

Daniel Márcio Rodrigues Silva

**ADAPTAÇÃO E ESPECIFICIDADE AO ESTÍMULO EM
RESPOSTAS EVOCADAS AUDITIVAS A VOGAIS**

Belo Horizonte

2015

Daniel Márcio Rodrigues Silva

ADAPTAÇÃO E ESPECIFICIDADE AO ESTÍMULO EM RESPOSTAS EVOCADAS AUDITIVAS A VOGAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Neurociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Neurociências.

Orientador: Prof. Rui Rothe-Neves

Coorientador: Prof. Danilo B. Melges

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
2015

Agradecimentos

A realização dos estudos apresentados nesta tese não seria possível sem o apoio e o trabalho de um imenso número de pessoas, às quais registro aqui meus sinceros agradecimentos. Em primeiro lugar, sou grato a todos que, direta ou indiretamente, contribuem para a geração dos recursos públicos empregados em minha formação acadêmica e, particularmente, àqueles que acreditam no investimento em transmissão e produção do conhecimento.

Todos os procedimentos de coleta de dados foram efetuados no Laboratório de Psicolinguística da UFMG, no qual fui gentil e amistosamente acolhido pela coordenadora, Profa. Maria Luiza da Cunha Lima, e demais membros.

Pelas orientações, valiosos ensinamentos e atenção dispensada às longas discussões acerca dos variados temas pertinentes ao trabalho, sou grato aos professores Rui Rothe-Neves, orientador, e Danilo B. Melges, coorientador. Na ocasião de minha qualificação, tive ainda o privilégio de contar com uma excelente banca examinadora, composta pelos professores Maria Luiza da Cunha Lima, Pablo Arantes e Márcio Flávio Dutra Moraes, que realizaram apontamentos e sugestões fundamentais à condução da pesquisa. Agradeço também ao professor Joseph Dien, por disponibilizar gratuitamente o programa *ERP PCA Toolkit* e por responder prontamente às minhas dúvidas a respeito do funcionamento e possibilidades do mesmo, aos autores e colaboradores dos *softwares* livres *R* e *EEGLab*, e aos membros titulares e suplentes da banca examinadora desta tese.

Aos voluntários dos experimentos que se disponibilizaram a participar dos experimentos sem qualquer contrapartida, fica expressa minha gratidão.

Sou especialmente grato aos meus pais, Ronaldo – particularmente pelo estímulo, já na tenra infância, de meu interesse pela ciência – e Lúcia – pela gentileza desconcertante e apoio irrestrito e incondicional –, aos meus irmãos Luiz e Patrícia, à minha amada Marlúcia – pela compreensão, companheirismo e por ter me encantado e transformado meu modo de existir – e, finalmente, aos amigos Elias, Hugo, Vitor, Caio, Júlia, Ricardo, Diego, Bruno, Lilian, Juliana, Fabrício, Marcelo, Bruna, Guilherme, Renato, Flaviana, Maurício e Ana.

Durante parte do doutorado, recebi apoio financeiro através de uma bolsa do Programa de Demanda Social da Fundação CAPES.

RESUMO

Potenciais evocados de longa latência em resposta a sons vocálicos foram obtidos em dois estudos elaborados com o fim de investigar, em condições passivas de estimulação, manifestações neurofisiológicas de distinções entre categorias e distinções internas a categorias fônicas. Os sons usados como estímulos foram selecionados a partir de um conjunto de vogais sintetizadas ao longo de um *continuum* que cruza os limites entre as categorias /i/ e /e/ e entre /e/ e /ɛ/. No Estudo I, foi observado o complexo N1-P2 em um protocolo experimental de adaptação em que são apresentados pares de sons sucessivos e verificados efeitos da apresentação do primeiro (S_1) sobre a resposta ao segundo som (S_2). Para cada participante (N=26), foram selecionados três exemplares de /i/ e três exemplares de /e/ variando em passos iguais sobre o *continuum*: i_1 ; i_2 ; i_3 ; e_1 ; e_2 ; e_3 . Em cada prova foi apresentado um entre seis pares: i_3-i_3 ; e_1-e_1 ; i_1-i_3 ; e_3-e_1 ; e_2-i_3 ; i_2-e_1 . Efeitos de adaptação (atenuação da resposta a S_2) em N1 e P2 foram observados em todos os pares. Pares de sons idênticos (i_3-i_3 ; e_1-e_1), pares intra-categoria (i_1-i_3 ; e_3-e_1) e pares inter-categorias (e_2-i_3 ; i_2-e_1) foram comparados, não sendo observadas diferenças significativas entre as amplitudes das respostas a S_2 – amplitudes particularmente semelhantes ocorreram no caso de N1. Os resultados indicam, portanto, que a adaptação das respostas observadas não é específica ao estímulo. Variações sistemáticas de amplitude associadas a diferenças entre os sons apresentados como S_1 foram verificadas em P2 e em um subcomponente de N1 e sugerem que as populações neurais subjacentes não respondem de maneira inespecífica às vogais. No Estudo II, foi usado um protocolo de estimulação do tipo *oddball* para a obtenção da negatividade de incongruência (MMN). Para cada participante (N=16), foram selecionados três sons (i ; e_1 ; e_2) variando em passos iguais ao longo do *continuum* de modo que a diferença entre o primeiro e o segundo cruzasse o limite entre /i/ e /e/. Foram geradas duas sequências *oddball* a partir do par inter-categorias $i-e_1$ e duas a partir do par intra-categoria e_1-e_2 . Para cada par, os papéis de estímulo padrão e desviante foram invertidos entre as duas sequências, de maneira que o som e_1 desempenhasse ambos os papéis em condições intra- e inter-categorias. A MMN em resposta ao desviante e_1 apresenta maiores amplitudes no par inter-categorias comparado ao par intra-categoria, o que indica que representações das referidas categorias se manifestam na MMN. Tomados em conjunto, os resultados dos estudos I e II indicam que o processo de geração da MMN envolve mecanismos diferentes dos que se manifestam em paradigmas experimentais de adaptação como o empregado no Estudo I e, portanto, não fornecem apoio a propostas segundo as quais a MMN resulta da adaptação específica ao estímulo em N1.

Palavras-chave: potenciais evocados auditivos; N1; P2; MMN; vogais; categorização; adaptação; atenuação por repetição.

ABSTRACT

Long-latency evoked potentials in response to vowel sounds were obtained in two studies designed to investigate neurophysiological manifestations of within-category and across-category distinctions in passive listening conditions. The sound stimuli were synthesized vowel sounds selected from a continuum crossing the boundaries between categories /i/ and /e/ and between /e/ and /ɛ/. In *Study I*, N1 and P2 responses were investigated in an adaptation paradigm in which pairs of successive sounds were presented in order to examine the effect of the first sound (S_1) presentation on the response to the second sound (S_2). For each participant (N=26), three exemplars of the /i/ category and three exemplars of the /e/ category formed a series, in equal steps, along the vowel continuum: i_1 ; i_2 ; i_3 ; e_1 ; e_2 ; e_3 . Each trial consisted of the presentation of one of six possible pairs: i_3-i_3 ; e_1-e_1 ; i_1-i_3 ; e_3-e_1 ; e_2-i_3 ; i_2-e_1 . Adaptation effects (S_2 response attenuation) on N1 and P2 were observed for all pairs. Responses to S_2 in identical sounds pairs (i_3-i_3 ; e_1-e_1), within-category pairs (i_1-i_3 ; e_3-e_1) and across-category pairs (i_2-e_1 ; e_2-i_3) were compared and no significant differences were observed – N1 responses being particularly similar across pairs. These results indicate that the observed adaptation effects are not stimulus-specific. Systematic N1/P2 amplitude variations associated to differences between S_1 sounds suggest that underlying neural populations do not respond to vowels in a non-specific manner. In *Study II*, the MMN response was elicited in a passive *oddball* paradigm. For each participant (N=16), three sounds (i ; e_1 ; e_2) varying in equal steps along the continuum were selected in such a way that the difference between the first two sounds crosses the /i/-/e/ category boundary. Given the across-category $i-e_1$ pair and the within-category e_1-e_2 pair, two *oddball* sequences were generated from each pair such that the roles of deviant and standard stimulus were inverted. In this way, the sound e_1 occurred as deviant and as standard in both within- and across-category conditions. In agreement with previous results, larger MMN amplitudes in responses to the e_1 deviant in the across-category than in the within-category condition indicate that the MMN reflects representations of vowel categories. Taken together, the results of studies *I* and *II* suggest that MMN generation involves different mechanisms from the ones manifested in adaptation paradigms such as the one employed in *Study I* and, therefore, provide no support to proposals according to which MMN can be entirely explained by N1 stimulus-specific adaptation.

Keywords: auditory evoked potentials; N1; P2; MMN; vowels; categorization; adaptation; repetition attenuation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Oscilogramas e espectros LPC correspondentes a nove dos 28 sons vocálicos sintetizados.....	59
Figura 3.2 - Representação da sequência de estímulos apresentada durante o registro do EEG.....	61
Figura 3.3 - Derivações para o registro do EEG.....	62
Figura 3.4 - Condições experimentais consideradas nos testes das hipóteses	64
Figura 3.5 - Explorando as resposta a S_1	65
Figura 3.6 - Curvas de regressão logística ajustadas aos dados de classificação de um dos participantes	67
Figura 3.7 - Boxplots das proporções de respostas /i/ aos sons “ i_1 ”, “ i_2 ” e “ i_3 ”, e de respostas /e/ aos sons “ e_1 ”, “ e_2 ” e “ e_3 ”.....	67
Figura 3.8 - Topografias dos componentes N1 e P2 em resposta a S_1 e S_2	68
Figura 3.9 - Potenciais evocados em resposta aos sons S_1 e S_2 em pares de sons idênticos	69
Figura 3.10 - Potenciais evocados em resposta aos sons S_1 e S_2 em pares de sons idênticos	70
Figura 3.11 - Amplitudes médias de N1, P2 e $N1_{c1}$ nas respostas a S_1 e S_2	71
Figura 3.12 - Respostas a S_2 nos pares de sons idênticos, pares intra-categoria e inter-categorias	73
Figura 3.13 - Amplitudes médias de N1, P2 e $N1_{c1}$ em resposta a S_2 em pares de sons idênticos, pares intra-categoria e pares inter-categorias.....	74
Figura 3.14 - Respostas a S_1 em Fz, Pz e Cz.....	75
Figura 3.15 - Resposta a S_1 em TP9 e TP10.....	77
Figura 3.16 - Amplitude do subcomponente $N1_{c1}$ em resposta a S_1	77
Figura 3.17 - Ilustração da decomposição por autovetores.....	90
Figura 3.18 - Ilustração de um procedimento de rotação	93
Figura 3.19 - Componentes principais da PCA temporal com rotação Promax.	95
Figura 3.20 - Topografias dos componentes da PCA têmporo-espacial.....	99
Figura 3.21 - Componente T_1E_1 na derivação de máxima magnitude.....	101
Figura 3.22 - Componente T_1E_2 na derivação de máxima magnitude.....	102
Figura 3.23 - Componente T_2E_1 na derivação de máxima magnitude.....	103
Figura 3.24 - Componente T_2E_2 na derivação de máxima magnitude.....	104

