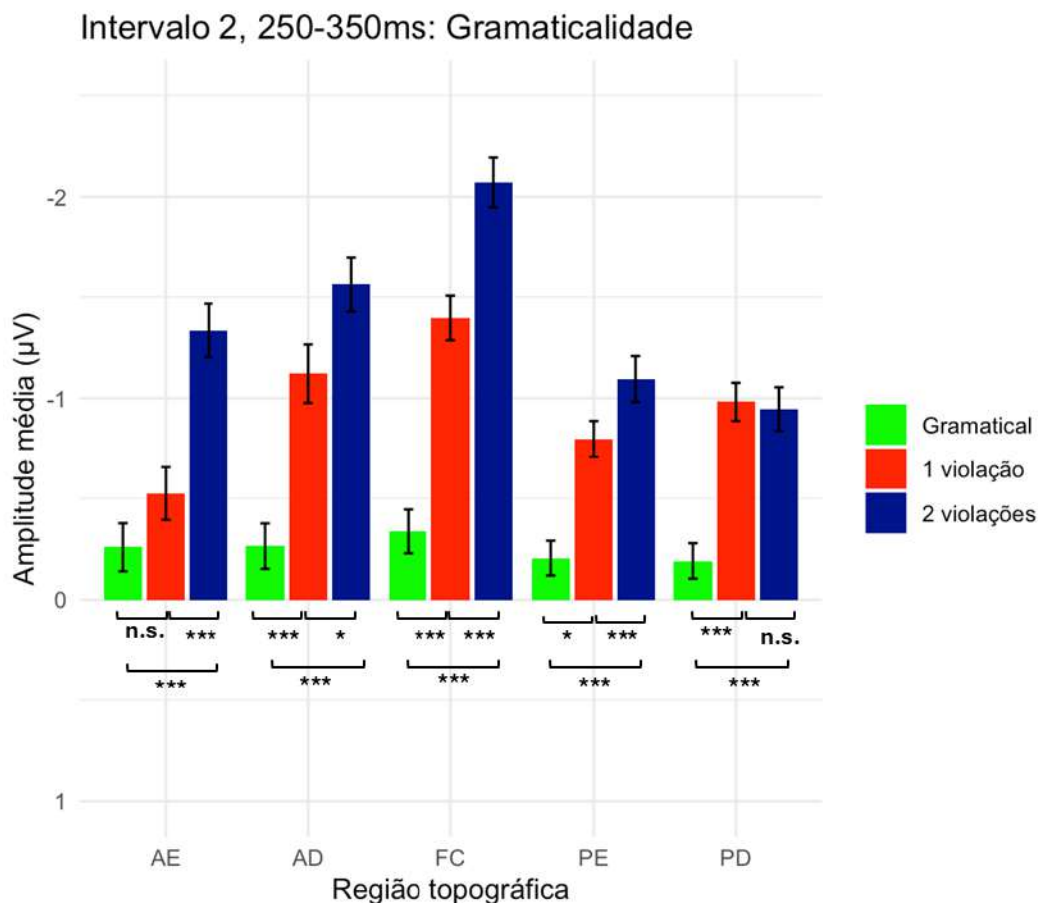
Fonte: elaboração própria

Em resumo, tanto na região posterior direita quanto nas demais regiões testadas, no intervalo 1, há apenas diferença estatisticamente significativa no contraste entre a condição “gramatical” e as condições com violação. Assim, a análise estatística indica que, no intervalo 1, há um efeito que distingue entre estímulos gramaticais e agramaticais, sem que haja influência da variação no número de violações, apesar de um efeito de significância marginal na região anterior esquerda na comparação entre as condições “1 violação” e “2 violações”.

Intervalo 2: 250-350ms. A figura 31 expõe as amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 2. Igualmente ao 1º intervalo, as amplitudes médias são mais negativas para as condições agramaticais, com variação na força do efeito de gramaticalidade entre regiões. No 2º intervalo, as tendências variadas na diferença entre 1 e 2 violações são visualmente mais nítidas, em especial nas regiões topográficas

“anterior esquerda”, “anterior direita” e “fronto-central”. Apresentaremos em seguida em detalhe as análises por região no intervalo 2.

Figura 31 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 2.



Fonte: elaboração própria.

No intervalo 2, a comparação aninhada apontou que houve interação entre as variáveis independentes “gramaticalidade” e “região” (R^2 condicional= 0.305 | R^2 marginal= 0.118), ao mostrar diferença estatisticamente significativa entre o modelo mais simples e o modelo mais complexo ($\chi^2= 46.33$ | $DF= 8$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^*$). Por este motivo, as análises por região foram executadas.

No conjunto de dados da região *anterior esquerda*, a comparação aninhada entre os modelos nulo e com a variável “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.189 | R^2 marginal= 0.069) mostrou uma diferença estatisticamente significativa ($\chi^2= 43.076$ | $DF= 2$ |

$\Pr(>\text{Chisq}) < .0001^{***}$). O resultado da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey encontra-se na tabela 8:

Tabela 8 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “anterior esquerda”.

Intervalo 2: anterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.266	0.168	508	-1.586	0.2525
“2 violações” - “gramatical”	-1.076	0.168	508	-6.424	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.810	0.168	508	4.837	<.0001***

Fonte: elaboração própria

A comparação de pares referente à região anterior esquerda no intervalo 2 mostra que há diferença significativa entre as condições “2 violações” e “gramatical” e entre as condições “2 violações” e “1 violação”, já refletindo um padrão de resultados diferente do intervalo 1. Já na comparação entre as condições “1 violação” e “gramatical” não se verificou diferença significativa.

No conjunto de dados da região *anterior direita*, houve diferença estaticamente significativa na comparação aninhada entre os modelos nulo e o modelo com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.264 | R^2 marginal= 0.058) ($\text{Chisq} = 61.077$ | $DF = 2$ | $\Pr(>\text{Chisq}) < .0001^{***}$). Apresentamos o resultado da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey na tabela 9:

Tabela 9 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “anterior direita”.

Intervalo 2: anterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.856	0.164	508	-5.222	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-1.296	0.164	508	-7.906	<.0001***

“1 violação” - “2 violações”	0.440	0.164	508	2.684	0.0075**
---	-------	-------	-----	-------	----------

Fonte: elaboração própria.

A análise *post-hoc* na região topográfica anterior direita, no intervalo 2, resultou em diferenças significativas no contraste em todos os pares. Isto é, há uma resposta de amplitude média mais negativa na comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação” (valor positivo em decorrência da ordem de subtração) e entre as condições com violação e a condição gramatical.

No conjunto de dados da região *fronto-central*, a amplitude média foi modulada pela variável “gramaticalidade”, o que se observa pela comparação aninhada entre o modelo nulo e o modelo contendo a variável (R^2 condicional= 0.442 | R^2 marginal= 0.152), que resultou em diferença estatisticamente significativa ($\text{Chisq}= 158.08$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^{***}$). Logo, executamos a análise *post-hoc* com ajuste de Tukey, conforme o reportado na tabela 10:

Tabela 10 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “fronto-central”.

Intervalo 2: fronto-central, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-1.059	0.131	640	-8.102	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-1.734	0.131	640	-13.265	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.675	0.131	640	5.163	<.0001***

Fonte: elaboração própria.

A análise *post-hoc* na região fronto-central evidencia diferença estatisticamente significativa entre todos os pares de condições de gramaticalidade no intervalo 2. Ou seja, tem-se a seguinte ordem de efeitos de amplitude média: condição “2 violações” elicia resposta de amplitude média mais negativa que a condição “1 violação”, que por sua vez elicia resposta média mais negativa que a condição “gramatical”. Mais uma vez, enfatiza-se que o número positivo na estimativa da comparação entre “1 violação” e “2 violações” decorre da ordem da subtração.

Na região *posterior esquerda*, a comparação aninhada resultou em diferença estatisticamente significativa no contraste entre o modelo nulo e o modelo contendo a variável “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.285 | R^2 marginal= 0.077) ($\text{Chisq}= 53.583$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^{***}$). Logo, executamos a análise *post-hoc* com ajuste de Tukey, com os resultados resumidos na tabela 11:

Tabela 11 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “posterior esquerda”.

Intervalo 2: posterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.593	0.121	508	2.452	0.0386*
“2 violações” - “gramatical”	-0.889	0.121	508	-7.367	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.296	0.121	508	5.163	<.0001***

Fonte: elaboração própria.

A comparação de pares na região posterior esquerda, no intervalo 2, também apontou para um efeito de “gramaticalidade” significativo no contraste entre todos os pares, com a condição “2 violações” eliciando amplitude média mais negativa, seguida pela condição “1 violação”.

Por fim, também na região *posterior direita*, a comparação aninhada entre o modelo nulo e modelo com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.349 | R^2 marginal= 0.075) apontou para uma diferença estatisticamente significativa ($\text{Chisq}= 57.136$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^{***}$). A análise *post-hoc* com ajuste de Tukey encontra-se reportada na tabela 12:

Tabela 12 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 2, na região topográfica “posterior direita”.

Intervalo 2: posterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.7902	0.115	508	-6.871	<.0001***

“2 violações” - “gramatical”	-0.7547	0.115	508	-6.563	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	-0.0354	0.115	508	-0.308	0.9491

Fonte: elaboração própria

Semelhantemente ao intervalo 1 e as demais regiões topográficas no intervalo 2, a região posterior direita apresentou amplitudes médias mais negativas na comparação entre as condições com violação e a condição gramatical. Essa diferença não se observou no contraste entre a condição “1 violação” e a condição “2 violações”.

Como muitas regiões topográficas mostram efeito adicional de amplitude média negativa pelo maior número de violações na condição “2 violações”, decidimos comparar a contribuição de cada região topográfica que atingiu significância estatística. Respostas eletrofisiológicas negativas na porção anterior dos eletrodos não são inesperadas, dado que estudos de ERP com violação morfosintática em paradigmas sem tarefa distratora tipicamente eliciam respostas E/LAN ou tipo-LAN, mas o efeito na região posterior esquerda não estava dentro da expectativa.

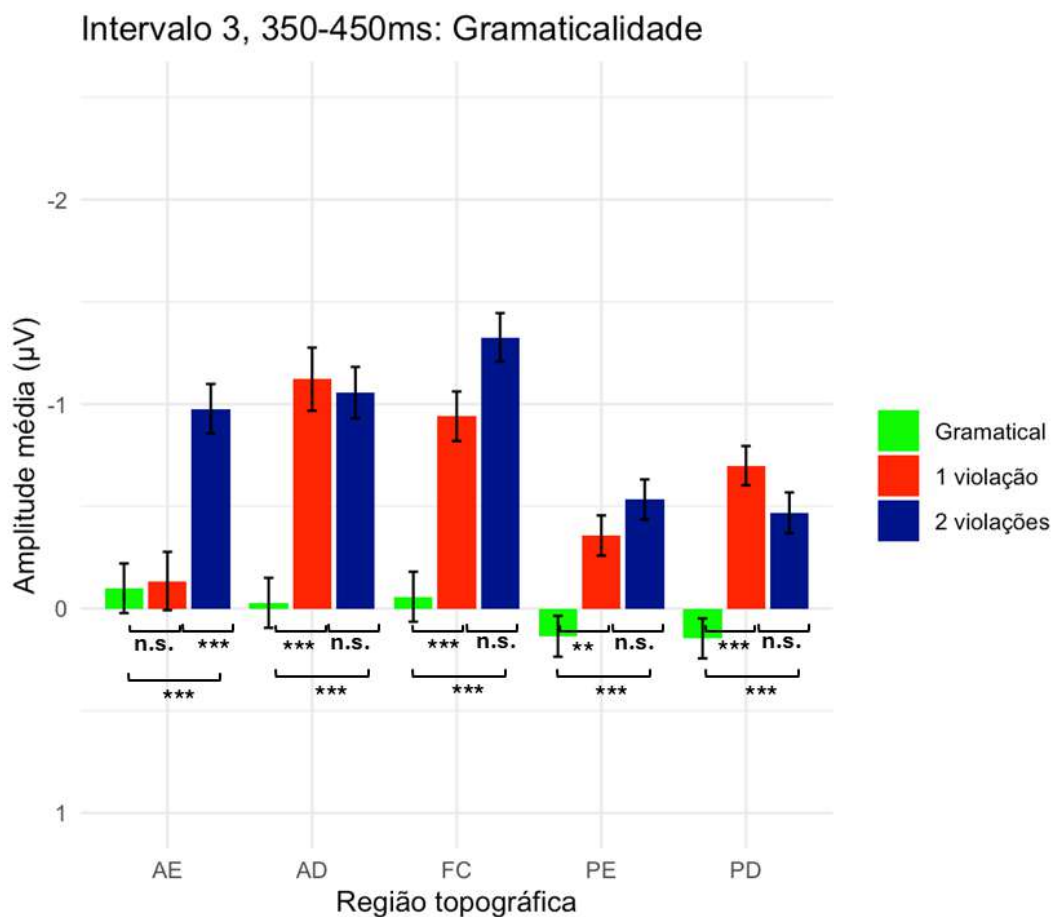
Para investigar essa diferença mais a fundo, geramos um modelo simplificado, em que a diferença entre “2 violações” e “1 violação” é a variável dependente e “região” a variável independente. Ou seja, criamos um subconjunto de dados que contém a subtração entre a amplitude média eliciada pela condição “2 violações” e a amplitude média em resposta à condição “1 violação”. Só incluímos nesse subconjunto as regiões topográficas que tiveram efeito estatisticamente significativo no contraste entre as condições “2 violações” e “1 violação”, no intervalo 2: anterior esquerda, anterior direita, fronto-central e posterior esquerda.

A comparação aninhada entre o modelo nulo (subtração~1) e o modelo mais complexo (subtração~região) resultou em diferença estatisticamente significativa (npar= 6 | AIC= 3055.9 | BIC= 3083.6 | logLik= -1522.0 | -2*log(L)= 3043.9 | Chisq= 8.9447 | DF= 3 | Pr(>Chisq)< 0.030*). A análise *post-hoc* com ajuste de Tukey detectou apenas um contraste estatisticamente significativo, entre as regiões “anterior esquerda” e “posterior esquerda” (estimate= -0.514 | Std. Error= 0.191 | DF= 729 | t.value= -2.696 | Pr(>|t|)= 0.0361). Ou seja, entre as regiões com efeito entre violações, a região “posterior esquerda” apresentou amplitude média menos negativa do que a região “anterior esquerda”.

Intervalo 3: 350-450ms. Na figura 32, observamos níveis de ativação menos negativos globalmente no intervalo 3 (comparados aos outros intervalos) e com diferenças nítidas entre

as condições agramaticais e gramatical, com variação entre o efeito entre número de violações por região. A diferença visualmente mais clara entre as condições “2 violações” e “1 violação” reside nas regiões anterior esquerda e fronto-central, ao passo que apenas nesta última a condição “1 violação” apresenta amplitude negativa maior que a condição “gramatical”. A inspeção visual também mostra um aparente efeito maior na região topográfica anterior em comparação com as regiões posteriores. A seguir, detalhamos a análise por região topográfica no intervalo 3.