Figura 4.1 - Curvas de regressão logística ajustadas aos dados de classificação de um dos participantes	114
Figura 4.2 - Boxplots das proporções de respostas /i/ ao som <i>i</i> e respostas /e/ aos sons <i>e</i> ₁ e <i>e</i> ₂	115
Figura 4.3 - Respostas a <i>e</i> ₁ em Fz com referência em TP9/TP10	116
Figura 4.4 - Comparações entre respostas a <i>e</i> ₁ como estímulo padrão e como estímulo desviante em pares intra- e inter-categorias	117
Figura 4.5 - Ondas de diferença em Fz com referencia em TP9/TP10 para os quatro sons.....	118
Figura 4.6 - Topografias da MMN nos quatro pares “desviante-padrão” (Referência em TP9/TP10).....	118
Figura 4.7 - Topografias da MMN nos quatro pares “desviante-padrão” (Referência em Nz).....	119
Figura 4.8 - Respostas a <i>e</i> ₁ com referência em Nz.....	120
Figura 4.9 - Interação TIPO DE ESTÍMULO x TIPO DE PAR em Fz, Cz e Pz	121
Figura 4.10 - Interação TIPO DE ESTÍMULO x TIPO DE PAR em TP9 e TP10 ...	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Pares de sons para a aquisição dos PEs	61
Tabela 3.2 - Componentes extraídos nas etapas temporal e espacial da PCA têmporo-espacial.....	99
Tabela 4.1 - Pares de estímulos desviante e padrão nas quatro sequências apresentadas no experimento.....	110
Tabela 4.2 - As quatro ordens de apresentação das quatro sequências de estímulos.....	111

ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANOVA. Análise de variância.

CP. Componente Principal.

ECD. *Equivalent current dipole* (dipolo de corrente equivalente).

F₀. Frequência fundamental.

F_n. n-ésimo formante.

LPC. *Linear Predictive Coding* (codificação preditiva linear)

MMN. *Mismatch Negativity* (Negatividade de Incongruência)

N1_{c1}. “Subcomponente 1” da resposta N1.

PCA. *Principal Component Analysis* (Análise de componentes principais).

PE. Potencial evocado.

S₁. Primeiro som de um dos pares apresentados do Estudo I (Capítulo 3).

S₂. Segundo som de um dos pares apresentados do Estudo I.

VOT. *Voice onset time* (tempo de início de vozeamento).

ε. *Epsilon de Greenhouse-Geisser.*

η²_p. *Eta quadrático parcial* (medida de tamanho do efeito)

Γ^T. Matriz resultante da transposição da matriz **Γ**.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	PERCEPÇÃO DOS SONS DA FALA E PROCESSAMENTO AUDITIVO	15
2.1	PERCEPÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DOS SONS DA FALA	15
2.2	PISTAS ACÚSTICAS PARA A PERCEPÇÃO DE SEGMENTOS FÔNICOS: O CASO DAS VOGAIS	17
2.3	VIAS NEURAIS DE PROCESSAMENTO AUDITIVO	19
2.3.1	DA CÓCLEA AO CÓRTEX AUDITIVO	20
2.3.2	PROCESSAMENTO AUDITIVO NO CÓRTEX CEREBRAL	24
2.4	RESPOSTAS EVOCADAS AUDITIVAS	27
2.4.1	O COMPLEXO N1-P2	28
2.4.2	A NEGATIVIDADE DE INCONGRUÊNCIA (MMN) E SUA RELAÇÃO COM N1	39
2.4.3	RESPOSTAS EVOCADAS A SONS DA FALA	42
3	ESTUDO I - ADAPTAÇÃO DAS RESPOSTAS N1 E P2 A VOGAIS	55
3.1	MÉTODOS	56
3.1.1	PARTICIPANTES	56
3.1.2	ESTÍMULOS	57
3.1.3	PROCEDIMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	58
3.2	RESULTADOS	66
3.2.1	TAREFAS DE CLASSIFICAÇÃO	66
3.2.2	POTENCIAIS EVOCADOS	68
3.3	DISCUSSÃO	78
3.4	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	85
3.4.1	EXTRAÇÃO E SELEÇÃO DE COMPONENTES	88
3.4.2	ROTAÇÃO DOS COMPONENTES	92
3.4.3	ANÁLISE TÊMPORO-ESPACIAL DE COMPONENTES PRINCIPAIS	96
3.4.4	ADAPTAÇÃO E ESPECIFICIDADE AO ESTÍMULO NA PCA TÊMPORO-ESPACIAL	100
3.5	DISCUSSÃO: DECOMPONDO O COMPLEXO N1-P2 PELA PCA TÊMPORO-ESPACIAL	104
4	ESTUDO II - RESPOSTAS EVOCADAS DE INCONGRUÊNCIA E CATEGORIZAÇÃO DE VOGAIS	108
4.1	MÉTODOS	109
4.1.1	PARTICIPANTES	109
4.1.2	ESTÍMULOS	109
4.1.3	PROCEDIMENTOS	109
4.2	RESULTADOS	114
4.2.1	TAREFAS DE CLASSIFICAÇÃO	114
4.2.2	RESPOSTAS EM FZ COM REFERÊNCIA EM TP9/TP10	115
4.2.3	RESPOSTAS COM REFERÊNCIA EM NZ	119
4.3	DISCUSSÃO	123
5	DISCUSSÃO GERAL	126
6	CONCLUSÃO	131
	REFERÊNCIAS	132

1 INTRODUÇÃO

A percepção da fala depende da capacidade de estabelecer um mapeamento entre o fluxo sonoro produzido pelo falante e as unidades linguísticas que compõem a mensagem, tais como palavras, morfemas, sílabas e fonemas¹. A grande variabilidade nas realizações acústicas dessas unidades linguísticas tornam necessárias operações de categorização, ou seja, o agrupamento de sons diferentes em categorias dentro das quais os mesmos são tratados como funcionalmente equivalentes. Os sons identificados como exemplares de um segmento fonético qualquer, como [u], por exemplo, variam com uma série de fatores, como a taxa de elocução, o dialeto, características do trato vocal do falante, contextos fonológicos e prosódicos. O reconhecimento desse segmento envolve essencialmente a capacidade de mapear inúmeros sons, produzidos por falantes diversos, em contextos linguísticos e extralinguísticos diversos, nos mais variados ambientes acústicos, a uma mesma unidade armazenada na memória – no caso, a categoria correspondente à vogal [u].

Sobre o modo como as categorias de sons da fala afetam a percepção, estudos comportamentais em que são observadas medidas do desempenho de falantes em tarefas de classificação e discriminação indicam que a discriminabilidade entre esses sons depende não apenas de diferenças acústicas, mas também do modo como eles são categorizados. Sons identificados como pertencentes a uma mesma categoria são, em certas condições, menos discrimináveis entre si que sons classificados em categorias diferentes, ainda que as diferenças acústicas sejam as mesmas. Respostas neurofisiológicas a estímulos sonoros denominadas “respostas evocadas auditivas” são também empregadas neste contexto. Uma das observações de maior importância é a de que, dada certa diferença acústica entre dois sons, seu efeito sobre a resposta eletrofisiológica difere entre condições em que essa diferença estabelece uma distinção entre duas categorias e condições em que isto não ocorre – ou seja, quando os dois sons,

¹ No sentido em que o termo é aqui empregado, “fonemas” são categorias fônicas que, por um lado, agrupam sons cujas diferenças não estabelecem distinções entre itens lexicais e, por outro, opõem-se entre si como unidades fonologicamente funcionais em uma língua. Não há, a princípio, neste trabalho, compromisso com propostas teóricas referentes à natureza do fonema como entidade psicológica, física ou meramente descritiva. Para uma rica apreciação do tema, veja Dresher (2011).

ainda que acusticamente diferentes, são identificados como exemplares de uma mesma categoria. A este respeito, destaca-se a “negatividade de incongruência” (*mismatch negativity*; doravante, MMN)², uma resposta a estímulos desviantes entremeados em sequências de estímulos repetitivos (denominados “estímulos padrão”), cuja magnitude reflete a categorização dos sons da fala.

Neste trabalho, são apresentados resultados de dois estudos que fornecem contribuições relevantes a respeito do emprego das respostas evocadas em investigações da audição e da percepção da fala, tanto no âmbito da pesquisa básica como da pesquisa aplicada à clínica. Obtidas a partir de registros eletroencefalográficos (EEG), como aqui é o caso, essas respostas constituem potenciais evocados auditivos. No Estudo I, foram investigados os componentes N1 e P2 dos potenciais evocados (PEs) em resposta a sons vocálicos identificados como exemplares das categorias /i/ e /e/ do português. No Estudo II, foi investigada a MMN em resposta a sons dessas mesmas categorias. O objetivo principal foi o de verificar variações nas referidas respostas que fossem sistematicamente associadas, por um lado, a distinções entre as duas categorias vocálicas e, por outro, a distinções entre exemplares de uma mesma categoria. As respostas N1, P2 e MMN foram obtidas em condições passivas de estimulação em que a atenção do participante não é dirigida aos estímulos auditivos, de maneira a evitar influências de processos atencionais e decisórios relacionados às demandas de tarefas executadas durante o registro.

As respostas N1 e P2 refletem a atividade de populações de neurônios no córtex cerebral cujo padrão de ativação possivelmente varia em função de propriedades acústicas dos estímulos. Contudo, o estudo dessa atividade cortical específica ao estímulo é dificultado pela baixa razão sinal-ruído das respostas evocadas registradas no escalpo. Em uma tentativa de mitigar tais dificuldades, foi empregado, no Estudo I, um protocolo experimental baseado em efeitos de adaptação neural, ou seja, na diminuição provisória da responsividade dos geradores da resposta quando os mesmos são ativados. Se este efeito de adaptação é específico ao estímulo, isto é, se é mais pronunciado em respostas a estímulos mais semelhantes ao estímulo precedente, então ele pode ser usado no

² Rothe-Neves (2001) propôs a tradução “negatividade de incongruência” para o inglês *mismatch negativity*, mas o termo em inglês é vastamente utilizado, motivo pelo qual utilizaremos também a sigla MMN.

exame das relações entre características dos estímulos e a atividade neural em resposta aos mesmos. A ideia é a de que, dada uma certa população de neurônios, a adaptação decorrente de um padrão de ativação³ **A** resulta em um maior grau de atenuação de um padrão de ativação subsequente **B** quanto maior for a semelhança entre **A** e **B**. Durante o registro do EEG, foram apresentados aos participantes pares de sons sucessivos (S_1S_2) que poderiam ser compostos por dois sons idênticos, dois exemplares diferentes de uma mesma categoria (par intra-categoria) ou sons identificados como pertencentes a categorias diferentes (par inter-categorias). Com base no conhecimento prévio a respeito de N1 e P2 (vide seção 2.4.1), espera-se uma atenuação das respostas a S_2 comparadas às respostas a S_1 . Em caso de adaptação específica ao estímulo, esta atenuação seria mais pronunciada quanto maior a semelhança entre S_1 e S_2 . À exceção dos pares de sons idênticos, a diferença entre S_1 e S_2 em uma escala psicoacústica (denominada Bark) foi a mesma para todos os pares. Portanto, se os sons S_1 e S_2 dos pares inter-categorias são tratados pelos falantes como menos semelhantes entre si do que os sons dos pares intra-categoria, é razoável admitir que isto se deve à categorização perceptiva e não a propriedades acústicas. Deste modo, comparações entre os três tipos de par de sons tornam possível verificar se a distinção entre as categorias /e/ e /i/ ou distinções internas às mesmas se manifestam nos padrões de adaptação de N1 e/ou P2.

A adaptação específica ao estímulo em N1 é apontada como possível processo subjacente à geração da MMN, que derivaria de diferenças de responsividade entre geradores de N1 ativados pelo estímulo padrão e pelo estímulo desviante (JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2004; MAY; TIITINEN, 2004, 2010). Dados os conhecidos efeitos de categorias fônicas sobre a amplitude da MMN (seção 2.4.3), os resultados do Estudo I contribuem ao esclarecimento da relação entre essas duas respostas. Com o fim de observar a MMN em resposta a estímulos comparáveis aos empregados no Estudo I, respostas a vogais das categorias /i/ e /e/ em um protocolo experimental apropriado foram obtidas no Estudo II. Foram comparadas condições em que o estímulo desviante, que elicia a MMN, ocorreu em meio a repetições de um estímulo padrão de uma categoria diferente e condições em que os estímulos

³ Para os presentes propósitos, estes padrões podem ser considerados como distribuições de atividade na população neuronal; a semelhança entre os mesmos pode ser entendida em termos do grau de sobreposição entre estas distribuições.

padrão e desviante pertenciam à mesma categoria. São, desta forma, diferenciados efeitos atribuídos à distinção entre as categorias e efeitos relacionados a variações nos parâmetros acústicos dos estímulos. De acordo com resultados anteriores sobre a MMN, revisados na seção 2.4.3, são esperadas maiores amplitudes da MMN em condições em que a diferença entre os estímulos padrão e desviante estabelece uma distinção entre duas categorias vocálicas. Sob a hipótese de que efeitos de atenuação de N1 em resposta ao segundo som de um par e a MMN são consequências de um mesmo processo de adaptação, espera-se que ambos sejam modulados de maneiras similares pelas diferenças entre os estímulos. Neste caso, consideradas as expectativas quanto à MMN, seriam esperados no Estudo I efeitos menores de adaptação de N1 nos pares inter-categoria comparados aos pares intra-categoria, e efeitos menores nestes últimos se comparados aos pares de estímulos idênticos.

Com a investigação aqui descrita, buscou-se expandir o conhecimento sobre propriedades funcionais das respostas observadas e explorar novas possibilidades de uso de medidas derivadas dos PEs auditivos de longa latência como indicadores do funcionamento do sistema auditivo, sobretudo no que se refere à organização sonora da linguagem. A verificação de efeitos de adaptação específica ao estímulo no complexo N1-P2, e modulações destes efeitos associadas a distinções entre categorias sonoras, estabeleceria um novo paradigma experimental para o estudo e avaliação da discriminação e categorização de sons. Este permitiria a elaboração de protocolos de estimulação em que números maiores de distinções entre sons pudessem ser testadas em intervalos menores de tempo – em comparação com os protocolos adequados à aquisição da MMN, que exigem várias repetições do estímulo padrão para cada apresentação do desviante – e de maneira independente de possíveis mecanismos manifestos exclusivamente na MMN.

Este texto é dividido em seis capítulos, incluindo esta introdução. No *Capítulo 2*, são apresentadas revisões da literatura sobre a percepção dos sons da fala, sobre aspectos biológicos da audição relevantes à presente investigação e sobre os componentes das respostas evocadas aqui empregados. O Estudo I, sobre efeitos de adaptação e especificidade ao estímulo no complexo N1-P2, é apresentado no *Capítulo 3*. Os dados são examinados a partir de duas abordagens alternativas de análise, uma baseada em métodos mais tradicionais de medida de amplitude de respostas evocadas e uma realizada a partir de uma técnica multivariada

denominada *Análise de Componentes Principais*. Os resultados das duas análises são apresentados e discutidos em seções separadas. O *Capítulo 4* é dedicado ao Estudo II, sobre a MMN em resposta a vogais das categorias /i/ e /e/. Os resultados dos dois estudos são apreciados e discutidos de maneira integrada no *Capítulo 5*, que é seguido pela conclusão (*Capítulo 6*).

2 PERCEPÇÃO DOS SONS DA FALA E PROCESSAMENTO AUDITIVO

2.1 PERCEPÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DOS SONS DA FALA

Uma capacidade cognitiva fundamental é a de agrupar diferentes objetos ou eventos apresentados aos sentidos em classes de equivalência, isto é, tratar diferentes padrões de estimulação como funcionalmente equivalentes com base nas características que os membros de uma mesma classe compartilham. A abstração de categorias a partir da variabilidade presente na estimulação está na base de processos como os de reconhecimento de objetos, inferências e antecipação de eventos. Todos estes atos implicam em tratar coisas diferentes em níveis mais concretos como equivalentes em níveis mais abstratos. De maneira geral, esta categorização envolve operações de comparação e correspondência entre a entrada sensorial e informações armazenadas na memória.

No que se refere à linguagem e, mais especificamente, à percepção dos sons da fala, sons ou sequências de sons consideravelmente diferentes do ponto de vista acústico devem ser identificados como exemplares de um mesmo fonema, sílaba, palavra ou alguma outra unidade linguística. O sinal da fala é caracterizado por grande variabilidade, cujas fontes são diversas, como os contextos articulatório e fonológico, a taxa de elocução, níveis e tipos de ruído no ambiente e fatores específicos ao falante como gênero, tamanho, estado emocional e dialeto. Deste modo, são bastante variáveis as realizações acústicas de qualquer unidade linguística. O ouvinte deve ser capaz de abstrair a informação que lhe permite identificá-la. No caso das categorias de segmentos fonéticos como vogais e consoantes, sua aquisição se inicia no primeiro ano de vida, bem antes da aquisição do vocabulário, operando a partir da extração de padrões estatísticos nos sons da fala que compõem o ambiente sonoro (KUHL *et al.*, 2006, 2008; WERKER; TEES, 2005). Com a aquisição do vocabulário e a formação do léxico, representações mais abstratas podem se desenvolver a partir da estrutura fonológica da língua (BOERSMA; ESCUDERO; HAYES, 2003).

Qualquer classe ou categoria se define em termos de propriedades compartilhadas por todos os seus membros e não por não-membros, de modo que se possa traçar limites que separem uma dada categoria de outras. Na psicologia experimental, as investigações acerca dos sons da fala e do modo como são categorizados são realizadas tanto de uma perspectiva em que se enfatiza o limite

que separa (e define) duas categorias quanto da perspectiva complementar, em que o foco é colocado sobre o conteúdo interno de cada categoria.

No caso da primeira perspectiva, procura-se observar a relação entre a discriminabilidade entre os sons e a forma como os mesmos são categorizados. O que se verifica, de maneira geral, é que o desempenho em tarefas de discriminação é melhor quando os estímulos são identificados como pertencentes a categorias diferentes (veja, por exemplo, LIBERMAN *et al.*, 1957; REPP, 1984; SCHOUTEN; VAN HESSEN, 1992). Trata-se do *efeito do limite de categoria*, que sugere um componente categórico na percepção. Em seu estudo seminal, Liberman *et al.* (1957) geraram um conjunto de sílabas sintetizadas ao longo de um *continuum* que se inicia em [be], passa por [de] e termina em [ge], variando em passos iguais o valor de certo parâmetro acústico – a saber, a frequência inicial da transição do segundo formante. Em uma tarefa de classificação, os estímulos foram classificados pelos participantes em três categorias bem definidas. Na tarefa de discriminação, os participantes distinguiram com relativa facilidade estímulos identificados como pertencentes a categorias diferentes, mas apresentaram um desempenho bem inferior na discriminação de estímulos classificados em uma mesma categoria. Estes resultados foram interpretados como evidências de “percepção categórica”, isto é, de que dois estímulos são discrimináveis entre si na medida em que compõem categorias diferentes (STUDDERT-KENNEDY *et al.*, 1970). Entretanto, como o desempenho nas tarefas de discriminação excede sistematicamente o que se poderia prever a partir de tarefas de classificação (indicando que há discriminabilidade *intra-categórica*), desenvolvimentos posteriores (VAN HESSEN; SCHOUTEN, 1999) possibilitaram a determinação de graus de percepção categórica a partir da quantificação da relação entre os resultados das tarefas de classificação e discriminação. Isto foi proposto com base na ideia de que estão envolvidos na discriminação de sons da fala um modo estritamente categórico, que opera a classificação fonética/fonológica por meio de representações armazenadas na memória, e um modo “psicoacústico”, representando processos gerais da percepção auditiva – quando os estímulos a serem discriminados são classificados de forma idêntica, recorre-se à informação psicoacústica (FUJISAKI, 1979; PISONI, 1973; PISONI; TASH, 1974; SCHOUTEN; VAN HESSEN, 1992; VAN HESSEN; SCHOUTEN, 1992).

Já na perspectiva em que a ênfase está colocada não nos limites entre as categorias, mas em seu conteúdo, verifica-se nas mesmas uma organização interna em torno de um protótipo. Entre estímulos mais prototípicos, isto é, aqueles percebidos como mais próximos de um exemplar ideal para uma dada categoria, a discriminabilidade é reduzida (FELDMAN; GRIFFITHS; MORGAN, 2009; KUHL, 1991). Isto equivale a dizer que a diferença percebida entre dois exemplares dentro de uma categoria, separados por uma certa diferença acústica, será menor quanto mais próximos forem estes exemplares do protótipo, que atua, deste modo, como um “*ímã perceptivo*”. Note que, se assumimos que exemplares mais prototípicos são mais centrais ou, equivalentemente, mais distantes do limite da categoria, o *efeito do ímã perceptivo* implica em maior discriminabilidade inter- do que intra-categoria (padrão que define o *efeito de limite de categoria*).

Em se tratando, contudo, de dados comportamentais referentes ao desempenho em certas tarefas, os resultados refletem não apenas os processos perceptivos de interesse, mas também aqueles que se interpõem entre esses processos e a resposta, como os relacionados a operações de decisão. O efeito do limite de categoria, por exemplo, poderia ser explicado por um processo categórico de decisão sobre informação perceptiva contínua – isto é, não-categórica (MASSARO, 1987). Sabe-se, de fato, que este efeito depende da tarefa de discriminação, ocorrendo quando esta força o participante a se basear em categorias, e desaparecendo quando a resposta pode mais facilmente ser dada com base na informação acústica sobre o timbre (GERRITS; SCHOUTEN, 2004; SCHOUTEN; GERRITS; VAN HESSEN, 2003; SILVA; ROTHE-NEVES, 2009). É, deste modo, de interesse que os resultados obtidos com este tipo de abordagem sejam complementados por medidas da atividade cerebral como os PEs auditivos.