Figura 32 – gráfico com comparação de amplitudes médias entre condições de gramaticalidade, por região topográfica, no intervalo 3.



Fonte: elaboração própria.

Como nos demais intervalos, o modelo mais complexo, com interação entre as variáveis independentes “gramaticalidade” e “região” (R^2 condicional= 0.260 | R^2 marginal= 0.083) atingiu diferença estatisticamente significativa na comparação aninhada com o modelo nulo ($\chi^2 = 48.673$ | $DF = 8$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^*$). Dessa forma, prosseguimos com a análise por região.

Na região *anterior esquerda*, a diferença entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.156 | R^2 marginal= 0.054) atingiu significância estatística ($\chi^2 = 32.548$ | $DF = 2$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^{***}$). Na tabela 13, apresentamos os resultados dos contrastes de pares da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey:

Tabela 13 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “anterior esquerda”.

Intervalo 3: anterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.0353	0.172	508	-0.206	0.9769
“2 violações” - “gramatical”	-0.8779	0.172	508	-5.111	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.8426	0.172	508	4.905	<.0001***

Fonte: elaboração própria.

A comparação *post-hoc* na região anterior esquerda, no intervalo 3, mostra que a condição “2 violações” evocou resposta de amplitude média mais negativa que as condições “1 violação” e “gramatical”. Já o contraste entre as condições “1 violação” e “gramatical” não foi estatisticamente significativa.

Na região *anterior direita*, a comparação aninhada mostrou que a diferença entre o modelo nulo e o modelo com a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.235 | R^2 marginal= 0.073) é estatisticamente significativa ($\chi^2 = 48.142$ | $DF = 2$ | $\Pr(>\chi^2) < .0001^{***}$). O contraste de pares na análise *post-hoc* com ajuste de Tukey está descrita na tabela 14 a seguir:

Tabela 14 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “anterior direita”.

Intervalo 3: anterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-1.0938	0.173	508	-6.323	<.0001***

“2 violações” - “gramatical”	-1.0282	0.173	508	-5.944	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	-0.0655	0.173	508	-0.379	0.9239

Fonte: elaboração própria.

A análise *post-hoc* mostrou que, na região anterior direita durante o intervalo 3, as condições com violação eliciaram amplitude média mais negativa em comparação com a condição gramatical. Já na comparação entre as condições “1 violação” e “2 violações”, não houve diferença estatisticamente significativa.

Na região *fronto-central*, no intervalo 3, houve diferença estatisticamente significativa entre o modelo nulo e o modelo mais complexo, que contém a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.400 | R^2 marginal= 0.082) ($\text{Chisq}= 83.926$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001***$). Descrevemos abaixo, na tabela 15, os resultados da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey:

Tabela 15 – análise *post-hoc*, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “fronto-central”.

Intervalo 3: fronto-central, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.883	0.138	640	-6.416	<.0001***
“2 violações” - “gramatical”	-1.269	0.138	640	-9.224	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.386	0.138	640	2.808	0.0142*

Fonte: elaboração própria.

Da mesma forma que no intervalo 2, a região topográfica fronto-central no intervalo 3 apresentou respostas de amplitude média mais negativa em decorrência do número e presença de violações no estímulo. Obteve-se a seguinte ordem de efeitos: “2 violações” eliciando amplitude mais negativa que a condição “1 violação”, e está eliciando amplitudes médias mais negativas que a condição “gramatical”.

Na região *posterior esquerda*, a comparação aninhada mostrou que houve diferença estatisticamente significativa entre o modelo nulo e o modelo que contém a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.237 | R^2 marginal= 0.045) ($\text{Chisq}= 30.076$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^{***}$). Como a comparação mostrou que a variável “gramaticalidade” modulou a amplitude média neste conjunto de dados, prosseguimos com a análise *post-hoc* com ajuste de Tukey (tabela 16):

Tabela 16 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “posterior esquerda”.

Intervalo 3: posterior esquerda, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.493	0.125	508	-3.948	0.0003**
“2 violações” - “gramatical”	-0.669	0.125	508	-5.359	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	0.176	0.125	508	1.411	0.3361

Fonte: elaboração própria.

A região posterior esquerda no intervalo 3 obteve diferenças estatisticamente significativas no contraste entre as condições com violação e a condição gramatical. O contraste entre a condição “1 violação” e a condição “2 violações” não atingiu diferença estatisticamente significativa.

Na região topográfica *posterior direita*, a diferença entre o modelo nulo e o modelo contendo a variável independente “gramaticalidade” (R^2 condicional= 0.351 | R^2 marginal= 0.071) atingiu significância estatística ($\text{Chisq}= 54.407$ | $\text{DF}= 2$ | $\text{Pr}(> \text{Chisq}) < .0001^{***}$). Reportamos, na tabela 17, os resultados da análise *post-hoc* com ajuste de Tukey:

Tabela 17 – análise post-hoc, contraste das condições de gramaticalidade no intervalo 3, na região topográfica “posterior esquerda”.

Intervalo 3: posterior direita, post-hoc

Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
“1 violação” - “gramatical”	-0.845	0.115	508	-7.317	<.0001***

“2 violações” - “gramatical”	-0.614	0.115	508	-5.319	<.0001***
“1 violação” - “2 violações”	-0.231	0.115	508	-1.997	0.1139

Fonte: elaboração própria

As amplitudes médias na região posterior direita, no intervalo 3, foram mais negativas nas condições com violação em comparação com a condição “gramatical”. O efeito segue o mesmo padrão dos demais intervalos.

De forma semelhante ao intervalo 2, houve efeito cumulativo por aumento do número de violações em mais de uma região topográfica (posterior esquerda e fronto-central) no intervalo 3. Por isso, criamos um subconjunto de dados em que a amplitude média referente à condição “1 violação” foi subtraída da amplitude média referente à condição “2 violações” dos eletrodos associados às regiões topográficas posterior esquerda e fronto-central.

A comparação aninhada entre o modelo nulo (subtração~1) e o modelo com a variável independente “região” (subtração~região, $\text{Chisq} = 6.4845 \mid \text{DF} = 1 \mid \text{Pr}(> \text{Chisq}) = 0.01088^*$). A comparação de pares mostrou que a região “anterior esquerda” obteve amplitudes médias mais negativas que a região “fronto-central” (estimate= -0.456 | SE= 0.179 | df= 375 | t.ratio= -2.554 | p.value= 0.0110*).

Considerações parciais.

- O intervalo 1 mostrou efeitos significativos na comparação entre as condições com violação e a condição gramatical, e uma diferença entre as condições “2 violações” e “1 violação” na região topográfica “anterior esquerda” que foi marginalmente significativa na análise *post-hoc* do conjunto de dados com todas as condições ($p = 0.07$) e significativa na análise do conjunto de dados que continha apenas as condições “2 violações” e “1 violação”. Dessa forma, percebe-se um efeito espalhado, com efeito adicional cumulativo na região “anterior esquerda”.
- As comparações de pares nos intervalos 2 e 3 confirmaram a expectativa de que a condição “2 violações” evocou amplitudes médias mais negativas que a condição “1 violação” em parte das regiões topográficas testadas (intervalo 2, anterior esquerda, fronto-central, anterior direita e posterior esquerda; intervalo 3, anterior esquerda e fronto-central), ao passo que ambas as condições com violação eliciaram respostas eletrofisiológicas médias mais negativas que a condição “gramatical”.

- No intervalo 2, um detalhe importante sobre as regiões topográficas é que, ao contrário do esperado, a diferença entre a condição gramatical e a condição “1 violação” na região anterior esquerda não é significativa, mas a comparação entre a condição “gramatical” e “2 violações” é, assim como a comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação”. Dessa forma, parece que não há exatamente um efeito cumulativo de processamento gramatical na região anterior esquerda no sentido de o efeito não ser proporcional ao grau de gramaticalidade ($\text{gramatical} < \text{violação1} < \text{violação2}$).

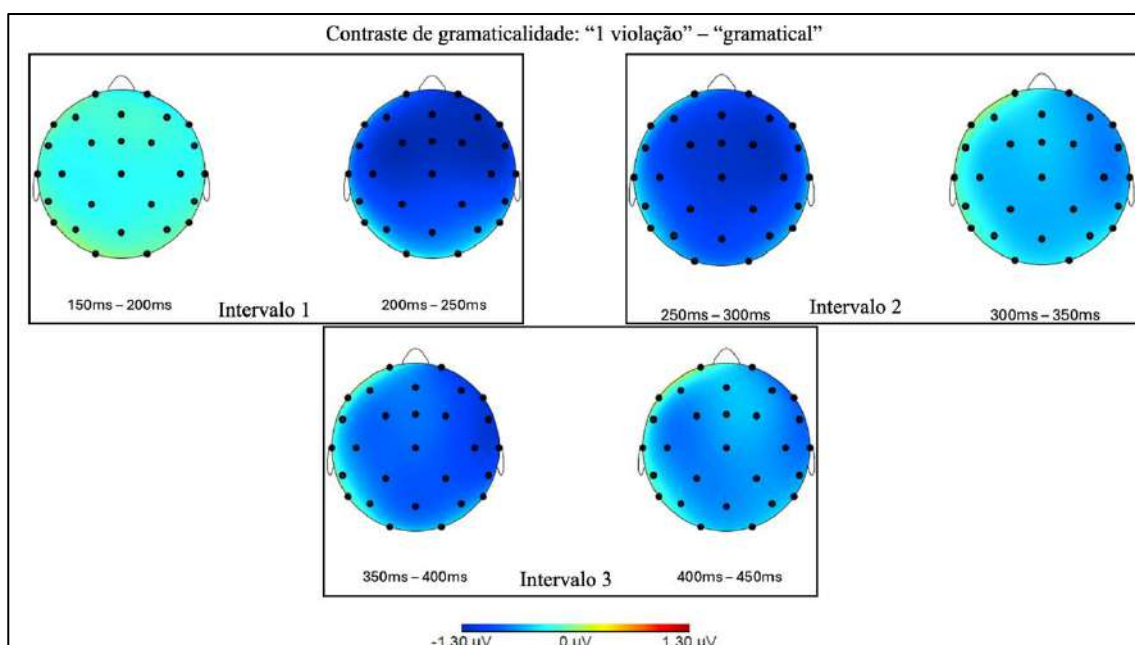
 - O que os dados indicam é que não há mais efeito de processamento por agramaticalidade para a condição “1 violação” nessa região a partir do intervalo 2. Nas demais regiões topográficas, a condição “1 violação” continua sendo mais negativa que a condição “gramatical”. A condição “2 violações”, por sua vez, é mais negativa que a condição “1 violação” tanto na região anterior direita quanto na posterior esquerda.
 - Nesse caso, parece haver um efeito cumulativo de processamento (potencialmente) morfossintático que decorre (i) de ativação adicional nas regiões “fronto-central”, “anterior direita” e “posterior esquerda” da condição “2 violações” (em comparação com a ativação da condição “1 violação” por processamento morfossintático) e (ii) do engajamento adicional de mais uma região topográfica, a região “anterior esquerda”, que não foi engajada no processamento morfossintático da condição “1 violação”.
- No intervalo 3, a comparação entre as condições “1 violação” e “gramatical” não atingiu diferença estatisticamente significativa na região “anterior esquerda”, similarmente ao intervalo 2, mas atingiu nas demais regiões topográficas. Já as condições “2 violações” e “gramatical” alcançaram diferença estatisticamente significativa em todas as regiões topográficas.

 - A comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação” obteve diferença estatisticamente significativa em duas regiões: na região “anterior esquerda”, onde aparentemente há efeito de gramaticalidade apenas da condição “2 violações”, e na região “fronto-central”, onde há efeito adicional de processamento gramatical da condição “2 violações” (já que também há efeito de processamento gramatical da condição “1 violação”, mais negativa que a condição “gramatical”).

- Dessa forma, também no intervalo 3, detecta-se um efeito cumulativo de processamento da condição “2 violações” por (i) efeito adicional na região “fronto-central” e (ii) engajamento adicional de região, a região “anterior esquerda”.
- O que detectamos é um efeito sustentado de processamento morfofossintático em ambas as condições contendo violação. O efeito cumulativo da condição “2 violações” também é sustentado, tanto no tocante ao engajamento adicional da região anterior esquerda quanto no efeito adicional na região fronto-central, onde a condição “1 violação” também exibe efeito de processamento gramatical.

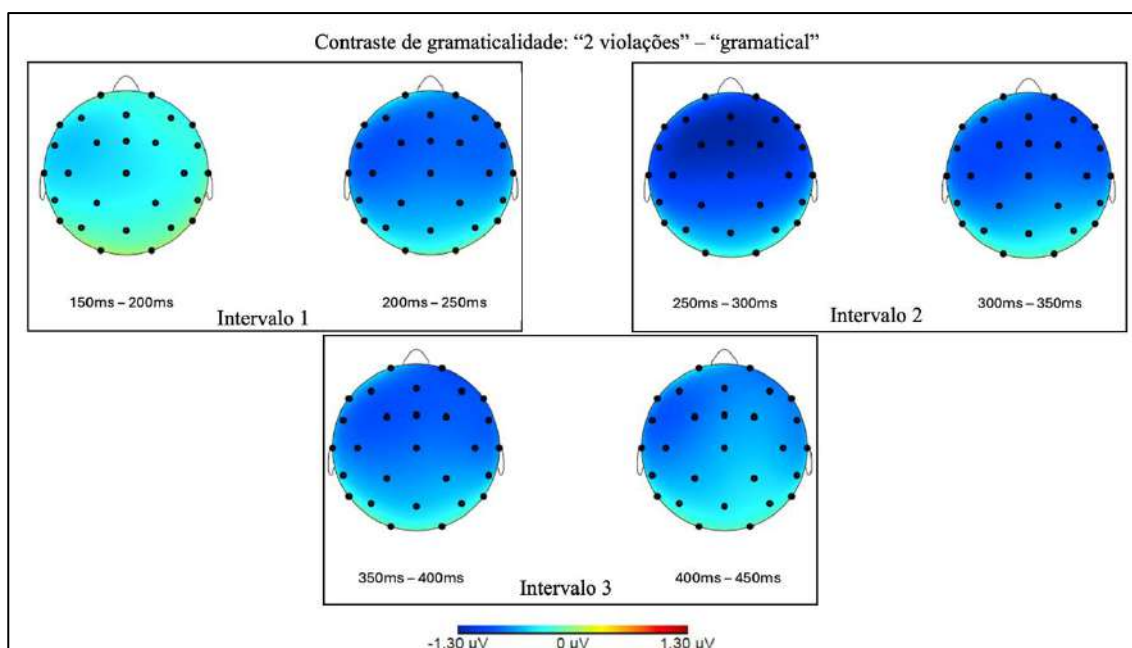
A figura 33 mostra a distribuição do efeito de gramaticalidade em mapa de calor a partir da subtração entre as condições “1 violação” e “gramatical”, enquanto a figura 34 mostra a distribuição do efeito de gramaticalidade a partir da subtração entre as condições “2 violações” e “gramatical”. Por fim, a figura 35 apresenta a subtração entre as condições “2 violações” e “1 violação”. O que vemos é uma maior distribuição do efeito nas regiões topográficas nas figuras 33 e 34, o que não se observa na subtração entre as condições “2 violações” e “1 violação”, a qual evidencia um efeito cumulativo por maior número de violações mais localizado em termos topográficos, como ilustrado pelo mapa de calor na figura 35.