2.2 PISTAS ACÚSTICAS PARA A PERCEPÇÃO DE SEGMENTOS FÔNICOS: O CASO DAS VOGAIS

O sinal da fala pode ser considerado como resultado da geração de uma ou mais fontes de energia sonora e da aplicação, sobre as mesmas, de um filtro que representa propriedades de ressonância do trato vocal (DIEHL, 2008; STEVENS, 1998). As fontes ocorrem nas proximidades de constrições no trato vocal e consistem em modulações de fluxo de ar que geram energia audível. No processo denominado vozeamento, uma fonte quase-periódica é gerada pelos movimentos

vibratórios das pregas vogais, cuja taxa de repetição determina a frequência fundamental (F_0) do som resultante – percebida como altura melódica (*pitch*). Entre os sons cuja produção envolve este tipo de fonte estão as vogais e consoantes como as nasais ([m] e [n], por exemplo), líquidas (como [l] e [r]), aproximantes (como [j] e [w]) e outras consoantes vozeadas, como [z]. Fontes aperiódicas podem ser geradas por mudanças abruptas de pressão na cavidade oral (fontes transientes, como em [p] e [t]) ou por fluxos turbulentos de ar causados por constrições estreitas supralaríngeas (fricção, como em [f] e [z]) ou na glote (aspiração, como em [h]).

A fonte sonora excita o trato vogal que, por sua vez, age como um filtro alterando o espectro de frequências da fonte. Movimentos articulatorios realizados pelo falante alteram a forma do trato vocal e, conseqüentemente, as características do filtro. As frequências de ressonância (frequências naturais de vibração) do volume de ar no trato vocal são determinadas pelo tamanho e forma do volume e por propriedades físicas das superfícies do trato (DIEHL, 2008; STEVENS, 1998). Exposto à energia produzida pela fonte, este volume de ar responde mais fortemente às frequências próximas às frequências de ressonância, o que define a função de transferência do filtro – isto é, a função que descreve a transformação que o filtro opera sobre sua entrada. A função de transferência do trato vocal apresenta, desta forma, picos em torno das frequências de ressonância; a realização acústica de cada um destes picos é denominada “formante”. Cada formante é caracterizado por sua frequência central, largura de banda e amplitude relativa.

Os parâmetros mais importantes na descrição das vogais são as frequências centrais dos três ou quatro primeiros formantes – aqui designadas como F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , em ordem crescente de frequências (DIEHL, 2008; STEVENS, 1998). No que concerne à percepção, F_1 e F_2 são consideradas como as pistas primárias para a identificação de vogais (DELATTRE *et al.*, 1952; JOHNSON, 2005; RAPHAEL, 2005). O valor de F_1 é associado à altura da vogal, determinada pela posição vertical do corpo da língua. Vogais altas (ou fechadas), como [i] e [u] são produzidas com o corpo da língua elevado, o que torna os valores de F_1 baixos. As vogais baixas (ou abertas), como [æ], [a] e [ɑ], produzidas com um abaixamento do corpo da língua, se caracterizam por valores altos de F_1 . Valores intermediários de F_1 , entre os extremos associados às vogais altas e baixas, são obtidos nas vogais médias (por exemplo, [e], [o], [ɛ] e [ɔ]) por meio de posicionamentos intermediários do corpo da língua no eixo vertical. F_2 é associado à posição do corpo da língua no eixo anteroposterior.

Vogais anteriores (como [i] e [æ]), centrais (como [a] e [ɨ]) e recuadas (como [u] e [ɑ]) se caracterizam, respectivamente, por valores altos, intermediários e baixos de F_2 . O valor máximo de F_2 , característico das anteriores, é maior nas vogais altas que nas baixas. Além do posicionamento do corpo da língua nos eixos vertical e anteroposterior, distinções entre vogais podem ser estabelecidas a partir de outros ajustes na forma do trato vocal, tais como o arredondamento dos lábios, a retração da raiz da língua ou o abaixamento do véu palatino (LADEFOGED; MADDIESON, 1999; STEVENS, 1998).

No sistema vocálico do português são estabelecidas distinções entre sete categorias: duas vogais altas, quais sejam, /i/ e /u/, duas médias-altas, /e/ e /o/, duas médias-baixas, /ɛ/ e /ɔ/, e uma baixa, /a/. Entre as não-baixas, se estabelece a distinção entre anteriores, /i; e; ɛ/, e recuadas /u; o; ɔ/. De acordo com uma tendência geral entre as línguas (LADEFOGED; MADDIESON, 1999), as recuadas do português são produzidas com arredondamento dos lábios. Tendo como uma de suas consequências acústicas um decréscimo em F_2 , este arredondamento acentua o contraste entre as recuadas (arredondadas) e as anteriores (STEVENS, 1998). As distinções entre as médias-altas e as médias-baixas envolvem diferenças na altura do corpo e também de retração da raiz da língua (STEVENS, 1998) – as médias-baixas são produzidas com a raiz da língua mais retraída em comparação às médias-altas e às altas. O principal correlato acústico desta distinção é a diferença em F_1 – mais baixo nas médias-altas.

As frequências F_1 e F_2 variam sistematicamente não apenas com a qualidade ou identidade da vogal, mas também com diferenças entre falantes na anatomia do trato vocal e em hábitos articulatórios (JOHNSON, 2005). Disto resulta uma considerável variabilidade entre possíveis realizações de uma mesma categoria vocálica. Os valores de F_0 e F_3 são considerados relevantes à capacidade do ouvinte em efetuar uma normalização que lhe possibilita a correta identificação das vogais apesar da grande variabilidade nos padrões formânticos (JOHNSON, 2005; RAPHAEL, 2005; SYRDAL; GOPAL, 1986).

2.3 VIAS NEURAS DE PROCESSAMENTO AUDITIVO

Esta seção é dedicada a uma breve descrição das principais vias subcorticais e corticais de processamento de informação sensorial no sistema auditivo. O objetivo é apresentar aspectos deste sistema que assumem particular importância

para o estudo da percepção dos sons da fala e para a interpretação das respostas evocadas auditivas, assunto tratado nas próximas seções.

2.3.1 DA CÓCLEA AO CÓRTEX AUDITIVO

O processo de transdução das ondas sonoras em atividade neural ocorre na cóclea, a parte auditiva da orelha interna. Além desta função de transdução, são desempenhadas nesta estrutura uma análise espectral dos sons, em que estes são decompostos em bandas estreitas de frequência, e uma compressão das amplitudes que possibilita a imensa faixa de intensidades característica da audição normal (MØLLER, 2006). No interior da cóclea, o órgão de Corti, que contém as células receptoras responsáveis pela transdução (denominadas células ciliadas internas), é localizado na superfície da membrana basilar. O som causa o movimento do fluido coclear, que, por sua vez, coloca a membrana basilar em movimento. Isto desencadeia uma série de processos que culmina em mudanças no potencial intracelular das células ciliadas e na geração de potenciais de ação em fibras do nervo auditivo.

A espessura e a rigidez da membrana basilar variam ao longo de sua extensão, da base ao ápice. Em razão desta variação (e também de propriedades mecânicas de certas estruturas que compõem o órgão de Corti), cada região da membrana basilar é sintonizada a uma faixa de frequência. A base, mais fina e rígida, responde maximamente às frequências audíveis mais altas; à medida em que se aproxima do ápice, a membrana se torna mais responsiva a frequências mais baixas. Isto torna a cóclea um analisador de frequências e estabelece um dos mais importantes princípios de organização do sistema auditivo, qual seja, a tonotopia: o mapeamento topográfico das frequências, de modo que regiões vizinhas representem frequências próximas. A organização tonotópica é observada, ao longo das vias neurais, do nervo auditivo ao córtex auditivo (EGGERMONT, 2001; MØLLER, 2006).

A maior parte das fibras aferentes do nervo auditivo se conecta, cada uma, a uma única célula ciliada interna e, desta forma, a tonotopia é mantida. Esta, contudo, não é a única fonte de informação sobre as frequências no nervo auditivo, uma vez que as respostas das fibras que o compõem são sincronizadas em fase com as frequências componentes dos sons. Isto torna possível uma codificação temporal das frequências, o que parece ter importantes implicações para a percepção dos

sons da fala (DIEHL, 2008; YOUNG, 2008) e, possivelmente, para o estabelecimento dos inventários de categorias fônicas empregadas nas línguas (DIEHL, 2008). Particularmente, esta representação “dupla” (topográfica e temporal) proporciona ganhos em termos da discriminabilidade de picos espectrais (como os formantes), sobretudo na presença de ruído (YOUNG, 2008).

Cada fibra aferente do nervo auditivo se bifurca duas vezes e estabelece conexões nas três principais subdivisões (dorsal, póstero-ventral e ântero-ventral) do núcleo coclear – a primeira estação auditiva central, localizada no tronco encefálico. O núcleo coclear é composto por vários subsistemas paralelos, cujas funções incluem o aperfeiçoamento da representação do espectro do som e a distribuição e transmissão de informação em diversas vias para outros centros auditivos (EGGERMONT, 2001; YOUNG, 2008). De acordo com Eggermont (2001), as saídas do núcleo coclear podem ser divididas em dois grupos principais de vias ascendentes. Em um deles, informações importantes para a localização dos sons no espaço são transmitidas aos complexos olivares superiores ipsi- e contralateral e, dali, para o colículo inferior no mesencéfalo. No outro grupo, vias mais relacionadas à transmissão e processamento de informações relevantes à identificação dos sons são constituídas por projeções ascendentes diretas e indiretas do núcleo coclear para o colículo inferior (predominantemente o contralateral).

O colículo inferior é o centro de convergência das vias ascendentes originadas no núcleo coclear. Entre as funções atribuídas ao colículo inferior destacam-se a integração de informações provenientes das diversas vias paralelas aferentes, a integração entre canais específicos a frequências (segregados pela organização tonotópica), a geração de um mapeamento do espaço auditivo, o estabelecimento e/ou refinamento de seletividades a características temporais dos sons – como duração, modulação em frequência e modulação em amplitude – e a função de interface entre as vias auditivas de nível mais baixo, o córtex auditivo e sistemas motores (CASSEDAY; FREMOUW; COVEY, 2002; EGGERMONT, 2001; MALMIERCA, 2004). O principal destino das projeções ascendentes do colículo inferior é o núcleo geniculado medial, um componente do tálamo, que envia projeções ao córtex auditivo. Nas chamadas “vias clássicas”, ou “tonotópicas”, o núcleo central do colículo inferior, caracterizado por sua organização tonotópica e por receber aferências de quase todas as vias auditivas de nível mais baixo, envia projeções à porção ventral do corpo geniculado medial que, por sua vez, se conecta

ao córtex auditivo primário (HACKETT, 2011; LEE; SHERMAN, 2011; MØLLER, 2006). Nas “vias difusas”, ou “não tonotópicas”, as subdivisões medial e dorsal do corpo geniculado medial recebem aferências oriundas dos núcleos lateral e dorsal do colículo inferior e enviam projeções a áreas não primárias e primárias do córtex auditivo (HACKETT, 2011; LEE; SHERMAN, 2011; MØLLER, 2006).

É incorreto conceber, a partir desta breve e bastante simplificada descrição das vias aferentes entre a cóclea e o córtex, o sistema auditivo como um sistema de aferências em que o fluxo de informação é predominantemente ascendente. Projeções eferentes entre diversas estações das vias auditivas o tornam mais adequadamente descrito como “um sistema reentrante caracterizado por alças regionais de retroalimentação interconectadas” (EGGERMONT, 2001, p. 17). Uma destas alças de retroalimentação é estabelecida já entre a cóclea e o complexo olivar superior (MØLLER, 2006). Outros exemplos são o sistema tálamo-cortical (em que eferências córtico-talâmicas são particularmente abundantes), alças de retroalimentação que se estabelecem entre este mesmo sistema e o colículo inferior (que recebe entradas provenientes tanto do tálamo como do córtex) e entre o colículo inferior e os núcleos de nível mais baixo do tronco encefálico (EGGERMONT, 2001; MØLLER, 2006).

Outro ponto não contemplado na descrição acima diz respeito aos diferentes tipos de conexões que compõem as vias. Há conexões inibitórias e excitatórias, transmissoras e modulatórias, com diferentes tipos de neurotransmissores e receptores. Por exemplo, considerando apenas as vias glutamatérgicas entre o colículo inferior e o córtex auditivo, Lee e Sherman (2011) classificam-nas como transmissoras (*driver pathways*; especializadas na transmissão da informação) ou moduladoras (especializadas na modulação dessa transmissão). Os autores propõem um modelo do fluxo da informação auditiva em rotas que envolvem subdivisões do mesencéfalo e do tálamo e as camadas do córtex auditivo em áreas primárias e secundárias. O modelo inclui uma via transmissora ascendente em que a informação flui do núcleo central do colículo inferior para a porção ventral do corpo geniculado medial e então para a camada IV do córtex auditivo primário. A partir da camada V deste, projeções são enviadas para o córtex auditivo secundário (camadas II/III) e para o corpo geniculado medial dorsal que, por sua vez, envia aferências ao córtex auditivo secundário (camada IV). As vias modulatórias incluem projeções do córtex auditivo secundário (camada VI) e do núcleo dorsal do colículo

inferior para o corpo geniculado medial dorsal. Vale notar que, de acordo com o modelo, esta subdivisão do tálamo sucede o córtex auditivo primário no fluxo informacional estabelecido pela via transmissora e que as aferências que recebe do colículo inferior não correspondem a uma via paralela de transferência de informação, mas cumprem um papel de modulação.

Nos primatas, o córtex auditivo é descrito como organizado em três níveis hierárquicos: um “cerne” (*core*), que abrange três áreas classificadas como primárias (A1, R e RT); um “cinturão”, formado por cerca de oito áreas em torno do cerne e densamente interconectadas com o mesmo; um “para-cinturão”, formado por duas áreas adjacentes e densamente interconectadas com o cinturão (HACKETT, 2008, 2011; HACKETT *et al.*, 2014; KAAS; HACKETT, 2000). As áreas do para-cinturão se conectam a regiões adjacentes dos lobos temporal e parietal e a áreas frontais e pré-frontais. Gradientes tonotópicos são observados em pelo menos duas das três áreas do cerne e algumas áreas do cinturão. O cerne e o cinturão são localizados no plano supratemporal (no assoalho da fissura de Sylvius), sendo que o segundo se estende lateralmente ocupando parte da superfície adjacente do aspecto lateral do giro temporal superior, no qual se encontra também o para-cinturão. Todas essas áreas recebem aferências do corpo geniculado medial, predominantemente da subdivisão ventral, no caso do cerne, e das subdivisões dorsal e medial, nos casos do cinturão e do para-cinturão. Intrincados padrões de conexões anterógradas (*feedforward*), retrógradas (*feedback*) e laterais entre as diversas áreas do córtex auditivo estabelecem fluxos paralelos e seriais de processamento de informação (HACKETT, 2011).

As evidências sobre as quais este esquema é baseado foram obtidas em estudos anatômicos de macacos, mas tentativas recentes de acomodá-lo a um modelo do córtex auditivo humano são encontradas em Baumann, Petkov e Griffiths (2013) e Moerel, De Martino e Formisano (2014). A entidade no cérebro humano a que o termo “córtex auditivo” se refere varia na literatura. Definindo-o como o conjunto de áreas que recebem quantidades significativas de aferências talâmicas de uma ou mais subdivisões do corpo geniculado medial, Hackett (2008, 2011) sugere que o córtex auditivo ocupa o giro temporal transversal de Heschl e o *Planum Temporale*, na porção posterior do plano supratemporal, e parte do giro temporal superior (embora admita a falta de conhecimento sobre as projeções do corpo geniculado medial em humanos). Moerel, De Martino e Formisano (2014) incluem o

Planum Polare, que se estende sobre o plano supratemporal anterior ao giro de Heschl. Que ao menos parte do córtex auditivo primário humano esteja localizada no giro de Heschl não é ponto de debate. Há discordâncias quanto à proporção deste giro ocupada pelas áreas primárias e sobre se estas estão confinadas àquele. A proposta de que o córtex auditivo primário ocupa a porção pósteromedial do giro de Heschl (HACKETT, 2008) recebe apoio em estudos de registros eletrofisiológicos intracranianos (LIÉGEOIS-CHAUVEL *et al.*, 1994; LIÉGEOIS-CHAUVEL; MUSOLINO; CHAUVEL, 1991; NOURSKI *et al.*, 2014). Estes estudos indicam que as primeiras respostas do córtex auditivo à estimulação sonora ocorrem com latências menores que 20 ms (possivelmente, de cerca de 10 ms), no giro e no sulco de Heschl pósteromedial.

2.3.2 PROCESSAMENTO AUDITIVO NO CÓRTEX CEREBRAL

Normalmente, as ondas sonoras que estimulam a superfície receptora auditiva na cóclea resultam dos efeitos combinados de várias fontes de som sobrepostas entre si nos domínios do tempo e das frequências. Ademais, eventos sonoros que devem ser tratados como equivalentes ou de alguma forma agrupados em uma mesma classe variam consideravelmente em suas características acústicas. Portanto, o sistema auditivo deve ser capaz de operar, sobre a entrada sensorial, a segregação entre sinais correspondentes a diferentes fontes, o agrupamento de características atribuídas a cada fonte detectada e a categorização dos sons necessária ao reconhecimento de “objetos auditivos”⁴ e atributos dos mesmos. Uma mesma vogal pronunciada por alguém em uma festa, por exemplo, encontra-se misturada a uma grande variedade de outros sons e contém informações sobre seu valor linguístico, sua altura melódica (*pitch*), a voz do falante e sua localização. Um som identificado como a mesma vogal pode ser pronunciado por outra pessoa, em uma palavra diferente, a uma altura diferente. De maneira similar, uma mesma altura melódica pode ser reconhecida em diferentes vogais (ou outros sons), vozes e localizações. Funções relacionadas à formação de objetos auditivos e à identificação de atributos (como altura, volume e localização) dos mesmos são atribuídas ao córtex auditivo (KING; NELKEN, 2009; MCLACHLAN; WILSON, 2010; NELKEN, 2008; NELKEN *et al.*, 2003).

⁴ Padrões espectro-temporais com relevância comportamental atribuíveis a fontes sonoras específicas.

Em uma comparação com o sistema visual, Nelken e colaboradores (KING; NELKEN, 2009; NELKEN, 2008; NELKEN *et al.*, 2003) sugerem que o córtex auditivo primário não ocupa um nível análogo ao do córtex visual primário. Esse nível seria ocupado pelo colículo inferior – centro de integração entre as vias auditivas paralelas do tronco encefálico caracterizado por seletividades a várias propriedades físicas dos sons. Estes autores destacam, a respeito do córtex auditivo primário, complexos padrões de seletividade, que parecem mais relacionados à identidade dos estímulos do que a propriedades físicas particulares, e respostas altamente dependentes do contexto e caracterizadas por múltiplas escalas temporais (incluindo modulações muito lentas, se comparadas às observadas em níveis subcorticais). Chechik *et al.* (2006) encontraram evidências de uma queda de redundância das representações de estímulos sonoros entre o colículo inferior e o sistema tálamo-cortical.

Duas vias principais de processamento de informação auditiva são identificadas no córtex: uma via ântero-ventral, associada ao reconhecimento e à identificação de objetos auditivos, e uma via pósterodorsal, cujas funções incluem o processamento de informações relacionadas ao movimento e à localização das fontes sonoras (RAUSCHECKER; TIAN, 2000). É estabelecida, deste modo, uma dissociação entre um fluxo de processamento de informações sobre “o que” e um sobre “onde”. A via ântero-ventral se origina em áreas anteriores e laterais do cinturão auditivo e é formada por projeções para áreas anteriores do lobo temporal superior e daí para áreas frontais e pré-frontais ventrais (no macaco, o córtex pré-frontal ventrolateral). Na via pósterodorsal, áreas posteriores do cinturão e do paracinturão auditivo enviam projeções diretas e indiretas, passando pelo córtex parietal inferior, a áreas frontais e pré-frontais (no macaco, o córtex pré-frontal dorso-medial). Desenvolvimentos mais recentes (RAUSCHECKER, 2011; RAUSCHECKER; SCOTT, 2009) estendem o papel da via pósterodorsal incluindo o processamento de informações relacionadas ao modo como sons e sequências de sons podem ser produzidos – estabelecendo, assim, a distinção entre a via ântero-ventral do “o que” e a via pósterodorsal do “onde/como”. As funções associadas ao “onde” e ao “como” seriam subordinadas a uma função mais geral de integração e controle sensório-motor desempenhada pela via pósterodorsal (RAUSCHECKER, 2011; RAUSCHECKER; SCOTT, 2009).

No que se refere à percepção e compreensão da fala, diferentes modelos anátomo-funcionais (HICKOK; POEPEL, 2007; RAUSCHECKER; SCOTT, 2009) distinguem uma via ventral e uma via dorsal. De maneira geral, a via ventral envolve mecanismos de reconhecimento de padrões auditivos que possibilitam a categorização de sons e a identificação de unidades linguísticas e de falantes; na via dorsal seriam desempenhadas funções relacionadas à interface entre a percepção e a produção da fala – fundamental à aquisição da fala e ao componente fonológico da memória de trabalho. De acordo com o modelo de Rauschecker e Scott (2009; veja também RAUSCHECKER, 2011), a via ântero-ventral em humanos envolve porções anteriores do córtex auditivo e o córtex frontal inferior, ao passo que a via pósterodorsal se projeta de áreas posteriores do córtex auditivo para regiões parietais inferiores e áreas frontais dorso-laterais, incluindo o córtex pré-motor. Áreas frontais inferiores se conectam a áreas frontais dorso-laterais e ao córtex parietal inferior, fechando o circuito composto pelas duas vias. Rauschecker e Scott (2009) propõem que fluxos opostos de informação neste circuito corresponderiam a um “mapeamento anterógrado” (*forward mapping*) e um “mapeamento inverso”. No primeiro, objetos auditivos identificados na via ântero-ventral são associados a representações motoras de movimentos articulatorios (no córtex frontal inferior e pré-motor) que, por sua vez, ativam modelos internos das consequências sensoriais daqueles movimentos (em áreas parietais inferiores e da porção posterior do córtex auditivo). No mapeamento inverso, a atividade do córtex parietal inferior é influenciada pela informação sensorial oriunda de áreas posteriores do córtex auditivo e exerce influência sobre a seleção de programas motores nas áreas frontais.