Figura 33 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “1 violação” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “gramatical” desviante (blocos 3 e 4).



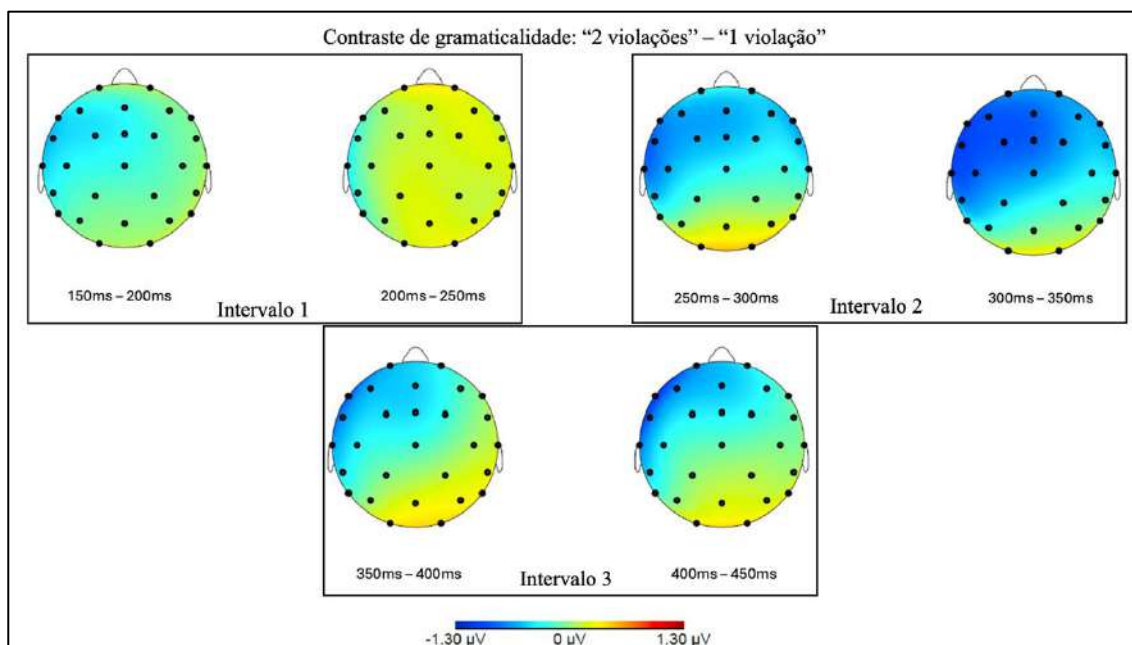
Fonte: elaboração própria.

Figura 34 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “2 violações” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “gramatical” desviante (blocos 3 e 4).



Fonte: elaboração própria.

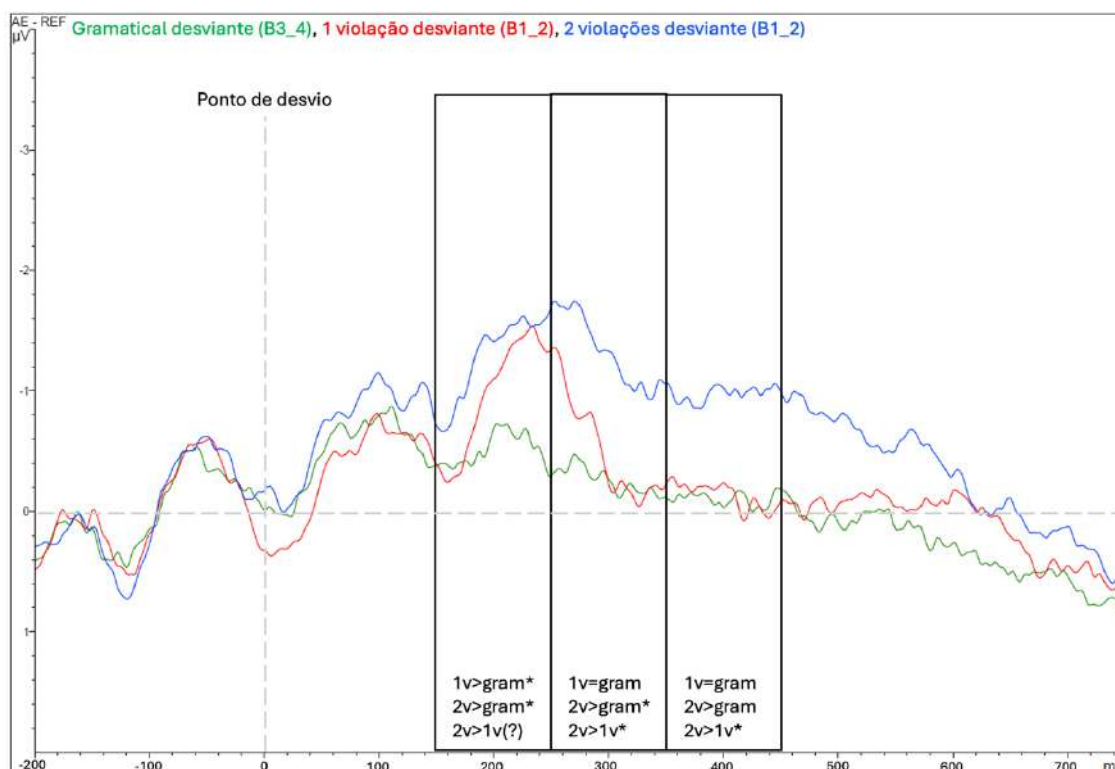
Figura 35 – mapa de calor com subtração entre as amplitudes médias da condição “2 violações” desviante (blocos 1 e 2) e da condição “1 violação” desviante (blocos 1 e 2).



Fonte: elaboração própria.

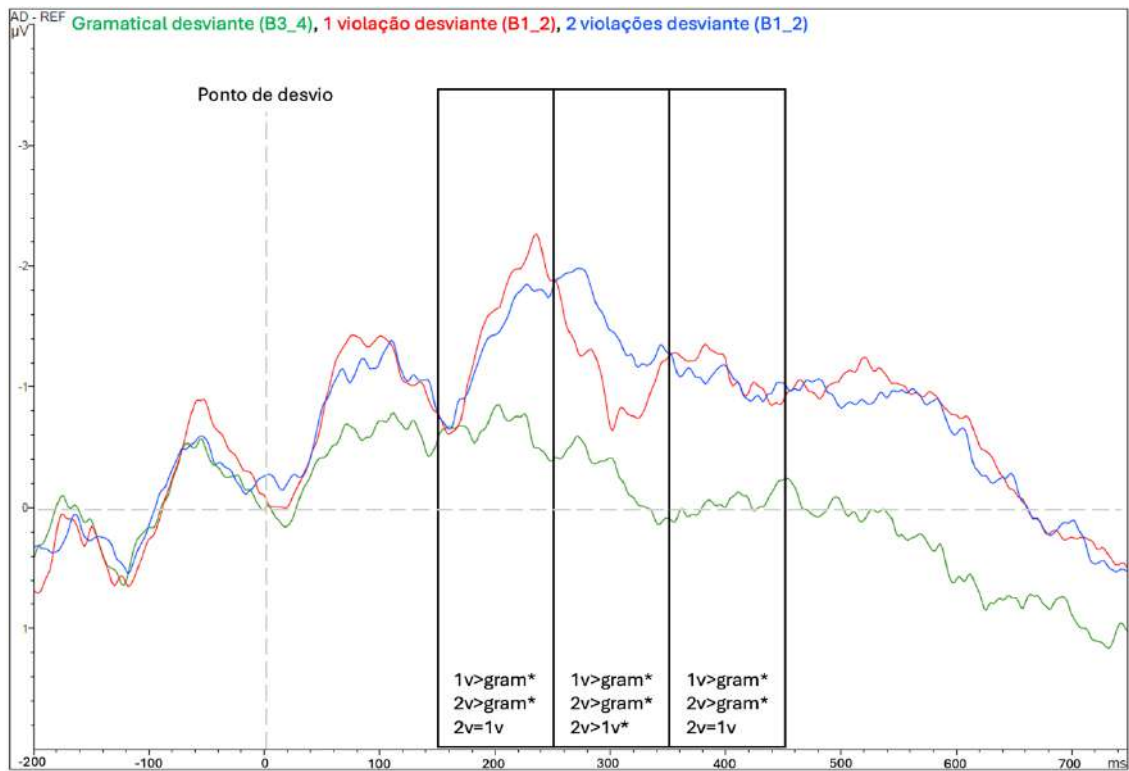
As figuras abaixo mostram os ERPs por condição, e cada figura corresponde a uma região topográfica. A figura 36 mostra refere-se à região topográfica “anterior esquerda” (AE). A figura 37 mostra refere-se à região topográfica “anterior direita” (AD). A figura 38 mostra refere-se à região topográfica “fronto-central” (FC). A figura 39 mostra refere-se à região topográfica “posterior esquerda” (PE). A figura 40 mostra refere-se à região topográfica “posterior direita” (PD).

Figura 36 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “anterior esquerda”.



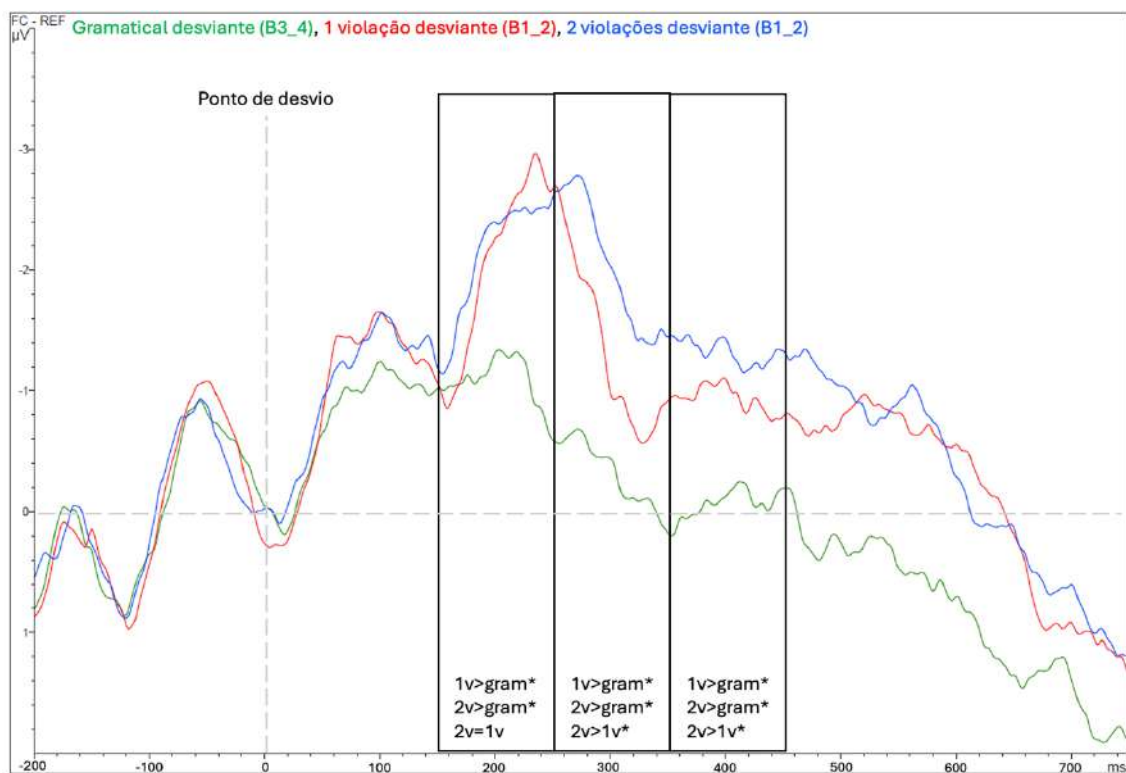
Fonte: elaboração própria.

Figura 37 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “anterior direita”.



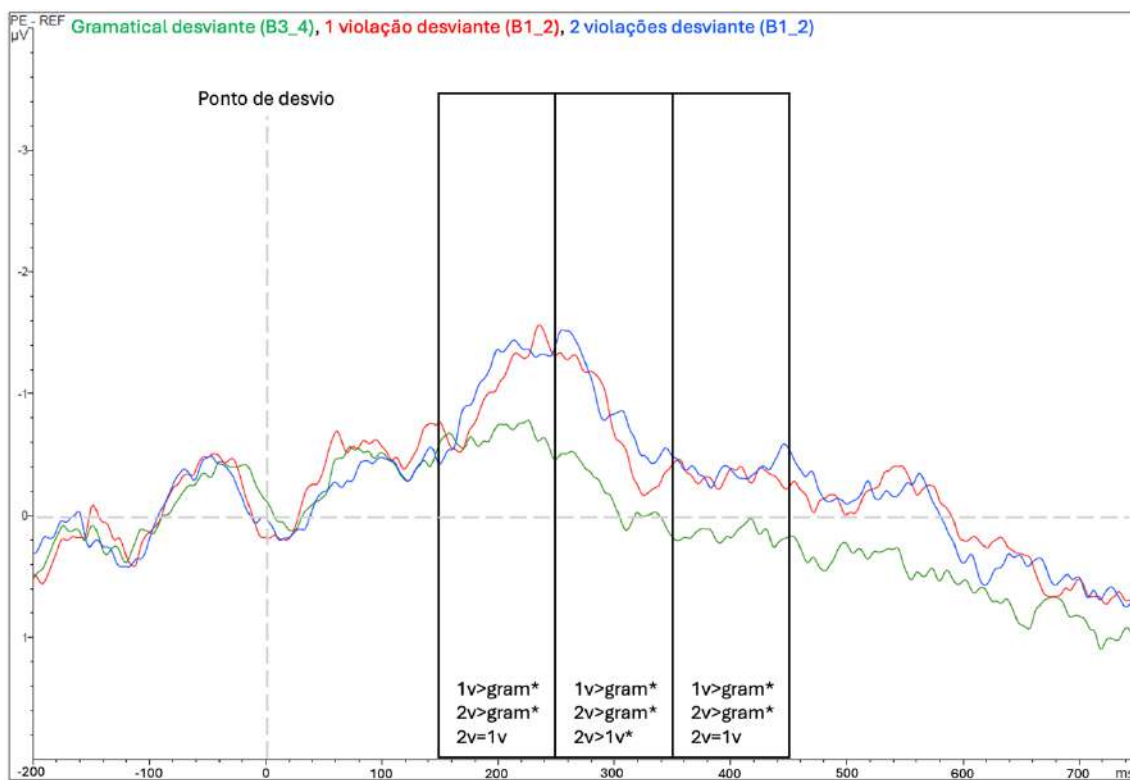
Fonte: elaboração própria.

Figura 38 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “fronto-central”.



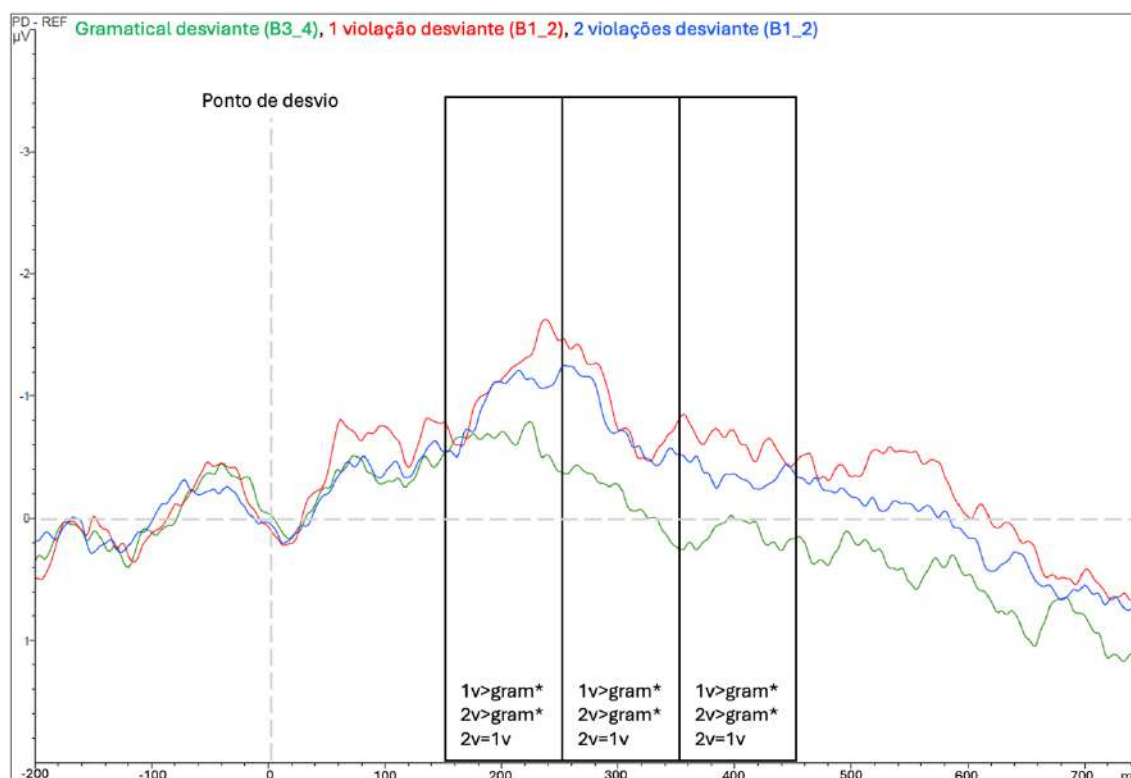
Fonte: elaboração própria.

Figura 39 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “posterior esquerda”.



Fonte: elaboração própria.

Figura 40 – gráfico de ERP e comparação de amplitude média das condições de gramaticalidade, na região topográfica “posterior direita”.



Fonte: elaboração própria.

As figuras 36, 37, 38, 39 e 40 mostram nitidamente a resposta neuronal sustentada em decorrência de agramaticalidade (*i.e.*, comparando estímulos agramaticais com a condição gramatical) e sua detecção precoce, já aos 150ms. As figuras 36, 37 e 38 mostram a resposta eletrofisiológica sustentada e cumulativa por aumento no número de violações (*i.e.*, na comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação”). A figura 36, em especial, reforça o apontamento sobre o efeito cumulativo na comparação entre as condições “2 violações” e “1 violação”, com maior amplitude negativa do primeiro, já no intervalo 1 na região “anterior esquerda”.

No capítulo a seguir, discutir-se-á os achados aqui reportados.

Capítulo 6 - Discussão

“For even the very wise cannot see all ends.”

Gandalf, O Cinzento

Vale retomar alguns dos pontos centrais sobre a proposta deste estudo. A pergunta colocada foi: processamos morfossintaxe de fato? E de forma automática? Caso o processamento de linguagem envolva operações mentais de natureza morfossintática, então fala-se de um processamento que envolva o reconhecimento de traços morfossintáticos abstratos (via *parsing* do insumo) e a posterior combinação dos elementos segmentados. Como achados anteriores em estudos de violação empregaram, na sua maioria, sintagmas ou sentenças que apresentavam uma violação, é possível que os efeitos encontrados reflitam apenas violações de probabilidade. Seguindo a proposta de Brunellière e Frauenfelder (2010), incluímos estímulos no experimento que eram gramaticais (“eu adoto”), que continham uma violação (“eu *adota”) ou duas violações (“eu *adotam”). Como ambas as condições de violação têm probabilidade zero de ocorrer após o pronome “eu”, um efeito maior da condição de duas violações em comparação com a condição com uma violação só poderia ser explicado (ou, ao menos, seria difícil de explicar por outro processo mental senão...) por um mecanismo de processamento que envolva o reconhecimento e acesso a traços morfossintáticos abstratos, assim como uma tentativa de combinação falha em decorrência da violação de concordância verbal.

Ademais, para atestar a natureza automática e reflexa deste processamento (*i.e.*, processamento que não se apoia em conhecimento consciente, declarativo), seria necessário adotar paradigmas experimentais que permitam verificar a presença de respostas eletrofisiológicas tão temporalmente precoces quanto possível e que sejam independentes de atenção. Há uma resposta eletrofisiológica que indexa processos temporalmente precoces e independentes de atenção, o *mismatch negativity*. Como já explicado, apesar de ser uma resposta associada a detecção de desvio de um padrão nos estímulos (ou seja, um processo de domínio geral), o MMN também é modulável por aspectos linguísticos nos estímulos. Um exemplo é quando há contraste de gramaticalidade nos estímulos, que leva ao que ficou conhecido como o MMN sintático, ou sMMN. Logo, o sMMN seria o marcador ideal de processamento morfossintático automático, e a previsão foi de que quanto mais violações no estímulo, maior a amplitude do sMMN. A expectativa, por conseguinte, era que houvesse um

pico de amplitude mais negativa de MMN na condição “2 violações” do que nas condições “1 violação” e “gramatical” na janela temporal em que o pico de MMN costuma ocorrer (em nosso estudo, intervalo 1, 150-250ms).

Mas os estudos já realizados que reportaram efeitos de sMMN, conforme o padrão de estudos em outros paradigmas, utilizaram apenas estímulos com uma violação. Apenas um estudo de sMMN empregou uma comparação similar ao experimento desta tese, que serviu como inspiração para nosso experimento, mas falhou em eliciar mesmo o efeito tradicional de MMN (*i.e.*, por diferença acústica entre estímulos) que não é associado a morfossintaxe (Brunellière; Frauenfelder, 2010). Nosso experimento seria, de certa forma, inaugural em mostrar efeitos cumulativos de violação morfossintática em um paradigma que elicia respostas neuronais independentes de atenção e precoces, caso encontrasse tal efeito.

O que os resultados reportados no capítulo anterior dizem sobre as perguntas postas? Nós interpretamos que houve, potencialmente, um efeito *direto* de processamento morfossintático cumulativo e sustentado, ainda que não seja possível excluir uma contribuição do efeito de MMN. Este efeito foi detectado na comparação entre as amplitudes médias da condição “2 violações desviante” (blocos 1 e 2), da condição “1 violação desviante” (blocos 1 e 2) e “gramatical desviante” (blocos 3 e 4). O efeito cumulativo (isto é, na comparação entre “2 violações” e “1 violação”) apresenta as seguintes características: parece ter início precoce, já aos 150ms após o ponto de desvio⁴; é sustentado, ou seja, se estende pelo intervalo 2 (nas regiões topográficas fronto-central, anterior direita e posterior esquerda) e pelo intervalo 3 (na região topográfica fronto-central); e tem engajamento adicional de região topográfica, a região anterior esquerda, na condição “2 violações” durante os intervalos 2 e 3.

A partir dessa síntese fica claro que não estamos caracterizando o efeito como do tipo MMN, que merece a dividida explicação. Em primeiro lugar, apesar de não ser possível descartar a contribuição de um efeito de MMN no intervalo 1 (150-250ms) dos blocos 1 e 2, quando o estímulo “gramatical” era o padrão, o efeito pode ter refletido processamento diretamente morfossintático nos blocos 1 e 2. A latência do efeito, por exemplo, é atípica para efeitos de MMN. Além disso, a inexistência de um MMNi “gramatical” (“gramatical” desviante - “gramatical” padrão) impossibilita a comparação com o MMNi “1 violação” (“1 violação” desviante - “1 violação” padrão) que, por sua vez, é um efeito pequeno que pode

⁴ Deve-se lembrar que (i) há um efeito que é apenas marginalmente significativo na região anterior esquerda na comparação entre as condições “1 violação” e “2 violações”, (ii) está visualmente presente no mapa de calor (figura 33) e no gráfico de ERP (figura 34), ainda que seja um efeito mais fraco e (iii) a diferença entre condição gramatical e condições com violação é significativa já no intervalo 1, o que mostra já um efeito de gramaticalidade no intervalo 1.

resultar de um falso positivo na análise, além de ser tardio para a janela temporal típica do MMN. Mesmo o MMNi “1 violação” acaba sendo contaminado pelo fato de que o estímulo “1 violação” nos blocos 3 e 4 não foi processado como um “estímulo padrão”. Nos blocos 3 e 4, não houve efeito de MMN, o que é evidenciado pelo estímulo padrão “1 violação” ser expressivamente mais negativo que o estímulo gramatical, o qual ocorreu como um dos “desviantes” nestes blocos.

Antes de prosseguir, cabe elencar as razões prováveis pelas quais não houve MMN nos blocos 3 e 4 e, possivelmente, pelas quais talvez os efeitos dos blocos 1 e 2 reflitam processamento morfofossintático direto e não somente MMN. Em primeiro lugar, o paradigma que adotamos foi o *multifeature*, que permite aumentar o número de “desviantes” por bloco como forma de encurtar a duração do experimento, desde que os estímulos “desviantes” sejam infrequentes em comparação com o estímulo “padrão”. Contudo, ao adotar uma probabilidade de .2 para cada estímulo desviante e .6 para o estímulo padrão (ou seja, uma diferença de proporção não tão grande), podemos ter falhado em estabelecer um traço de memória padrão na memória. Como explicado, ainda que não se possa descartar inteiramente a contribuição de um efeito de MMN nos blocos 1 e 2, a similaridade das amplitudes médias geradas pelo estímulo gramatical como padrão nos blocos 1 e 2 e pelo estímulo gramatical como desviante nos blocos 3 e 4 suscita a reflexão de que não tenha havido MMN de fato nos blocos 3 e 4, e que talvez os blocos 1 e 2 também não tenham tido um efeito de MMN. De fato, sobre este último ponto, a diferença de amplitude no intervalo 1 entre as condições “2 violações” e “1 violação” que mais se aproximou da significância estatística (marginal, $p=0.07$) foi na região topográfica anterior esquerda. Logo, as características metodológicas do nosso experimento podem ter causado ausência do efeito de MMN nos blocos 3 e 4, assim como podem ter contribuído para efeitos diretamente morfofossintáticos nos blocos 1 e 2.

Apesar de não ter havido um efeito de sMMN, ou ao menos não como esperado nos blocos 1 e 2, descobriu-se algo surpreendente. Aparentemente, houve um efeito *direto* de processamento morfofossintático sustentado que não foi intermediado pelo MMN (mas que pode ter contribuição deste), detectado na comparação entre as amplitudes médias da condição “2 violações desviante” (blocos 1 e 2), da condição “1 violação desviante” (blocos 1 e 2) e “gramatical desviante” (blocos 3 e 4). O efeito cumulativo (isto é, na comparação entre “2 violações” e “1 violação”) apresenta as seguintes características: parece ter início precoce, já

aos 150ms após o ponto de desvio⁵, na região anterior esquerda; é sustentado, ou seja, se estende pelo intervalo 2 (nas regiões topográficas fronto-central, anterior direita e posterior esquerda) e pelo intervalo 3 (na região topográfica fronto-central); e tem engajamento adicional de região topográfica, a região anterior esquerda, na condição “2 violações”.

Explicando em mais detalhes alguns pontos do parágrafo anterior e o que estamos chamando de “cumulativo”, há dois aspectos que o definem: *efeito adicional* de processamento morfossintático e *engajamento adicional* de região topográfica. Sobre o primeiro ponto, chamamos de “efeito adicional” a negatividade maior eliciada pela condição “2 violações” em comparação com a negatividade eliciada pela condição “1 violação” nos intervalos e nas regiões topográficas em que a condição “1 violação” também foi mais negativa que a condição “gramatical”. Ou seja, o efeito adicional ocorre quando ambas as condições evocam efeitos de agramaticalidade, reflexo de processamento morfossintático, mas a condição com maior número de violações evoca amplitude mais negativa. Este detalhe é importante, pois os mapas de calor oriundos da subtração “2 violações”-“1 violação” (Figura 33) fazem parecer que há um efeito adicional na região anterior esquerda nos intervalos 2 e 3 quando, na verdade, a condição “1 violação” não tem diferença em amplitude da condição “gramatical” nestes intervalos. Ou seja, isso que mostra que apenas a condição “2 violações” apresentou efeito na região anterior esquerda, sugestivo de maior esforço no processamento morfossintático nesta área. Isso fica claro na Figura 34. É diferente do que acontece nas regiões fronto-central (intervalo 2 e 3) e anterior direita (intervalo 2), em que as duas condições com violação são mais negativas que a condição gramatical, e a condição com mais violações é mais negativa que a condição com apenas uma violação. Por isso, o efeito cumulativo da condição “2 violações” é composto, primeiro, por um efeito adicional de processamento morfossintático da condição “2 violações” e, segundo, por um *engajamento adicional* de região topográfica, a região anterior esquerda, onde não há efeito de processamento morfossintático da condição “1 violação”.

Dado que o propósito original do estudo era apenas olhar modulações de amplitude do MMN, muito do que encontramos e discutiremos não era esperado. Por outro lado, os efeitos reportados dialogam favoravelmente com a hipótese posta, ainda que uma série de ressalvas sejam necessárias e uma boa dose do que será apresentado tenha caráter especulativo.

⁵ Deve-se lembrar que (i) há um efeito que é apenas marginalmente significativo na região anterior esquerda na comparação entre as condições “1 violação” e “2 violações”, (ii) está visualmente presente no mapa de calor (figura 33) e no gráfico de ERP (figura 34), ainda que seja um efeito mais fraco e (iii) a diferença entre condição gramatical e condições com violação é significativa já no intervalo 1, o que mostra já um efeito de gramaticalidade no intervalo 1.

Interpretação funcional. O efeito reportado reflete uma de três possibilidades: efeito que reflete (i) diretamente operações de *parsing* e combinação, (ii) violação de expectativas morfossintáticas ou (iii) custo de memória de trabalho. Começaremos pela primeira, já que ela parece ser a mais plausível e também acaba por ser subjacente às demais explicações.