Hickok e Poeppel (2007) apresentam um modelo diferente em que operações de análise espectro-temporal dos sons ocorrem no córtex auditivo e processos envolvendo representações mais abstratas de unidades fonológicas na porção posterior do sulco temporal superior. O sistema então diverge em uma via ventral especializada na compreensão da fala, em que representações fonológicas (ou sensoriais) são mapeadas em representações lexicais, e uma via dorsal em que representações fonológicas (ou sensoriais) são mapeadas em representações articulatorias. A via ventral abrange regiões anteriores e posteriores do lobo temporal médio em ambos os hemisférios; a via dorsal, no hemisfério esquerdo, envolve áreas frontais inferiores (incluindo a área de Broca) e dorsais (incluindo o córtex pré-

motor) e a região da junção têmporo-parietal. Os modelos de Rauschecker e Scott e de Hickok e Poeppel contrastam não apenas no que concerne às áreas corticais envolvidas nas duas vias, mas também nos aspectos do processamento enfatizados. No primeiro, Rauschecker e Scott aplicam um modelo de processamento auditivo geral à percepção da fala. Uma ênfase maior em funções linguísticas de ordem superior e representações mais abstratas necessárias à compreensão da língua é encontrada no modelo de Hickok e Poeppel. Deste modo, é possível que os dois modelos se revelem, em algum grau, complementares.

2.4 RESPOSTAS EVOCADAS AUDITIVAS

Respostas de grandes populações de neurônios no encéfalo à estimulação auditiva podem ser medidas no couro cabeludo por eletrodos sensíveis a potenciais elétricos, no caso da *eletroencefalografia*, ou sensores capazes de detectar campos magnéticos, no caso da *magnetoencefalografia*. Trata-se, respectivamente, dos denominados PEs auditivos e campos magnéticos evocados auditivos. Como essas respostas apresentam baixa amplitude se comparadas à atividade elétrica espontânea, sua verificação exige procedimentos de promediação de dezenas a centenas de respostas ao mesmo estímulo.

Se um som é apresentado repetidamente a uma pessoa enquanto seu eletroencefalograma (EEG) é obtido, uma curva representando a média dos trechos de atividade registrada após cada evento sonoro apresentará normalmente declinações com picos por volta de 50, 100 e 200 ms após o início do estímulo, tendo a primeira e a terceira polaridades positivas e a segunda polaridade negativa. São os componentes P1, N1 e P2 da resposta evocada auditiva de longa latência⁵. Respostas com latências mais curtas, embora bem mais tênues, podem ser também medidas, como as que compõem a resposta evocada de latência média (para revisões sobre os potenciais e campos evocados auditivos, veja STEINSCHNEIDER; LIÉGEOIS-CHAUVEL; BRUGGE, 2011; LÜTKENHÖNER; POEPPPEL, 2011; EGGERMONT; PONTON, 2002)

Em meio àquela sequência repetitiva de estímulos, uma pequena parte (10%, por exemplo) dos sons pode ser trocada por outros que difiram dos primeiros em um parâmetro qualquer, de modo que seja obtida uma sequência com um estímulo mais

⁵ O componente P1 é apontado na literatura como o primeiro componente da resposta de longa latência ou como o último da resposta de latência média (STEINSCHNEIDER; LIÉGEOIS-CHAUVEL; BRUGGE, 2011).

frequente, denominado *padrão*, e um mais raro, o *desviante*. Este paradigma experimental, ao qual nos referimos como *oddball*, permite investigar respostas relacionadas à capacidade e ao processo de discriminação entre os estímulos empregados como padrão e desviante. Neste paradigma, se da onda que representa a resposta ao estímulo desviante for subtraída a onda correspondente ao padrão, obtém-se normalmente uma “onda de diferença” caracterizada por uma negatividade de incongruência (*Mismatch Negativity*, doravante MMN) – uma deflexão negativa com pico usualmente entre 150 e 250 ms após o início do desvio, máxima em derivações centrais e frontais, frequentemente com inversão de polaridade nas proximidades da região do processo mastoide (NÄÄTÄNEN *et al.*, 2007). Este componente ocupa uma posição de destaque no âmbito dos estudos psicofisiológicos da percepção da fala, assunto que será abordado mais adiante. Outros componentes podem ser eliciados pelo desviante, como o P3a e, em casos em que esse estímulo é relevante à execução de uma tarefa, o P3b ou o complexo N2b/P3b⁶ (GRIMM; SCHRÖGER, 2005; SNYDER; HILLYARD, 1976; SQUIRES; SQUIRES; HILLYARD, 1975; revisões sobre os componentes P3a e P3b em SOLTANI; KNIGHT, 2000; POLICH, 2007; LINDEN, 2005).

2.4.1 O COMPLEXO N1-P2

A resposta N1 é evocada, com pico em torno dos 100 ms, por mudanças abruptas na estimulação auditiva, como o início de um estímulo sonoro, sua interrupção, ou uma mudança em frequência em um tom puro contínuo, (NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; YAMASHIRO *et al.*, 2011). É considerada não como um evento unitário, mas como resultado de múltiplos processos cerebrais. Com base em extensa revisão da literatura disponível à época sobre registros de EEG, MEG e intracranianos, Näätänen e Picton (1987) propõem três subcomponentes: o “componente 1” se manifestaria nos PEs como uma negatividade máxima a 100 ms pós-estímulo em derivações fronto-centrais, invertida em polaridade em derivações auriculares e na região do mastoide, com geradores que podem ser modelados como dipolos verticalmente orientados (tangencialmente à superfície lateral do crânio) no plano supratemporal; o “componente 2”, também denominado “complexo T”, se manifestaria como uma deflexão positiva em torno dos 100 ms seguida de

⁶ Usa-se aqui o termo “N2b” para distinguir a deflexão negativa em questão da MMN, que é por vezes denominada “N2a” (cf. NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; SCHRÖGER, 1998).

uma negativa a cerca de 150 ms em derivações temporais, possivelmente com geradores no giro temporal superior; o “componente 3” ocorre como uma negatividade com topografia difusa, posterior em relação à do “componente 1”, máxima no vértice, com latência de pico de aproximadamente 100 ms. O “componente 3” se diferenciaria do “componente 1” no modo como é afetado pelo intervalo entre estímulos e por ocorrer em registros de EEG, mas não de MEG (HARI *et al.*, 1982).

Geradores de N1 e de seu correspondente magnetoencefalográfico⁷ N1m foram consistentemente localizados no plano supratemporal (eeg: IYER; DÍAZ; ZOURIDAKIS, 2012; PICTON *et al.*, 1999; SCHERG; VON CRAMON, 1985; meg: AHVENINEN *et al.*, 2006; GODEY *et al.*, 2001; JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2004; LÜTKENHÖNER; STEINSTRÄTER, 1998; ZOURIDAKIS; SIMOS; PAPANICOLAOU, 1998; PANTEV *et al.*, 1995). Sugere-se ainda, com base em dados de EEG, a participação de geradores frontais (ATCHERSON *et al.*, 2006; GIARD *et al.*, 1994; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; PICTON *et al.*, 1999; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011), possivelmente associados ao “componente 3”. Contudo, a localização dos geradores dos potenciais e campos evocados é dificultada pela limitada resolução espacial das técnicas de EEG e MEG (LÜTKENHÖNER; POEPEL, 2011; STEINSCHNEIDER; LIÉGEOIS-CHAUVEL; BRUGGE, 2011). Neste aspecto, a última apresenta alguma vantagem sobre a eletroencefalografia, especialmente pelo fato de que os tecidos entre o córtex e os detectores são praticamente transparentes para campos magnéticos. Isto, entretanto, não anula a necessidade de que os resultados de localização de geradores de campos magnéticos evocados sejam também avaliados com reserva e à luz de evidências obtidas por meio de técnicas superiores em resolução espacial, especialmente quando o componente de interesse é gerado em mais de uma área, caso em que há maior suscetibilidade a erros (LÜTKENHÖNER; POEPEL, 2011). Em alguns estudos, como os de Jääskeläinen *et al.* (2004) e Ahveninen *et al.* (2006), citados acima, essas limitações são mitigadas pela ponderação dos dados de localização dos campos evocados por dados de ressonância magnética funcional. Em ambos,

⁷ Uma das formas de designar as respostas evocadas magnéticas é adicionar a letra “m” ao componente dos PEs correspondente, como, por exemplo, “N1m”, “P2m”, “MMNm”. O termo sem o “m” é usado tanto para designar o componente elétrico como para fazer referência às respostas evocadas sem especificar o tipo de registro (EEG ou MEG).

foram localizadas duas fontes supratemporais: uma mais posterior, seguida em cerca de 30 ms por uma mais anterior (em consonância com SAMS *et al.*, 1993; MCEVOY; LEVÄNEN; LOVELESS, 1997).

Procedimentos invasivos em que eletrodos são implantados sobre a superfície cerebral de candidatos a neurocirurgia ou de pacientes no intraoperatório são oportunidades ímpares de se obter registros de respostas diretamente na superfície do córtex. Contribuições valiosas a respeito da localização dos geradores de N1 foram dadas em estudos que empregaram este tipo de técnica. Por meio de eletrodos de profundidade com múltiplos contatos, Liégeois-Chauvel (1994) registraram a atividade neuroelétrica em regiões do plano supratemporal, incluindo o *planum temporale* e o giro de Heschl, em resposta a tons simples. Foi observada uma série de deflexões positivas e negativas, a primeira com pico a cerca de 13 ms a partir do início do estímulo, localizada no giro de Heschl pósteromedial (veja também LIÉGEOIS-CHAUVEL; MUSOLINO; CHAUVEL, 1991). Presumivelmente relacionados ao N1 obtido por EEG de escalpo, foram verificados um componente entre 60 e 75 ms e outro a cerca de 100 ms, com localizações mais prováveis no giro de Heschl pósterolateral e no *planum temporale*, respectivamente. Em estudos posteriores, componentes intracranianos com latências no intervalo correspondente ao N1 foram também localizados no giro de Heschl pósteromedial e na porção pósterolateral do giro temporal superior (BRUGGE *et al.*, 2008; HOWARD *et al.*, 2000). Godey *et al.* (2001) combinaram registros intracranianos e MEG e observaram atividade relacionada a N1 entre 60 e 150 ms em áreas intermediárias (em relação à dimensão médio-lateral) do giro de Heschl e no *planum temporale*. Usando um método de localização mais sofisticado, denominado MCE (*Minimum Current Estimate*), aplicado a dados obtidos por meio de eletrodos com contatos em regiões supratemporais, Yvert *et al.* (2005) verificaram respostas iniciais na porção pósteromedial do giro e sulco de Heschl entre 16 e 19 ms após o início de um tom puro seguidas de uma propagação da atividade na direção médio-lateral, do giro de Heschl pósteromedial ao *planum temporale* e ao aspecto lateral do giro temporal superior entre 20 e 25 ms. Entre 55 e 100 ms foi observado um padrão espaço-temporal bem semelhante ao último. Deste modo, durante a janela temporal de ocorrência do componente N1, parece ocorrer um segundo ciclo de propagação médio-lateral a partir da região do limite medial do giro de Heschl.