A primeira interpretação é de que a resposta captada pelo eletroencefalograma foi de atividade neuronal referente às operações mentais de segmentação e combinação de traços morfossintáticos abstratos. Ou seja, os neurônios “fazendo *parsing*”. Estudos de eletrofisiologia anteriores embasam esta visão em estudos de processamento morfossintático (e.g., Leminen *et al.*, 2016; Regel *et al.*, 2019). Neste cenário, no intervalo 1 (150-250ms), o efeito de processamento morfossintático nas condições com violação refletiria a segmentação e a detecção da agramaticalidade a partir dos traços morfossintáticos, com efeito adicional na região anterior esquerda contrastando as condições “2 violações” e “1 violação”. Apesar de o Este efeito estaria em linha com o esperado a partir de achados que apontam a região anterior esquerda em janelas temporais precoces como um *locus* de processamento morfossintático (estudos de E/LAN, e.g., Alekseeva *et al.*, 2024). Possíveis tentativas de reparo e combinação poderiam estar associadas ao efeito adicional da condição 2 violações na região fronto-central, que mantém a negatividade adicional nos intervalos 2 (250-350ms) e 3 (350-450ms). Esta região foi associada à atividade no giro frontal inferior esquerdo, por exemplo, no estudo de MMN sintático de Hanna *et al.* (2014), o que a torna uma potencial candidata também à região topográfica com efeitos morfossintáticos.

O quadro se complexifica ao considerarmos os efeitos nas demais regiões topográficas. No intervalo 2, a condição “2 violações” apresenta negatividade adicional nas regiões posterior esquerda e anterior direita (além da fronto-central). Na região anterior esquerda, nos intervalos 2 e 3, a condição “1 violação” passa a evocar o mesmo nível de amplitude que a condição gramatical, como já explicado anteriormente, ao passo que no intervalo 3, na região anterior direita, as condições “1 violação” e “2 violações” evocam amplitudes negativas de nível semelhante, maiores que na condição gramatical. O que isso tudo indica?

Considerando apenas a condição “1 violação”, parece que, na porção anterior dos eletrodos, há uma lateralização para a direita do efeito de processamento morfossintático. O que explicaria a condição “2 violações”, no intervalo 3, engajar tanto regiões anterior esquerda e direita e a condição “1 violação”, além de não engajar a região anterior esquerda no intervalo 2, engajar a região anterior direita no intervalo 3 no mesmo nível que a condição “2 violações”? A principal resposta pode residir no tipo de violação de concordância. As duas condições agramaticais apresentam violação de concordância de *pessoa*, ao passo que a condição com

mais violações também apresenta violação de concordância de *número*. Assim, a violação de concordância de pessoa engajaria resposta lateralizada para a direita, enquanto a violação de concordância de número (acompanhada da violação de concordância de pessoa) engajaria também a região anterior esquerda.

O fato de que, no intervalo 2, a condição “2 violações” é mais negativa que a condição “1 violação” na região anterior direita pode estar relacionado com um custo geral de processamento combinatório aumentado, ainda que, em tese, esta seria a região topográfica associada ao processamento do traço morfossintático de pessoa. No intervalo 3, quando na mesma região a negatividade da condição “2 violações” é semelhante à da condição “1 violação”, então a atividade neuronal se restringiria aos mesmos processos associados à concordância de pessoa. Enquanto isso, a atividade na região anterior esquerda da condição “2 violações”, nos intervalos 2 e 3, seria referente a processamento relacionado ao traço morfossintático de número.

Resumidamente, a explicação mais plausível para nossos resultados é que, ao passo que a segmentação e acesso inicial aos traços morfossintáticos aconteceriam no intervalo 1, com efeito potencial na região anterior esquerda (e detecção generalizada de agramaticalidade nas demais regiões topográficas), o processo de tentativas de combinação e reparo engajaria a região fronto-central ao longo dos intervalos 2 e 3, com demais processos cognitivos que envolvem o processamento de número e de pessoa associados, respectivamente, às regiões anterior esquerda e anterior direita. O efeito adicional na condição “2 violações” nas regiões posterior esquerda e anterior direita também refletiria o maior custo pelo processamento combinatório.

Infelizmente, não há paralelo na literatura para os efeitos que reportamos, sendo o presente trabalho o único, até onde se sabe, que reportou efeitos significativos neste tipo de contraste em paradigma experimental com tarefa de distração. Outros estudos que investigaram violação de concordância de número e de pessoa não somente reportaram latências e topografias distintas, como esses resultados são oriundos de experimentos com paradigmas, tarefas, línguas e tipos de estímulos diferentes, além de terem atenção direcionada aos estímulos. Por exemplo, um estudo em espanhol de Mancini *et al.* (2011) encontraram respostas mais próximas ao N400 em características relacionadas ao processamento de concordância de pessoa, com efeitos mais centrais e posteriores, mas empregou sentenças completas ao invés de pequenos sintagmas, ainda que a violação tenha sido local. Mancini *et al.* (2011b), na janela temporal mais próxima ao do nosso estudo (300-500ms), encontraram um efeito negativo de

incompatibilidade de pessoa em regiões central e posterior bilateralmente⁶ (comparado com a condição gramatical controle). Em um estudo de basco, Mancini *et al.* (2019) encontraram um efeito negativo na janela 300-400ms, centro-posterior e bilateral na condição de violação de pessoa que mais se aproxima da que testamos em nosso experimento, a qual contém um sujeito de primeira pessoa do plural e um verbo auxiliar de terceira pessoa do plural, segundo os autores (e.g., “*Ikastaroan japoniarrok1.pl euskara ikasi *dute3.pl gustora.*”, “Em aula, nós japoneses *tem aprendido basco com prazer”, tradução adaptada própria, p. 159).

Por fim, há um outro estudo em espanhol que, como o nosso, incluiu condições com violação de concordância de pessoa e com violação combinada de pessoa e número, além de incluir uma condição com violação apenas de concordância de número (Silva-Pereyra; Carreiras, 2007). Este estudo, que empregou sentenças lidas (e.g., “*Ustedes *entiendo la idea*”, “vós *entendo a ideia”, violação combinada, tradução adaptada própria, p. 207) reportou um padrão topográfico inteiramente diferente na janela temporal mais inicial (300-450ms), em que apenas a condição com violação combinada mostrou efeitos significativos, e apenas nas regiões anterior direita e anterior média, o que contrasta com a topografia evocada pela condição “2 violações” em nosso experimento. Um detalhe que também é importante ressaltar é que, em todos os casos citados, há um efeito positivo (P600) que segue a negatividade, e a influência dessa onda positiva também pode explicar, em parte, as diferenças aparentes entre efeitos experimentais nestes estudos e no nosso, que não encontrou pico positivo.

Dessa forma, como nossos achados não se alinham adequadamente com estudos de E/LAN ou com outros experimentos que testaram violações semelhantes, nossos achados devem ser interpretados com cautela e apenas no contexto do presente experimento. Isso suscita a urgência de replicações do nosso efeito. Outra limitação dos nossos estudos é não termos excluído inteiramente *confounds* fonético-fonológicos e semânticos, um ponto que será abordado mais a frente.

Retomando as interpretações funcionais dos efeitos, a segunda possibilidade é que houve uma violação de expectativa que levou ao efeito encontrado. No entanto, diferentemente de visões puramente probabilísticas da linguagem, a única explicação em termos de violação de expectativa para o efeito cumulativo na condição com duas violações é que o pronome gera expectativas de traços morfossintáticos específicos (por ser de primeira pessoa e singular) sobre

⁶ Este estudo analisou um contraste entre “*unagreement*” (discordância) e “*person mismatch*” (incompatibilidade de pessoa), uma distinção teórica que não foi parte do nosso experimento. Mencionamos apenas o resultado de *person mismatch* pois é o tipo de efeito que mais se assemelha ao que testamos.

o verbo, que não são cumpridas ao encontrar verbos com (i) morfema que indexa terceira pessoa e (ii) morfemas que indexam terceira pessoa e plural. Ou seja, mesmo que o efeito reflita violação de expectativa, ao menos na janela mais inicial, ele necessariamente envolve representação de traços morfossintáticos e segmentação do insumo linguístico para acesso a esses traços, ao passo que a sustentação do efeito refletiria tentativa falha de combinação desses traços. Ademais, apenas a violação de expectativa não parece dar conta do efeito sustentado, já que este parece indicar um esforço continuado.

Em terceiro lugar, uma explicação para o efeito em termos de custo de memória de trabalho também não pode ser inteiramente excluída, já que mais recursos de memória de trabalho seriam, em tese, necessários para lidar com uma tentativa de computação mais custosa e conflituosa. Por outro lado, todas as violações neste estudo foram locais (*i.e.*, em nível de sintagma sem elementos intervenientes entre pronome e verbo), o que já reduz custos de memória de trabalho. Além disso, um potencial efeito por custo de memória de trabalho também envolveria processamento morfossintático subjacente, que seria a motivação do custo. Seja qual interpretação funcional do efeito seja escolhida, e não é possível excluir nenhuma apenas com base neste experimento, todas se sobrepõem quanto ao tipo de operação mental que as subjazem: *parsing* morfossintático e combinação.

Explicações alternativas sobre o efeito e sobre a linguagem. Algumas explicações alternativas para o efeito encontrado, e para o fenômeno em si, são: processamento probabilístico da linguagem; *priming* sintático; visões lexicalizadas da gramática. Apenas uma explicação probabilística do processamento linguístico não explica, como já foi esclarecido, o efeito encontrado. Ademais, como também já explicitado, uma visão sobre o conhecimento linguístico que seja puramente estatístico, sem computação de regras abstratas, é desfavorecida pelos presentes achados de forma diferenciada de estudos prévios sobre processamento sintático. Ressalta-se, contudo, que não refutamos o papel de probabilidade e estatística sobre experiência no processamento linguístico, mas sim que há conhecimento linguístico abstrato que, minimamente, coexiste (ou que, maximamente, subjaz a ele).

A abordagem de *priming* sintático a efeitos experimentais em estudos de agramaticalidade não é inconsistente com os dados no intervalo 1, mas contradiz o efeito sustentado que encontramos. A interpretação dos efeitos de sMMN e ELAN como *priming* sintático (Pulvermüller; Shtyrov, 2003; Alekseeva *et al.*, 2024) concebe que a negatividade evocada por estímulos agramaticais supostamente reflete a presença de um morfema flexional não primado pelo pronome ou sujeito da frase. ao invés de custo de processamento. Por exemplo, em “*we *comes*”, a negatividade seria evocada pelo fato de que o morfema -s não

estava pré-ativado (para isso, seria necessário primeiro um sujeito de terceira pessoa do singular). A comparação crítica que fazem é que quando os verbos ocorrem sem contexto, também há negatividade eliciada, sendo este efeito reduzido na presença de um pronome que primária o morfema flexional. Isso leva Pulvermüller e Shtyrov (2003) e Alekseeva *et al.* (2024) a descartarem uma visão de efeitos de sMMN e ELAN como reflexos de custo de processamento sintático.

Mas três questões chave em nossos achados desfavorecem essa abordagem. Como apontado anteriormente na discussão sobre violação de expectativas, há um efeito sustentado nos intervalos 1, 2 e 3 nas condições que contém violação, além de diferenças topográficas entre condições com violação. Estes aspectos do efeito parecem refletir um custo continuado de processamento que é mais condizente com mecanismos de tentativa de reparo estrutural e combinação e com processos semânticos e discursivos relacionados aos tipos de violação. Além disso, há os efeitos adicionais de processamento por agramaticalidade da condição “2 violações” em comparação com a condição “1 violação”, que não se explicam apenas por uma redução de negatividade na condição gramatical. Logo, não há como esta abordagem dar conta dos efeitos que reportamos.

Por fim, os resultados deste experimento desfavorecem uma visão inteiramente lexicalizada do processamento gramatical por mostrarem um custo por segmentação e combinação de traços. Se as estruturas sintáticas fossem construções, com formas lexicalizadas, a previsão seria de que estruturas inexistentes suscitariam respostas eletrofisiológicas mais fracas, não mais fortes, que estruturas existentes (nesse caso, as gramaticais). Dois exemplos disso são os estudos de MMN de Cappelle, Pulvermüller e Shtyrov (2010) e Hanna *et al.* (2017), em que os sintagmas com verbos frasais que apresentavam violação eliciavam respostas de amplitude média menores do que os sintagmas sem violação, o que está em linha com estudos de MMN que comparam respostas neuronais a palavras e pseudopalavras (Pulvermüller *et al.*, 2001) e palavras frequentes e pouco frequentes (Alexandrov *et al.*, 2011). Eis a lógica: estruturas e palavras representadas na memória possuem conexões neuronais bem estabelecidas que respondem mais fortemente do que quando o cérebro tenta processar insumo inexistente. Mas algo que os próprios achados de Cappelle, Pulvermüller e Shtyrov e de Hanna *et al.* mostram é que a lexicalização de estruturas (ou de algumas estruturas) é uma possibilidade a ser considerada, de forma que não negamos a possibilidade de representação de estruturas na memória declarativa, mas sim recusamos a ideia de que a gramática seja inteiramente, essencialmente e/ou necessariamente lexicalizada.

Uma outra questão é sobre o efeito que reportamos ser morfossintático ou semântico. Um dos motivos que suscitaram investigações sobre composição semântica (como os estudos do tipo *red-boat* da Pyllkänen) é o desafio em remover inteiramente o *counfound* semântico de estudos de violação sintática (Pyllkänen, 2019). Em outras palavras: não há como excluir, inteiramente, efeitos de violação semântica de estudos com violação sintática, pois frases mal-formadas sintaticamente também o são semanticamente. Seja como for, mais uma vez, há um efeito que reflete alguma forma de segmentação e uma posterior tentativa de combinação, seja ela inteiramente baseada em computação de regras e traços morfossintáticos ou em acesso e combinação de informações semânticas associadas à morfossintaxe.

Como os efeitos que reportamos são distribuídos topograficamente, é possível que haja soma de processos semântico-discursivos em algumas regiões topográficas (e.g., regiões posteriores e anterior direita), enquanto a região topográfica anterior esquerda (no intervalo 1) e fronto-central (nos intervalos 2 e 3), ambas já associadas a atividade no giro frontal inferior esquerdo (respectivamente, Hanna *et al.*, 2014; Leminen *et al.*, 2016), atuariam nos processos morfossintáticos. Além disso, o efeito precoce no intervalo 1 na região topográfica anterior esquerda parece estar em linha com efeitos tipo E/LAN, associados a processamento morfossintático. Tudo que elencamos, ressalta-se, são propostas, não sendo viável precisar apenas com base nestes resultados. Ademais, inferir a natureza dos efeitos com base apenas em fator topográfico associado a achados de outros estudos torna qualquer interpretação altamente especulativa, o que, infelizmente, é o máximo que podemos oferecer neste momento. Não há como falar em “nossos dados provam”, mas em “nossos dados sugerem/apontam...”.

Essa pista topográfica e as características de latência dos efeitos estão entre os motivos para sugerirmos que as respostas eletrofisiológicas não se explicam apenas com base nas diferenças acústicas e fonológicas entre os estímulos. Apesar de o MMN ser modulado, também, por fatores acústicos como duração e intensidade dos estímulos (Näätänen *et al.*, 2007; Rika *et al.*, 2011), o estímulo com maior intensidade (cf. 4.2) a partir do ponto de desvio é da condição “1 violação”, que teve amplitudes negativas ou similares ou menores (a depender da região topográfica) do que o estímulo na condição “2 violações”. Houve também uma pequena diferença de duração, com o trecho após o ponto de desvio da condição “2 violações” sendo maior em 17ms do que na condição “1 violação”. No entanto, dada a diferença previamente explicada de intensidade que ocorre na direção oposta, não parece plausível que a duração do estímulo seja responsável pela maior magnitude do efeito. Além disso, as diferenças acústicas não explicam o fato de que, na região anterior esquerda nos intervalos 2 e 3, a condição “1 violação” tem processamento com amplitude semelhante à condição “gramatical” (ao passo

que a condição “2 violações” manteve a amplitude negativa maior). Também, as diferenças acústicas não explicam suficientemente os efeitos com latência sustentada. Mas este segue como o maior ponto de vulnerabilidade da nossa interpretação sobre os achados, pois não as propriedades acústicas não foram mantidas constantes. Em resumo, apesar de as questões apresentadas não refutarem inteiramente nossa interpretação dos efeitos, reforçam que um estudo futuro é necessário com maior controle sobre o fator fonético-fonológico para replicar o efeito morfossintático.

Dito isso, todos os pontos elencados até o momento apontam na direção de modelos de processamento combinatórios. Isto é, apesar de não testar um modelo de processamento de linguagem específico, os presentes achados sugerem que modelos que preveem combinatorialidade são mais adequados para explicar o processamento morfossintático, como, por exemplo, os modelos de Murphy (2024), de Friederici (2012) e de Matchin e Hickok (2020) (ver capítulo 2). O modelo procedimental/declarativo de Ullman também é condizente com os resultados que reportamos, assim como com uma possível variabilidade de representação e processamento de estruturas sintáticas que possam ser computadas via regra ou lexicalizadas na memória declarativa.

Uma ressalva relevante sobre nossos dados é seu caráter não-atencional. O controle da atenção em experimentos de *oddball/multifeature* com tarefa distratora não tem como ser inteiramente efetivo. Por isso não é apropriado falar que o MMN é “inconsciente” ou completamente independente de atenção, e o mesmo se aplica ao efeito que reportamos em nosso experimento. Por outro lado, o que vários participantes relataram é que, ao longo dos blocos, a repetição dos estímulos levava a uma “habituação comportamental” (no sentido de terem se acostumado ao som) e que havia um nível de “falta de percepção”. Quanto inquiridos sobre os estímulos reproduzidos no fone de ouvido após o fim do experimento, alguns dos participantes relataram não lembrar os estímulos logo após o experimento, mas após eu relatar quais foram os estímulos, confirmaram ter escutado elas frases que eu mencionei. Alguns reportaram escutar frases parecidas com o que foi reproduzido (ex.: “me adota”, “eu adoro”). Houve poucos casos de participantes que acertaram as três frases ouvidas ao longo do experimento, apenas três participantes, e um deles disse estar certo de só ter escutado duas frases (“eu adoto”, da condição gramatical, e “eu *adota”, da condição “1 violação”). A questão, portanto, é que há um certo grau de independência de atenção que dá ao MMN e à resposta que reportamos um caráter de automaticidade que não é observado em respostas cerebrais como N400 e P600, que requerem atenção do participante aos estímulos linguísticos.

Retomando os pontos essenciais de nossa discussão, de forma geral, reportamos um efeito cumulativo e automático de processamento (potencialmente) morfossintático, refletido por (i) amplitudes mais negativas nas condições com violação (comparadas com a condição gramatical) e (ii) amplitudes mais negativas na comparação entre a condição com 2 violações e a condição com 1 violação, além de engajamento adicional de região topográfica (a região anterior esquerda) pela condição “2 violações”.

O efeito que aqui descrevemos acaba por ser, simultaneamente, inédito e não inédito. Não é inédito no sentido de que, conforma previamente apontado, já há estudos que mostraram efeitos diferenciados em outros tipos de combinação de violação (Rossi *et al.*, 2005; Leminen *et al.*, 2016), que mostraram efeitos precoces e independentes de atenção de processamento sintático com topografia distribuída (Hasting; Kotz, 2008) e que mostraram efeitos automáticos na região anterior esquerda (Alekseeva *et al.*, 2024). Contudo, até onde é possível saber, nosso estudo é o primeiro a encontrar este efeito cumulativo, (potencialmente) morfossintático e automático que exclui o *confound* probabilístico. Ademais, o nosso estudo é o primeiro do tipo em português brasileiro.

Capítulo 7 - Conclusão

“End? No, the journey doesn't end here.”

Gandalf, O Cinzento

Nos propusemos a responder a seguinte pergunta: processamos linguagem via *parsing* e mecanismos de combinação que tem por base conhecimento morfossintático abstrato? A resposta, resumidamente, é: de acordo com nossos achados, sim.

Por motivos que foram deixados claros, não há como excluir inteiramente outras formas de processamento da linguagem e de representação do conhecimento sintático. Temos uma memória declarativa que pode, em tese, lexicalizar estruturas no formato de sentenças memorizadas, mas também como construções como proposto pela gramática de construções. O curso da compreensão também pode envolver um processamento de relações entre palavras que não é gramatical em natureza, mas probabilístico, a partir da experiência do falante. A questão é que nenhuma dessas propostas explicam satisfatoriamente nossos dados, de forma que minimamente deva haver mecanismos de *parsing* e combinação de elementos morfossintáticos que trabalhem em conjunto com outras formas de processar a compreensão de sentenças.

O mais excitante de trabalhar com dados de neurofisiologia (no nosso caso, eletrofisiologia) é que não há forma melhor de cravar os meios pelos quais o cérebro lida com a linguagem do que por dados neuronais. Mas com a tecnologia, vem as limitações. Nenhuma técnica de investigação de dados neurofisiológicas é sensível a tudo que concerne o cérebro e seu funcionamento. Ademais, necessidades metodológicas referentes à tecnologia e o tipo de experimento fazem com que haja restrições quanto ao que se pode testar e variar nos estímulos do experimento.

Dito isso, conseguimos obter uma contribuição significativa para a linguística teórica e para a eletrofisiologia do processamento de linguagem. A negatividade cumulativa morfossintática automática que reportamos apontam para modelos de processamento de linguagem e visões teóricas sobre a linguagem precisam incluir alguma forma de representação de traços morfossintáticos abstratos e computação. Além disso, contribuímos com uma nova (ao mesmo tempo, não nova) resposta eletrofisiológica que tem potencial para servir como parâmetro em investigações sobre a linguagem através de experimentos de

eletroencefalograma, que tenham por intenção buscar uma resposta cerebral (relativamente) independente de atenção e automática sensível a processamento morfossintático. A resposta cumulativa, com com todo o conjunto de características que apresentamos, é nova. Mas não é inteiramente nova já que respostas não atencionais associadas a processamento morfossintático já haviam sido reportadas, ainda que em desenhos experimentais que não excluía o *confound* de processamento probabilístico.

Alguns pontos restam em aberto, que suscitam futuros estudos. Primeiramente, deve se refinar a metodologia que evoque respostas como a que reportamos, já que nosso achado advém de um paradigma ideal para eliciação de MMN. Se nosso efeito é, de fato, independente do MMN, então a inclusão de condições “padrão” e “desviante” deve ser desnecessária. Outra frente de investigação, ainda referente a questões metodológicas, é sobre o quanto é possível variar os estímulos (*i.e.*, incluir mais verbos e palavras) sem que o efeito de habituação se perca, o qual pode ser importante para que o participante se distraia com a tarefa distratora. É fundamental que consigamos replicar este efeito em condições de distração maximizada, já que é este contexto, junto ao efeito temporalmente precoce, que confere à resposta neuronal seu potencial caráter automático e reflexo.

A caracterização do efeito também está em aberto e requer replicações. Reportamos algumas características temporais e topográficas do efeito. Mas será que elas se mantêm em outras investigações? Resta, claramente, investigar.

Já em termos de estudos sobre linguagem, algumas frentes se abrem. Uma delas se refere ao âmbito morfológico da morfossintaxe: verbos de outras conjugações (“-er” e “-ir”) também exibiriam o mesmo efeito? E verbos de morfologia irregular? Ademais, encontraríamos um contraste por frequência do verbo, já que há propostas de processamento de morfologia que preveem armazenagem em forma plena das palavras de morfologia complexa quando são de alta frequência de ocorrência? Outros tipos de violação sintática poderiam evocar a mesma resposta? Por fim, se o MMN pode ser modulável por questões semânticas dos estímulos linguísticos, como explicado no capítulo 3, também seria possível encontrar uma contraparte semântica do tipo de resposta neuronal que encontramos aqui?

Como dito na introdução, aí reside a alegria do pesquisador. Responder perguntas e ter mais perguntas a responder, mais possibilidades a explorar, mais limites a testar. Alegria esta reforçada por uma contribuição já dada, com o efeito que reportamos de negatividade cumulativa morfossintática automática.

Referências

ADGER, David. The architecture of the computation. In: ALLOT, Nicholas; LOHNDAL, Terje; REY, Georges (org.). **A Companion to Chomsky**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 1 ed., 2021. p. 125-139.

ALEKSEEVA, Maria; MYACHYKOV, Andriy; BERMUDEZ-MARGARETTO, Beatriz; SHTYROV, Yury. Morphosyntactic prediction in automatic neural processing of spoken language: EEG evidence. **Brain Research**, v. 1836, 148949, 2024.

ALEXANDROV, Alexander; BORICHEVA, Daria O.; PULVERMÜLLER, Friedemann; SHTYROV, Yury. Strength of Word-Specific Neural Memory Traces Assessed Electrophysiologically. **PlosONE**, v. 6, n. 8, e22999, 2011.

ARONOFF, Mark. Language: Between Words and Grammar. In: JAREMA, G.; LIBBEN, G. (org.). **The mental lexicon: Core Perspectives**. Amsterdam: Elsevier, 2008. Cap. 4, p. 55-80.

AURNHAMMER, Christoph; DELOGU, Francesca; BROUWER, Harm; CROCKER, Matthew W. The P600 as a continuous index of integration effort. **Psychophysiology**, v. 60, n. 9, e14302, 2023.

BAAYEN, Harald; MILIN, Petar; ĐURĐEVIĆ, Dusica; HENDRIX, Peter; MARELLI, Marco. An amorphous model for morphological processing in visual comprehension based on naïve discriminative learning. **Psychological Review**, v. 118, n. 3, p. 438-481, 2011.

BAKKER, Iska; MACGREGOR, Lucy J.; PULVERMÜLLER, Friedemann; SHTYROV, Yury. Past tense in the brain's time: neurophysiological evidence for dual-route processing of past-tense verbs. **NeuroImage**, v. 71, p. 187-195, 2013.

BARBER, Horacio; CARREIRAS, Manuel. Grammatical Gender and Number Agreement in Spanish: An ERP Comparison. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 17, n. 1, p. 137-153, 2005.

BARON, Sean G.; OSHERSON, Daniel. Evidence for conceptual combination in the left anterior temporal lobe. **NeuroImage**, v. 55, p. 1847-1852, 2011.

BARON, Sean G.; THOMPSON-SCHILL, Sharon L.; WEBER, Matthew; OSHERSON, Daniel. An early stage of conceptual combination: Superimposition of constituent concepts in left anterolateral temporal lobe. **Cognitive Neuroscience**, v. 1, n. 1, p. 44-51, 2010.

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015.

BEMIS, Douglas; PYLKKÄNEN, Liina. Simple Composition: A Magnetoencephalography Investigation into the Comprehension of Minimal Linguistic Phrases. **The Journal of Neuroscience**, v. 31, n. 8, p. 2801-2814, 2011.

BEMIS, Douglas; PYLKKÄNEN, Liina. Basic Linguistic Composition Recruits the Left Anterior Temporal Lobe and Left Angular Gyrus During Both Listening and Reading. **Cerebral Cortex**, v. 23, p. 1859-1873, 2013.

BEVER, Thomas; POEPEL, David. Analysis by Synthesis: A (Re-)Emerging Program of Research for Language and Vision. **Biolinguistics**, v. 4, n. 2-3, p. 174-200, 2010.

BLANCO-ELORRIETA, Esti; KASTNER, Itamar; EMMOREY, Karen; PYLKKÄNEN, Liina. Shared neural correlates for building phrases in signed and spoken language. **Scientific Report**, v. 8, 5492, 2018.

BOOIJ, Geert. Inflection and Derivation. In: BROWN, K. (org.). **Encyclopedia of Language & Linguistics**. Second Edition, v. 5. Oxford: Elsevier, 2006, p. 654-661.

BROUWER, Harm; FITZ, Hartmut; HOEKS, John C. J. Getting real about semantic illusions: Rethinking the functional role of the p600 in language comprehension. **Brain Research**, v. 1446, p. 127–143, 2012.

BROUWER, Harm; HOEKS, John C. J. A time and place for language comprehension: mapping the N400 and the P600 to a minimal cortical network. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 7, p. 1-12, 2013.

BRUNELLIÈRE, Angèle; FRAUENFELDER, Ulrich H. Mismatch negativity: A tool for studying morphosyntactic processing? **Clinical Neurophysiology**, v. 121, n. 10, p. 1751-1759, 2010.

BUTTERWORTH, Brian. Lexical representation. In: BUTTERWORTH, Brian. (org) **Language production**, Vol. 2. London: Academic Press, p. 257-294, 1983.

BYBEE, Joan. Regular morphology and the lexicon. **Language and Cognitive Processes**, v. 10, n. 5, p. 425-455, 1995.

CAFFARRA, Sindy; MENDONZA, Martha; DAVIDSON, Doug. Is the LAN effect in morphosyntactic processing an ERP artifact?. **Brain and Language**, v. 191, p. 9-16, 2019.

CAFFARRA, Sendy; MOLINARO, Nicola; DAVIDSON, Doug; CARREIRAS, Manuel. Second language syntactic processing revealed through event-related potentials: An empirical review. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, v. 51, p. 31-47, 2015.

CAPPELLE, Bert; SHTYROV, Yury; PULVERMÜLLER, Friedemann. Heating up or cooling up the brain? MEG evidence that phrasal verbs are lexical units. **Brain and language**, v. 115, n. 3, p. 189–201, 2010.

CHATER, Nick; MANNING, Christopher D. Probabilistic models of language processing and acquisition. **Trends in Cognitive Science**, v. 10, n. 7, p. 335-344, 2006.

CHOMSKY, Noam. **The minimalist program**. Cambridge, MA: MIT Press, 1995.

CONTIER, Friederike; WEYMAR, Mathias; WARTENBURGER, Isabell; RABOYSKY, Milena. Sustained Attention as Measured by Reaction Time Variability Is a Strong Modulator for the P600, but Not the N400. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 34, n. 12, p. 2287-2310, 2022.

COOPMANS, Cas W.; STRUIKSMA, Marijn E.; CHEN, Aojun. Processing of Grammatical Agreement in the Face of Variation in Lexical Stress: A Mismatch Negativity Study. **Language and Speech**, v. 66, n. 1, p. 202-213, 2022.