Restrições éticas à aplicação do EEG intracraniano estabelecem limitações importantes. O número e o posicionamento dos eletrodos e, conseqüentemente, a área coberta do córtex, devem obedecer apenas a critérios clínicos. Nos estudos mencionados acima, as áreas de registro se limitam à região do córtex auditivo e proximidades. Estudos em que haviam eletrodos posicionados em outras áreas (BOUTROS *et al.*, 2011; SINAI *et al.*, 2009) indicam a participação de geradores adicionais de N1 nos lobos temporal anterior e médio, frontal superior e inferior, parietal médio e inferior e pré-frontal – embora não esteja claro o grau de uma possível contribuição de campos elétricos originados no córtex auditivo e transmitidos por condução volumétrica, especialmente no caso de áreas mais próximas como o lobo parietal inferior.

Os resultados obtidos a partir de MEG, EEG de superfície e EEG intracraniano indicam, portanto, que a resposta N1 é resultado da atividade de populações neuronais em diversas áreas, sendo as principais fontes localizadas no córtex auditivo, destacando-se o giro de Heschl, o *planum temporale* e o giro temporal superior póstero-lateral. Estudos de EEG de escalpo e intracranianos concordam também ao apontarem geradores frontais.

Uma propriedade importante de N1 é sua sensibilidade à repetição de estímulos, atestada por um rápido decréscimo em amplitude à medida em que um som é apresentado repetidamente, o que indica um processo de adaptação neural em que a estimulação gera um período de refratariedade dos geradores deste componente (BUDD *et al.*, 1998; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; RITTER; VAUGHAN JR.; COSTA, 1968; ROSBURG, 2004; ROSBURG *et al.*, 2004, 2006). Woods e Elmasian (1986) relatam este tipo de efeito em vogais, sílabas, tons complexos e tons simples. Em séries repetitivas compostas por 3 a 10 sons, verifica-se que a atenuação parece estar completa ou quase completa já no segundo, a partir do qual a amplitude se estabiliza (BUDD *et al.*, 1998; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; ROSBURG, 2004; ROSBURG *et al.*, 2004, 2006; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011). A recuperação desse estado de menor responsividade pode durar vários segundos, como indicam estudos do efeito do intervalo entre estímulos sobre a amplitude da resposta (DAVIS *et al.*, 1966; HARI *et al.*, 1982; LU; WILLIAMSON; KAUFMAN, 1992; MCEVOY; LEVÄNEN; LOVELESS, 1997; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; SAMS *et al.*, 1993).

Há evidências de diferentes subcomponentes de N1 com diferentes tempos de recuperação, isto é, que aumentam em amplitude a diferentes taxas com o aumento do intervalo entre estímulos. Hari *et al.* (1982) verificaram, a partir de registros de EEG e MEG, que a taxa de aumento da amplitude decresce com o aumento do intervalo entre estímulos, ocorrendo o ponto de “saturação” (a partir do qual não há mais aumento) antes no N1m em comparação ao N1 eletroencefalográfico – foram usados intervalos de 1 a 16 s. Ademais, estímulos apresentados com intervalos menores que 4 s eliciaram respostas com amplitudes semelhantes em derivações frontais (Fz) e centrais (Cz), ao passo que amplitudes claramente mais elevadas em Cz foram observadas para intervalos maiores. Como o MEG é mais sensível a correntes orientadas tangencialmente em relação à superfície da cabeça e insensível às orientadas radialmente, enquanto o EEG reflete correntes em todas as orientações (HARI; PARKKONEN; NANGINI, 2010), os autores interpretam esses resultados como sugestivos de dois subcomponentes com diferentes cursos temporais de recuperação: um orientado tangencialmente, localizado no córtex auditivo e outro, ausente nos registros de MEG, com orientação radial e recuperação mais lenta. São estes os subcomponentes designados por Näätänen e Picton (1987) como “componente 1” e “componente 3”. Resultados concordantes são encontrados em Budd *et al.* (1998), que relatam também dois subcomponentes: um com topografia difusa e tempo de recuperação entre 3 e 10 s e um com topografia mais frontal, menor latência e tempo de recuperação entre 1 e 3 s. Sams *et al.* (1993) e McEvoy *et al.* (1997) dividiram o componente N1m em dois ao longo de seu intervalo de ocorrência e encontraram fontes com localizações diferentes no plano supratemporal. O denominado N1m^A (anterior) apresentou maior tempo de recuperação comparado ao N1m^P (posterior), este atingindo um platô a cerca de 6 s.

Grau *et al.* (2007) analisaram PEs em resposta a trios de tons simples idênticos por meio de uma combinação entre a análise de componentes independentes (ICA) e o método LORETA de neuroimagem para EEG/MEG (veja MARCO-PALLARÉS; GRAU; RUFFINI, 2005). Foram identificados como contribuições à resposta N1 dois componentes independentes refletindo atividade em áreas temporais, um componente temporo-parietal, um fronto-temporal e um frontal, os dois últimos mais tardios. Embora os cinco tenham apresentado atenuação por repetição, os componentes relacionados a atividade em áreas frontais

ou parietais foram suprimidos a ponto de deixarem de ser detectados nas respostas ao segundo e ao terceiro tom. Sobre os componentes presentes nas respostas aos três tons, uma análise no domínio da frequência indica ainda que a potência nas bandas *alfa* e *teta* aumenta em resposta ao primeiro, mas não aos outros dois. Em registros intracranianos, Boutros et al (2011) observaram também a adaptação de N1 em áreas temporais e frontais, sendo nas últimas registrados os efeitos mais pronunciados. Interessantemente, efeitos de atenuação intensos e mínimos foram observados em regiões vizinhas na área do polo frontal. Estes achados sugerem que circuitos frontais são fundamentais na modulação de respostas a estímulos que se repetem e para operações relacionadas ao processamento do primeiro evento sonoro em uma série, como a detecção de novidades e o redirecionamento involuntário da atenção (sobre o envolvimento de geradores de N1 nesta função, veja LANGE, 2011, 2013; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; SANMIGUEL; TODD; SCHRÖGER, 2013).

Pouco se sabe sobre os mecanismos fisiológicos subjacentes à adaptação de N1. Ritter, Vaughan e Costa (1968) sugerem que unidades neurais geradoras das respostas evocadas se tornam relativamente refratárias logo depois que se ativam, se recuperando progressivamente deste estado ao longo de certo intervalo de tempo. McEvoy *et al.* (1997) propõem um modelo em que uma resposta excitatória inicial ativa circuitos excitatórios e inibitórios. A atividade inibitória levaria algumas poucas centenas de milissegundos para se estabelecer plenamente e então decairia progressivamente durante um intervalo relativamente longo, o que explicaria tanto a atenuação por repetição e o aumento da resposta com o aumento do intervalo entre estímulos como também os efeitos inversos aos mesmos, observados em sequências em que os intervalos entre estímulos são menores que cerca de 0.6 s (MCEVOY; LEVÄNEN; LOVELESS, 1997; SABLE *et al.*, 2004). Em um estudo da adaptação no complexo N1-P2, Lanting *et al.* (2013) encontraram evidências de que a magnitude da atenuação da resposta a um estímulo é determinada em grande parte pela duração do estímulo precedente e pelo intervalo de silêncio entre os dois, e sugerem mecanismos de hiperpolarização lenta e depressão sináptica como subjacentes aos efeitos observados.

Em comparação a longas sequências de estímulos compostas pela repetição de um único tom simples, amplitudes maiores de N1 são observadas em sequências formadas pela alternância entre dois tons simples que diferem entre si em frequência

ou localização no espaço (BUTLER, 1972; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988; YAGCIOGLU; UNGAN, 2008). Quanto maiores as diferenças na frequência (NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988) ou na localização (BUTLER, 1972; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988) dos dois tons alternantes, maior a amplitude da resposta. Obtidos em condições de escuta passiva, tais resultados indicam um efeito de atenuação por repetição sobre N1 e que este efeito apresenta especificidade ao estímulo. Herrmann, Henry e Obleser (2013) apresentaram, em condições ativas e passivas de estimulação, sequências de tons simples que variavam aleatoriamente dentro de três diferentes faixas de frequência: uma faixa mais ampla (700 – 2500 Hz) e duas faixas curtas (840 – 1587 Hz; 1103 – 2084 Hz). Para cada faixa, as amplitudes de N1 formaram um padrão em “U” com as maiores amplitudes nas respostas às frequências mais distantes do centro da faixa, resultado interpretado como evidência de adaptação específica ao estímulo (a quantidade de tons “vizinhos” é maior para os tons no centro da faixa, o que causaria maiores efeitos de atenuação). Verificou-se ainda que o grau de propagação do efeito de atenuação ao longo da faixa de frequências varia com a largura da mesma, o que evidencia a capacidade do sistema em se ajustar ao contexto de estimulação – aqui representado pela variância das frequências dos tons em cada sequência (HERRMANN; HENRY; OBLESER, 2013; veja também HERRMANN; SCHLICHTING; OBLESER, 2014).

Nos estudos citados no parágrafo anterior, os estímulos foram apresentados em longas sequências, com intervalos constantes de silêncio entre os sons (entre 0,5 e 1 s). Os experimentos com sons alternantes permitem observar níveis relativos de responsividade em sequências que diferem na magnitude da diferença entre os dois sons. São comparadas as médias das amplitudes em cada sequência. Nos experimentos em que os sons variam aleatoriamente dentro de uma faixa, os níveis de responsividade são associados ao ponto ocupado pelo estímulo na faixa de variação. Entretanto, estes protocolos de estimulação não possibilitam a verificação direta, em uma dada resposta, do efeito de atenuação resultante da apresentação de estímulos precedentes. Isto é, são estabelecidas comparações apenas entre as sequências ou entre posições na faixa de variação e não entre as respostas a um estímulo e ao(s) estímulo(s) precedente(s). Viu-se acima que, em séries de três a 10 sons, a amplitude de N1 se estabiliza já a partir do segundo (BUDD *et al.*, 1998; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; ROSBURG, 2004; ROSBURG *et al.*, 2004, 2006; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; ZHANG, FAWEN *et*

al., 2011). Contudo, há evidências de um outro tipo de efeito de atenuação que se dá ao longo de escalas de tempo ou sequências de estímulos bem mais extensas. Este efeito, denominado “habituação de longo prazo”, se manifesta em comparações entre longas sequências sucessivas de estímulos (BRATTICO; TERVANIEMI; PICTON, 2003; WOODS; ELMASIAN, 1986). Desta forma, as amplitudes das respostas nos referidos experimentos com estímulos alternantes (BUTLER, 1972; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988; YAGCIOGLU; UNGAN, 2008) ou aleatoriamente variáveis (HERRMANN; HENRY; OBLESER, 2013; HERRMANN; SCHLICHTING; OBLESER, 2014) são provavelmente moduladas por ambos os tipos de efeito, isto é, a atenuação rápida que ocorre entre os primeiros estímulos de uma série (predominantemente entre o primeiro e o segundo) e a habituação de longo prazo.