DOMINEY, Peter F.; HOEN, Michel; INUI, Toshio. A Neurolinguistic Model of Grammatical Construction Processing. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 18, n. 12, p. 2088-2107, 2006.

DRAGANOVA, Rossitza *et al.* Sound frequency change detection in fetuses and newborns, a magnetoencephalographic study. **NeuroImage**, v. 28, n. 2, p. 354-361, 2005.

DUNCAN, Connie C. *et al.* Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. **Clinical Neurophysiology**, v. 120, p. 1883-1908, 2009.

ESTIVALET, Gustavo L.; MEUNIER, Fanny. The Brazilian Portuguese Lexicon: An Instrument for Psycholinguistic Research. **PLOS ONE**, v. 10, n. 12, p. e0144016, 2015.

ECKSTEIN, Korinna; FRIEDERICI, Angela D. It's Early: Event-related Potential Evidence for Initial Interaction of Syntax and Prosody in Speech Comprehension. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 18, n. 10, p. 1696–1711, 2006.

ENGELHARDT, Paula E.; FERREIRA, Fernanda; JONES, Manon W. Good Enough Language Processing: A Satisficing Approach. **Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society**, v. 31, p. 413-418, 2009.

FEATHERSTONE, Cara R.; MORRISON, Catriona M.; WATERMAN, Mitch G.; MACGREGOR, Lucy J. Semantics, Syntax or Neither? A Case for Resolution in the Interpretation of N500 and P600 Responses to Harmonic Incongruities. **PLoS ONE**, v. 8, n. 11, p. e76600, 2013.

FEDORENKO, Evelina; IVANOVA, Anna A.; REGEV, Tamar I. The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain. **Nature Reviews Neuroscience**, v. 25, p. 289-312, 2024.

FERREIRA, Fernanda; BAILEY, Karl G. D.; FERRARO, Vittoria. Good-Enough Representations in Language Comprehension. **Current Directions in Psychological Science**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 2002.

FERREIRA, Fernanda; ÇOKAL, Derya. Sentence processing. In: HICKOK, Gregory; SMALL, Steven L. (org.). **Neurobiology of Language**. London: Academic Press, 1 ed., 2016. p. 265-274.

FERREIRA JÚNIOR, Fernando G. Dos grupos de discussão às redes neurais: reflexos sobre o desenvolvimento de um léxico mental. **Revista Brasileira de Linguística Aplicada**, v. 5, n. 2, p. 231-252, 2007.

FIEBACH, Christian J.; SCHLESEWSKY, Matthias; FRIEDERICI, Angela D. Separating syntactic memory costs and syntactic integration costs during parsing: The processing of German WH-questions. **Journal of Memory and Language**, v. 47, n. 2, p. 250-272, 2002.

FRANÇA, A.; LEMLE, M.; GESUALDI, A.; CAGY, M.; INFANTOSI, A. A neurofisiologia do acesso lexical: palavras em português. **Revista Veredas**, v. 2, 2008. p. 34-49.

FREUNBERGER, Dominik; BYLUND, Emanuel; ABRAHAMSSON, Niclas. Is It Time to Reconsider the ‘Gold Standard’ for Nativelikeness in ERP Studies on Grammatical Processing in a Second Language? A Critical Assessment Based on Qualitative Individual Differences. **Applied Linguistics**, v. 43, n. 3, p. 433-452, 2022.

FRIEDERICI, Angela D.. Towards a neural basis of auditory sentence processing. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 6, n. 2, p. 78-84, 2002.

FRIEDERICI, Angela D.. The cortical language circuit: from auditory perception to sentence

Comprehension. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 16, n. 5, 2012.

FRIEDERICI, Angela D.. Neurobiology of Syntax as the Core of Human Language. **Biolinguistics**, v. 11, p. 325-337, 2017.

FRIEDERICI, Angela D. *et al.* Localization of Early Syntactic Processes in Frontal and Temporal Cortical Areas: A Magnetoencephalographic Study. **Human Brain Mapping**, v. 11, p. 1-11, 2000.

FRIEDERICI, Angela D. *et al.* Syntactic parsing preferences and their on-line revisions: a spatio-temporal analysis of event-related brain potentials. **Cognitive Brain Research**, v. 11, n. 2, p. 305-323, 2001

FRIEDERICI, Angela D.; HAHNE, Anja; MECKLINGER, Axel. Temporal structure of syntactic parsing: Early and late event-related brain potential effects. **Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition**, v. 22, n. 5, p. 1219–1248, 1996.

FRIEDERICI, Angela D.; PFEIFER, Erdmut; HAHNE, Anja. Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. **Cognitive Brain Research**, v. 1, n. 3, p. 183-192, 1993.

FRISCH, Stefan; KOTZ, Sonja A.; VON CRAMON, D.Yves; FRIEDERICI, Angela D. Why the P600 is not just a P300: the role of the basal ganglia. **Clinical Neurophysiology**, v. 114, n. 2, p. 336-340, 2003.

FROST, Jade *et al.* The cognitive resource and foreknowledge dependence of auditory perceptual inference. **Neuropsychologia**, v. 117, p. 379-388, 2018.

FUKUI, Naoki. Merge and Bare Phrase Structure. In: FUKUI, Naoki (org.). **Merge in the Mind-Brain: Essays on Theoretical Linguistics and the Minimalist Program**. London: Routledge, 1 ed., 2017. p. 9-34.

GOLDBERG, Adele E. **Constructions: A Construction Grammar Approach to Argument Structure**. Chicago: University of Chicago Press, 1995.

GOLDBERG, Adele E. Constructionist approaches. In: HOFFMANN, Thomas; TROUSDALE, Graeme (org.). **The Oxford handbook of construction grammar**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 15-31.

GOMES, Juliana N.; FRANÇA, Aniela I. A técnica de ERP: investigando a assimetria sujeito-objeto na interface sintaxe-semântica com EEG. **Letras de Hoje**, Porto Alegre, v. 50, n. 3, p. 360-370, 2015.

GONDA, Shahar; TARRASCH, Ricardo; SHALOM, Ben. The functional significance of the P600: Some linguistic P600's do localize to language areas. **Medicine**, v. 99, n. 46, e23116, 2020.

GRUNBERG, Hernán L. Probing early lexical and morphological processing in Dutch with the MMN response. **Nederlandse Taalkunde**, v. 28, n. 1, p. 36-71, 2023.

HANNA, Jeff; SHTYROV, Yury; WILLIAMS, John; PULVERMÜLLER, Friedemann. Early neurophysiological indices of second language morphosyntax learning. **Neuropsychologia**, v. 82, p. 18–30, 2016.

HANNA, Jeff; CAPPELLE, Bert; PULVERMÜLLER, Friedemann. Spread the word: MMN brain response reveals whole-form access of discontinuous particle verbs. **Brain and Language**, v. 175, p. 86-98, 2017.

HANNA, Jeff; PULVERMÜLLER, Friedemann. Neurophysiological evidence for whole form retrieval of complex derived words: a mismatch negativity study. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 8, p. 1-13, 2014.

HAGOORT, Peter. On Broca, brain and binding: a new framework. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 9, n. 9, p. 416-423, 2005.

HAGOORT, Peter. MUC (memory, unification and control) and beyond. **Frontiers in Psychology**, v. 4, 416, 2013.

HAHNE, Anja; FRIEDERICI, Angela. Electrophysiological Evidence for Two Steps in Syntactic Analysis: Early Automatic and Late Controlled Processes. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 11, n. 2, p. 194-205, 1999.

HAO, Yuxin; DUAN, Xun; YAN, Qiuyue. Processing Aspectual Agreement in a Language with Limited Morphological Inflection by Second Language Learners: An ERP Study of Mandarin Chinese. **Brain Sciences**, v. 12, n. 5, 524, 2022.

HASTING, Anna S.; KOTZ, Sonja A.. Speeding Up Syntax: On the Relative Timing and Automaticity of Local Phrase Structure and Morphosyntactic Processing as Reflected in Event-related Brain Potentials. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 20, n. 7, p. 1207-1291, 2008.

HASTING, Anna S.; KOTZ, Sonja A.; FRIEDERICI, Angela D.. Setting the stage for automatic syntax processing: the mismatch negativity as an indicator of syntactic priming. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 19, n. 3, p. 386-400, 2007.

HAVAS, Viktória; RODRÍGUEZ-FORNELLS, Antoni; CLAHSEN, Harald. Brain potentials for derivational morphology: An ERP study of deadjectival nominalizations in Spanish. **Brain and Language**, v. 120, n. 3, p. 332-344, 2012.

HERRERA-DIAZ, Adianes *et al.* Tracking auditory mismatch negativity responses during full conscious state and coma. **Frontiers in Neurology**, v. 14, 1111691, 2023.

HERRMANN, Björn; MAESS, Burkhard; HASTING, Anna S.; FRIEDERICI, Angela D.. Localization of the syntactic mismatch negativity in the temporal cortex: an MEG study. **NeuroImage**, v. 48, n. 3, p. 590-600, 2009.

HILLYARD, Steven; HINK, Robert F.; SCHWENT, Vincent L.; PICTON, Terence W. Electrical Signs of Selective Attention in the Human Brain. **Science**, v. 182, n. 4108, p. 177-180, 1973.

HICKOK, Gregory; POEPEL, David. The cortical organization of speech processing. **Nature Reviews Neuroscience**, v. 8, p. 393-402, 2007.

HOEKS, John C. J.; STOWE, Laurie A; DOEDENS, Gina. Seeing words in context: the interaction of lexical and sentence level information during reading. **Cognitive Brain Research**, v. 19, n. 1, p. 59-73, 2004.

HOFFMANN, Thomas; TROUSDALE, Graeme. Construction Grammar: Introduction. In: HOFFMANN, Thomas; TROUSDALE, Graeme (org.). **The Oxford Handbook of Construction Grammar**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 1-13.

HU, Axu *et al.* Visual mismatch negativity elicited by semantic violations in visual words. **Brain Research**, v. 1746, p. 147010, 2020.

ISEL, F.; KAIL, M. Morphosyntactic integration in French sentence processing: Event-related brain potentials evidence. **Journal of Neurolinguistics**, v. 46, p. 23-36, 2018.

JÄÄSLELÄINEN, I. P. *et al.* Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, v. 101, n. 17, p. 6809-6814, 2004.

JACOBSEN, Thomas *et al.* Word class and word frequency in the MMN looking glass. **Brain and Language**, v. 218, 104964, 2021.

JOANISSE, Marc F.; MCCCELLAND, James L. Connectionist perspectives on language learning, representation and processing. Wiley interdisciplinary reviews. **Cognitive science**, v. 6, n. 3, p. 235–247, 2015.

KAAN, Edith; HARRIS, Anthony; GIBSON, Edward; HOLCOMB, Phillip. The P600 as an index of syntactic integration difficulty. **Language and Cognitive Processes**, v. 15, n. 2, p. 159-201, 2000.

KIM, Albert; OSTERHOUT, Lee. The independence of combinatory semantic processing: Evidence from event-related potentials. **Journal of Memory and Language**, v. 52, n. 2, p. 205-225, 2005.

KUTAS, M.; FEDERMEIR, K. D. Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). **Annual review of psychology**, v. 62, p. 621–647, 2011.

KUTAS, M.; HILLYARD, S. A. Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity. **Science**, v. 207, p. 203-207, 1980.

LANGACKER, Ronald W.. **Foundations of Cognitive Grammar, 1: Theoretical Prerequisites**. California: Stanford University Press, 1987.

LAU, Ellen F.; NAMYST, Anna. fMRI evidence that left posterior temporal cortex contributes to N400 effects of predictability independent of congruity. **Brain and Language**, v. 199, p. 104697, 2019.

LAU, Ellen F.; HOLCOMB, Phillip; KUPERBERG, Gina R. Dissociating N400 Effects of Prediction from Association in Single-word Contexts. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 25, n. 3, p. 484-502, 2013

LAU, Jay H.; CLARK, Alexander; LAPPIN, Shalom. Grammaticality, Acceptability, and Probability: A Probabilistic View of Linguistic Knowledge. **Cognitive Science**, v. 41, n. 5, p. 1202-1241.

LAVRIC, Aureliu; RASTLE, Kathleen; CLAPP, Amanda. What do fully visible primes and brain potentials reveal about morphological decomposition?. **Psychophysiology**, v. 48, p. 676-686, 2010.

LEMENEN, Alina; LEMENEN, Miika; KUJALA, Teija; SHTYROV, Yuri. Neural dynamics of inflectional and derivational morphology processing in the human brain. **Cortex**, v. 49, n. 10, p. 2758-2771, 2013.

LEMENEN, Alina *et al.* Neural mechanisms underlying word- and phrase-level morphological parsing. **Journal of Neurolinguistics**, v. 38, p. 26-41, 2016.

LEMENEN, Alina *et al.* Spatiotemporal dynamics of the processing of spoken inflected and derived words: a combined EEG and MEG study. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 5, p. 1-14, 2011.

LENTH, R. lsmeans: Least-Squares Means. R package version 2.20-23, 2015
<<http://CRAN.Rproject.org/package=lsmeans>>

LIANG, Maojin *et al.* Evaluation of Auditory Cortical Development in the Early Stages of Post Cochlear Implantation Using Mismatch Negativity Measurement. **Otology and Neurotology**, v. 35, n. 1, p. 7-14, 2014.

LIGHTFOOT, David. Plato's problem, UG and the language organ. In: MCGILVRAY, James A. (org.). **The Cambridge companion to Chomsky**. Cambridge: Cambridge University Press, 1 ed., 2005. p. 42-59.

LINNAVALLI, Tanja; PUTKINEN, Vesa; HUOTILAINEN, Minna; TERVANIEMI, Mari. Phoneme processing skills are reflected in children's MMN responses. **Neuropsychologia**, v. 101, p. 76-84, 2017.

LONKA, Eila *et al.* The mismatch negativity (MMN) brain response to sound frequency changes in adult cochlear implant recipients: a follow-up study. **Acta Oto-Laryngologica**, v. 133, n. 8, p. 853-857, 2013.

LUCK, S. **An introduction to the event-related potential technique**. Massachusetts: MIT Press, 2 ed., 2014.

MARANTZ, Alec. No Escape from Syntax: Don't Try Morphological Analysis in the Privacy of Your Own Lexicon. **University of Pennsylvania Working Papers in Linguistics**, v. 4, p. 201-225, 1997.

MATAR, Suahil; DIRANI, Julien; MARANTZ, Alex; PYLKKÄNEN, Liina. Left posterior temporal cortex is sensitive to syntax within conceptually matched Arabic expressions. **Scientific Reports**, v. 11, 7181, 2021.

MACGREGOR, Lucy J.; SHYTYROV, Yury. Multiple routes for compound word processing in the brain: Evidence from EEG. **Brain and Language**, v. 126, n. 2, p. 217-229, 2013.

MATCHIN, William; HICKOK, Gregory. The Cortical Organization of Syntax. **Cerebral Cortex**, v. 30, n. 3, p. 1481-1498, 2020.

MEYER, Lars; FRIEDERICI, Angela D.. Neural systems underlying the processing of complex sentences. *In*: HICKOK, Gregory; SMALL, Steven (org.). **Neurobiology of language**. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 597-606.

MANCINI, Simona; MOLINARO, Nicola; RIZZI, Luigi; CARREIRAS, Manuel. A person is not a number: Discourse involvement in subject–verb agreement computation. **Brain Research**, v. 1410, p. 64-76, 2011a.

MANCINI, Simona; MOLINARO, Nicola; RIZZI, Luigi; CARREIRAS, Manuel. When persons disagree: An ERP study of Unagreement in Spanish. **Psychophysiology**, v. 48, n. 10, p. 1361-1371, 2011b.

MANCINI, Simona; MASSOL, Stephanie; DUÑABEITIA, Jon A.; CARREIRAS, Manuel; MOLINARO, Nicola. Agreement and illusion of disagreement: An ERP study on Basque. **Cortex**, v. 116, p. 154-167, 2019.

MOLINARO, Nicola; BARBER, Horacio A.; CARREIRAS, Manuel. Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions. **Cortex**, 47, p. 908-930, 2011.

MORGAN-SHORT, Kara; HAMRICK, Phillip; ULLMAN, Michael T. Declarative and procedural memory as predictors of second language development. *In*: LI, S., HIVER, P.; PAPI, M. (org.). **The Routledge handbook of second language acquisition and individual differences**. (pp. 67–81). Nova York: Routledge, 1 ed., 2022. p. 67-81.

MURPHY, Elliot. ROSE: A neurocomputational architecture for syntax. **Journal of Neurolinguistics**, v. 70, 101180, 2024.

MYUNG, I. J. Computational Approaches to Model Evaluation. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**, p. 2453-2457, 2001.

NÄÄTANEN, Risto; ALHO, Kimo. Mismatch negativity--a unique measure of sensory processing in audition. **International Journal of Neuroscience**, v. 80, n. 1-4, p. 317-337, 1995.

NÄÄTÄNEN, Risto. The mismatch negativity: a powerful tool for cognitive neuroscience. **Ear Hearing**, v. 16, p. 6–18, 1995.

NÄÄTÄNEN, Risto *et al.* Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. **Nature**, v. 385, p. 432-434, 1997.

NÄÄTÄNEN, Risto; GAILLARD, A. W. K.; MÄNTYSALO, S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. **Acta Psychologica**, v. 42, n. 4, p. 313-329, 1978.

NÄÄTÄNEN, Risto; PAAVLAINEN, P.; RINNE, Teemu; ALHO, Kimo. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. **Clinical Neurophysiology**, v. 118, n. 2, p. 2544-2590, 2007.

NÄÄTÄNEN, Risto; PAKARINEN, Satu; RINNE, Teemu; TAKEGATA, Rika. The mismatch negativity (MMN): towards the optimal paradigm. **Clinical Neurophysiology**, v. 155, p. 140-144, 2004.

NÄÄTÄNEN, Risto; KREEGIPUU, Kairi. The Mismatch Negativity (MMN). IN: KAPPENMAN, Emily S.; LUCK, Steven J. (eds). **The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components**. Oxford Library of Psychology, 2011.

NUÑEZ-PEÑA, Isabel; HONRUBIA-SERRANO, Luisa. P600 related to rule violation in an arithmetic task. **Cognitive Brain Research**, v. 18, n. 2, p. 130-141, 2004.

O'ROURKE, Polly L.; VAN PETTEN, Cyma. Morphological agreement at a distance: Dissociation between early and late components of the event-related brain potential. **Brain Research**, v. 1392, p. 62-79, 2011.

ONNIS, L.; CHRISTIANSEN, M. H.; CHATER, N.. Human language processing: connectionist models. In: BROWN, Keith (org.). **Encyclopedia of Language & Linguistics**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2006. p. 401-409.

OSTERHOUT, L.; HOLCOMB, P. J. Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. **Journal of Memory and Language**, v. 31, n. 6, p. 785–806, 1992.

OSTERHOUT, L.; MOBLEY, L. A. Event-related brain potentials elicited by failure to agree. **Journal of Memory and Language**, v. 34, n. 6, p. 739–773, 1995.

PACZYNSKI, Martin; KUPERBERG, Gina R. Electrophysiological evidence for use of the animacy hierarchy, but not thematic role assignment, during verb-argument processing. **Language and Cognitive Processes**, v. 26, n. 9, p. 1402–1456, 2011.

PAKARINEN, Satu *et al.* Measurement of extensive auditory discrimination profiles using the mismatch negativity (MMN) of the auditory event-related potential (ERP). **Clinical Neurophysiology**, v. 118, n. 1, p. 177-185, 2007.

PARRISH, Alicia; PYLKKÄNEN, Liina. Conceptual Combination in the LATL With and Without Syntactic Composition. **Neurobiology of Language**, v. 3, n. 1, p. 46-66, 2022.

PARTANEN, Eino; PAKARINEN, Satu; KUJALA, Teija; HUOTILAINEN, Minna. Infants' brain responses for speech sound changes in fast multifeature MMN paradigm. **Clinical Neurophysiology**, v. 124, n. 8, p. 1578-1585, 2013.

PARTANEN, Eino; VAINIO, Martti; KUJALA, Teija; HUOTILAINEN, Minna. Linguistic multifeature MMN paradigm for extensive recording of auditory discrimination profiles. **Psychophysiology**, v. 48, n. 10, p. 1372-1380, 2011.

PELLETIER, F. J. The Principle of Semantic Compositionality. **Topoi**, v. 13, p. 11–24, 1994.

PINKER, Stephen. Rules of language. **Science**, v. 253, p. 530–535, 1991.

POLITZER-AHLES, Stephen; JAP, Bernard A. J. Can the mismatch negativity really be elicited by abstract linguistic contrasts?. **Neurobiology of Language**, v. 5, n. 4, p. 818–843, 2024.

POORTMAN, Eva B.; PYLKKÄNEN, Liina. Adjective conjunction as a window into the LATL's contribution to conceptual combination. **Brain and Language**, v. 160, p. 50-60, 2016.

PULVERMÜLLER, Friedemann; ASSADOLLAHI, Ramin. Grammar or Serial Order?: Discrete Combinatorial Brain Mechanisms Reflected by the Syntactic Mismatch Negativity. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 19, n. 6, p. 971-980, 2007.

PULVERMÜLLER, Friedemann *et al.*. Memory traces for words as revealed by the mismatch negativity. **Neuroimage**, v. 14, p. 607–616, 2001.

PULVERMÜLLER, Friedemann; SHYTYROV, Yury. Automatic processing of grammar in the human brain as revealed by the mismatch negativity. **NeuroImage**, 20, p. 159-172, 2003.

PULVERMÜLLER, Friedemann; SHYTYROV, Yury. Language outside the focus of attention: The mismatch negativity as a tool for studying higher cognitive processes. **Progress in Neurobiology**, v. 79, p. 49–71, 2006.

PULVERMÜLLER, Friedemann; SHYTYROV, Yury; KUJALA, Teija; NÄÄTÄNEN, Risto. Word-specific cortical activity as revealed by the mismatch negativity. **Psychophysiology**, v. 41, n. 1, p. 106-112, 2004.

PYLKKÄNEN, Liina. The neural basis of combinatory syntax and semantics. **Science**, v. 366, p. 62-66, 2019.

PYLKKÄNEN, Liina; BEMIS, Douglas K.; ELORRIETA, Estibaliz B. Building phrases in language production: An MEG study of simple composition. **Cognition**, v. 133, p. 371-384, 2014.

POLITZER, Ahles; JAP, Bernard A. J. Can the Mismatch Negativity Really Be Elicited by Abstract Linguistic Contrasts?. **Neurobiology of Language**, v. 5, n. 4, p. 818-843, 2024.

REGEL, Stefanie; OPITZ, Andreas; MÜLLER, Gereon; FRIEDERICI, Angela D. Processing inflectional morphology: ERP evidence for decomposition of complex words according to the affix structure. **Cortex**, v. 116, p. 143-153, 2019.

REGEL, Stefanie; MEYER, Lars; GUNTER, Thomas C. Distinguishing Neurocognitive Processes Reflected by P600 Effects: Evidence from ERPs and Neural Oscillations. **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, e96840, 2014.

RIKA, Takegata; HEIKKILÄ, Roope; NÄÄTÄNEN, Risto. Sound energy and the magnitude of change: effects on mismatch negativity. **NeuroReport**, v. 22, n. 4, p. 171-174, 2011.

ROSSI, Sonja; GUGLER, Manfred F.; HAHNE, Anja; FRIEDERICI, Angela D. When word category information encounters morphosyntax: An ERP study. **Neuroscience Letters**, v. 384, n. 3, p. 228-233, 2005.

RUE, Nadine P. W. D.; SNIJDERS, Tineke M.; FIKKERT, Paula. Contrast and Conflict in Dutch Vowels. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 15, p. 1-11, 2021.

SAMS, Mikko; PAAVILAINEN, Pasi; ALHO, Kimo; NÄÄTÄNEN, Risto. Auditory frequency discrimination and event-related potentials. **Electroencephalography and clinical Neurophysiology**, v. 62, n. 6, p. 437-448, 1985.

SASSENHAGEN, Jona; BORNKESSEL-SCHELESEWSKY, Ina. The P600 as a correlate of ventral attention network reorientation. **Cortex**, v. 66, 3-20, 2015.

SCHACHT, Annekathrin *et al.* Differential Task Effects on N400 and P600 Elicited by Semantic and Syntactic Violations. **PLoS ONE**, v. 9, n. 3, e91226, 2014.

SCHREUDER, R.; BAAYEN, R. Modeling morphological processing. In: Feldman, L. B. (ed), **Morphological Aspects of Language Processing**. Lawrence Erlbaum, New Jersey: Hillsdale, 1995, cap. 6, p. 131-154.

SERVICE, Elisabet; HELENIUS, Päivi; MAURY, Sini; SALMELIN, Riitta. Localization of syntactic and semantic brain responses using magnetoencephalography. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 19, n. 7, p. 1193-1205, 2007.

SHEN, Weilin; FIORI-DUHARCOURT, Nicole; ISEL, Frédéric. Functional significance of the semantic P600: evidence from the event-related brain potential source localization. **Neuroreport**, v. 27, n. 7, p. 548-558, 2016.

SHTYROV, Yury; HAUKE, Olaf; PULVERMÜLLER, Friedemann. Distributed neuronal networks for encoding category-specific semantic information: the mismatch negativity to action words. **European Journal of Neuroscience**, v. 19, n. 4, p. 1083-1092, 2004.

SHTYROV, Yury; PIHKO, Elina; PULVERMÜLLER, Friedemann. Determinants of dominance: Is language laterality explained by physical or linguistic features of speech?. **Neuroimage**, v. 27, n. 1, p. 37-47, 2005.

SILVA-PEREYRA, Juan; CARREIRAS, Manuel. An ERP study of agreement features in Spanish. **Brain Research**, v. 1185, p. 201-211, 2007.

STEINHAEUER, Karsten; DRURY, John E. On the early left-anterior negativity (ELAN) in syntax studies. **Brain and Language**, v. 20, p. 135-162, 2012.

STOCKALL, Linnea; MARANTZ, Alec. A single route, full decomposition model of morphological complexity: MEG evidence. **The Mental Lexicon**, v. 1, p. 85–123, 2006.

SUSSMAN, Elyse S.. A New View on the MMN and Attention Debate. **Journal of Psychophysiology**, v. 21, n. 3-4, p. 164–175, 2007.

SUSSMAN, Elyse S. *et al.* The Five Myths of MMN: Redefining How to Use MMN in Basic and Clinical Research. **Brain Topography**, v. 27, n. 4, p. 553-564, 2014.

TAFT, M.; FORSTER, K. Lexical storage and retrieval of prefixed words. **Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior**, v. 14, n. 6, 1980, p. 638-647.

TANNER, D. On the left anterior negativity (LAN) in electrophysiological studies of morphosyntactic agreement: A Commentary on “Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions” by Molinaro *et al.*, 2014. **Cortex**, v. 66, p. 149–155, 2015.

ULANOV, Maxim *et al.* Regionally specific cortical lateralization of abstract and concrete verb processing: Magnetic mismatch negativity study. **Neuropsychologia**, v. 195, 108800, 2024.

ULLMAN, Michael T. A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model. **Nature Reviews Neuroscience**, v. 2, p. 717-726, 2001.

ULLMAN, Michael T. The Declarative/Procedural Model: A Neurobiologically Motivated Theory of First and Second Language. In: VANPATTEN, B.; WILLIAMS, J. (org.). **Theories in Second Language Acquisition**. Nova York: Routledge, 2 ed., 2014.

ULLMAN, Michael T.; EARLE, F. Sayako; WALENSKI, Matthew; JANACSEK, Karolina. The Neurocognition of Developmental Disorders of Language. **Annual Review of Psychology**, v. 71, p. 389-417, 2020.

ULLMAN, M. T.; CORKIN, S.; COPPOLA, M.; HCKOK, G.; GROWDON, J. H.; KOROSHETZ, W. J.; PINKER, S. A neural dissociation within language: Evidence that the mental dictionary is part of declarative memory, and the grammatical rules are processed by the procedural system. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 9, n. 2, p. 266–276, 1997.

VAN GOMPEL, Roger; PICKERING, Martin. Syntactic Parsing. In: GASKELL, M.; ALTMANN, G. (org.). **The Oxford Handbook of Psycholinguistics**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2007. Cap. 17, p. 289-308.

VAN HERTEN, Marieke; KOLK, Herman H. J.; CHWILLA, Dorothee J. An ERP study of P600 effects elicited by semantic anomalies. **Cognitive Brain Research**, v. 22, p. 241-255, 2005.

WATSON, D. R.; TITTERINGTON, J.; HENRY, A.; TONER, J. G. Auditory Sensory Memory and Working Memory Processes in Children with Normal Hearing and Cochlear Implants. **Audiology and Neurotology**, v. 12, n. 2, p. 65-76, 2007.

WESTERLUND, Masha; PYLKKÄNEN, Liina. The role of the left anterior temporal lobe in semantic composition vs semantic memory. **Neuropsychologia**, v. 57, p. 59-70, 2014.

WESTERLUND, Masha; KASTNER, Itamar; KAABI, Meera Al; PYLKKÄNEN, Liina. The LATL as locus of composition: MEG evidence from English and Arabic. **Brain and Language**, v. 141, p. 124-134, 2015.

WHITING, Caroline M.; MARSLEN-WILSON, William D.; SHYTYRO, Yury. Neural dynamics of inflectional and derivational processing in spoken word comprehension: laterality and automaticity. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 7, p. 1-15, 2013.

ZACHAU, Swantje *et al.* Extracting rules: early and late mismatch negativity to tone patterns. **NeuroReport**, v. 16, n. 18, p. 2015-2019, 2005.

ZHANG, Linmin; PYLKKÄNEN, Liina. The interplay of composition and concept specificity in the left anterior temporal lobe: An MEG study. **Neuroimage**, v. 111, p. 228-240, 2015.