Empregando pares de estímulos sucessivos em que poderiam ocorrer duas vogais idênticas ou contrastantes em qualidade ou na localização percebida, Ahveninen *et al.* (2006) fornecem evidência de dois subcomponentes com diferentes localizações ao longo do plano supratemporal e diferentes perfis de especificidade ao estímulo: um “N1m anterior” que apresenta maior especificidade em relação ao conteúdo espectral das vogais e um “N1m posterior”, mais sensível a diferenças na localização desses sons no espaço. Ahveninen *et al.* (2006) verificaram ainda que estes perfis de especificidade parecem ser modulados pela atenção seletiva. Enquanto ouviam os pares de vogais, os participantes eram orientados a ignorar os estímulos ou a pressionar um botão ao ouvirem dois pares idênticos em relação a um dos atributos que variavam – qualidade da vogal ou localização da mesma no espaço. Um sinal visual indicava o atributo a ser levado em consideração em cada bloco do experimento. Observou-se nas respostas à segunda vogal do par, um “N1m anterior” significativamente maior em amplitude quando ocorria mudança no conteúdo espectral do estímulo e o participante dirigia a atenção à qualidade da vogal, e um efeito análogo sobre o “N1 posterior” no hemisfério direito quando havia mudança na localização e a tarefa exigia o foco da atenção sobre este atributo. Aumentos relacionados à atenção seletiva na amplitude de N1, e também de componentes com latências menores, haviam sido previamente relatados (HILLYARD *et al.*, 1973; WOLDORFF *et al.*, 1993). Altmann *et al.* (2008), que observaram a adaptação de N1 e P2 em pares de sons complexos apresentados em condições de escuta passiva, não encontraram evidências de efeitos de adaptação específica ao estímulo sobre N1.

O fenômeno da adaptação específica ao estímulo pode ser observado em neurônios individuais. Registros unitários no córtex auditivo primário de gatos anestesiados indicam que as respostas de neurônios nesta área são atenuadas para frequências próximas à de um tom puro apresentado repetidamente e intensificadas para outras frequências (ULANOVSKY; LAS; NELKEN, 2003); o efeito foi observado com intervalos entre estímulos de 375 a 1000 ms nos registros unitários e de até 2000 ms na análise de agrupamentos multiunitários. Ulanovsky, Las, Farkas e Nelken (2004) fornecem evidências de que este tipo de adaptação específica ao estímulo ocorre em várias escalas de tempo, de décimos a dezenas de segundos. Considera-se a participação de diversos mecanismos, como depressão sináptica, modulações da atividade inibitória e correntes iônicas hiperpolarizantes (veja, por exemplo, ABOLAFIA *et al.*, 2011; WEHR; ZADOR, 2005).

A sensibilidade dos geradores de N1 a diferenças em atributos acústicos do estímulo é atestada não apenas nos padrões de adaptação desta resposta, mas também em parâmetros que expressam sua intensidade, latência e estimativas de localização. A altura melódica (*pitch*) dos sons parece afetar de maneira ordenada a localização de dipolos de corrente equivalente (*equivalent current dipoles, ECD*) que modelam geradores do N1m no córtex auditivo (FUJIOKA *et al.*, 2003; LANGNER *et al.*, 1997; PANTEV *et al.*, 1988, 1989, 1995). Variações na distribuição topográfica de N1 com a frequência dos tons apresentados são também observadas em registros de EEG (PANTEV *et al.*, 1995; WOODS; ALHO; ALGAZI, 1991). Os resultados magnetoencefalográficos supracitados indicam que frequências mais baixas eliciam respostas N1 localizadas mais lateralmente, o que sugere que este componente reflete a organização tonotópica de áreas do córtex auditivo, atestada também em estudos de ressonância magnética funcional (COSTA *et al.*, 2011; FORMISANO *et al.*, 2003; revisões em WOODS; ALAIN, 2009; MOEREL; DE MARTINO; FORMISANO, 2014). Gabriel *et al.* (2004), ao examinarem respostas a sons com frequências médias e altas, de 1 a 12 KHz (comparadas à faixa de frequências médias e baixas empregadas em outros estudos), não observaram efeitos na dimensão médio-lateral, mas dipolos mais posteriores para frequências acima de 6 KHz.

Não é claro se o gradiente tonotópico observado na localização do N1m reflete o conteúdo espectral ou a altura percebida do som, esta mais relacionada a sua periodicidade, ou seja, F_0 (veja EGGERMONT; PONTON, 2002; FUJIOKA *et al.*,

2003; LANGNER *et al.*, 1997; PANTEV *et al.*, 1989). Fujioka *et al.* (2003) sugerem que o efeito expressa a extração de informações relacionadas tanto ao espectro como à periodicidade, fundamentais à percepção do timbre e da altura do som, respectivamente. Outras respostas evocadas parecem também manifestar gradientes tonotópicos, como o componente de latência média P_a (PANTEV *et al.*, 1995) e a resposta evocada em regime permanente (ROMANI; WILLIAMSON; KAUFMAN, 1982), o primeiro na direção inversa e a segunda na mesma direção do gradiente observado em N1 – áreas vizinhas com tonotopias inversamente orientadas são de fato observadas no córtex auditivo por meio de ressonância magnética funcional (COSTA *et al.*, 2011; MOEREL; DE MARTINO; FORMISANO, 2014; WOODS; ALAIN, 2009). Entretanto, além da ausência de efeitos significativos da frequência sobre a localização de N1 em alguns estudos (LÜTKENHÖNER; KRUMBHOLZ; SEITHER-PREISLER, 2003; ROBERTS; POEPEL, 1996; STUFFLEBEAM *et al.*, 1998) e da grande variabilidade interindividual (LÜTKENHÖNER; KRUMBHOLZ; SEITHER-PREISLER, 2003), convém notar que a interpretação dos dados de localização de componentes das respostas evocadas em estudos de tonotopia pode ser problemática. Como salientam Lütkenhöner *et al.* (2003) e Gabriel *et al.* (2004), modela-se por um único dipolo (para cada hemisfério) a atividade relacionada a N1, um componente que provavelmente resulta da atividade de múltiplos geradores no córtex auditivo e outras áreas. Os resultados podem, portanto, não corresponder a qualquer campo cortical organizado de acordo com um mapa tonotópico, mas, por exemplo, a diferenças entre diversas áreas na sensibilidade a diferentes faixas de frequências.

Menos se sabe a respeito da resposta P2, considerada como uma manifestação de processos geradores independentes daqueles subjacentes a N1 (revisão em CROWLEY; COLRAIN, 2004). Lütkenhöner e Steinsträter (1998) localizaram os centros de atividade durante os picos de N1m e P2m, respectivamente, no *planum temporale* e na região do giro de Heschl, mas salientam a possibilidade de que as medidas do centro de atividade reflitam, na verdade, contribuições de fontes múltiplas. Em registros de EEG intracraniano e MEG, Godey *et al.* (2001) encontraram evidências de geradores de P2 no *planum temporale* e no aspecto lateral do giro temporal superior (neste último caso, apenas nos registros de MEG). Resultados de estudos de PEs obtidos a partir de EEG de superfície sugerem que, de maneira análoga ao que se verifica em N1, contribuições de outras áreas,

possivelmente frontais, se adicionam às fontes supratemporais de P2 (PICTON *et al.*, 1999; VERKINDT *et al.*, 1994).

Efeitos de adaptação são também observados em P2. Em um estudo de campos magnéticos evocados em resposta a pares de sons (vocalizações de animais e ruído branco filtrado com as envoltórias espectrais das vocalizações), Altmann *et al.* (2008) verificaram atenuações em N1 e P2 para o segundo som do par. Apenas em P2 foram encontradas evidências de adaptação específica ao estímulo: a atenuação de P2 foi mais pronunciada em pares formados por sons idênticos ou por sons com a mesma envoltória espectral – em comparação a pares de vocalizações diferentes e pares compostos por uma vocalização e um ruído com envoltórias espectrais discordantes. Os efeitos de repetição sobre N1 e P2 parecem diferir também no modo como são influenciados pela atenção. Hsu, Hämäläinen e Waszak (2014) apresentaram a participantes de dois experimentos sequências de sons graves e agudos (3 oitavas acima dos graves) alternantes. A sequência de estímulos poderia ser formada por sons agudos que se repetiam aos pares e sons graves que variavam aleatoriamente ou vice versa. Os participantes eram orientados a direcionar a atenção apenas aos sons graves ou apenas aos sons agudos (ignorando os demais) e a executar uma tarefa de detecção de um som desviante em intensidade. Em um primeiro experimento, o som desviante ocorreu apenas na série de sons sob o foco da atenção; no segundo, sons desviantes ocorreram, como distratores, também na série de sons ignorados (deste modo, a tarefa exigiria mais atenção). As amplitudes de N1 foram menores nas séries de sons repetidos de maneira independente da atenção. Efeitos de repetição sobre a amplitude de P2 foram observados apenas entre os sons sob o foco da atenção no primeiro experimento – amplitudes menores nas séries de sons repetidos. Isto é, a atenuação por repetição em P2 foi observada em condições em que um certo nível de atenção foi exigido, mas não na tarefa que exigiria mais atenção. Nesta, foi observado uma atenuação geral de P2, ou seja, tanto nas séries de sons repetidos como nas séries aleatórias (HSU; HÄMÄLÄINEN; WASZAK, 2014). Os autores especulam a respeito de mecanismos de processamento descendente (*top-down*) preditivo, subjacentes aos efeitos observados em P2, e processos “ascendentes” (*bottom-up*) de adaptação, subjacentes aos efeitos de atenuação por repetição sobre N1.

Diferenças interessantes entre N1 e P2 foram encontradas por Tian e Poeppel (2013), que empregaram um paradigma experimental de adaptação em que

o estímulo, um som de uma sílaba /ba/ ou /ki/, poderia ser precedido pelo som ou pelo ato de imaginar o som de uma das duas sílabas, ou ainda pelos movimentos ou pela imaginação dos movimentos de articulação correspondentes a uma das sílabas. Na condição em que o estímulo era precedido por outro som, foram observados efeitos de adaptação específica ao estímulo em N1m e P2m, ou seja, amplitudes menores nos casos em que as duas sílabas eram idênticas. Sendo os estímulos precedidos por “sons imaginários”, o efeito de adaptação específica ao estímulo se manteve apenas em P2m. Já nos dois casos envolvendo movimentos articulatórios, realizados ou imaginados, a repetição da mesma sílaba provocou não uma atenuação, mas um aumento na amplitude de P2m. Em comparação com N1m, a resposta P2m parece, portanto, refletir a atividade de unidades neurais mais propensas a influências descendentes (*top-down*) de circuitos envolvidos na ativação de representações auditivas a partir de modelos internos. Tian e Poeppel (2013) interpretam estes resultados (juntamente com dados de localização) em termos das vias ventral e dorsal de processamento auditivo no córtex (seção 2.3.2). Sugerem que, na imaginação auditiva, mecanismos de recuperação de informação na memória de longo prazo na via ventral participam na “percepção encoberta”, que, assim como a no caso da percepção de eventos externos, é seguida por uma diminuição na sensibilidade a estímulos com características semelhantes. Já nos casos da imaginação e da realização de gestos articulatórios, os efeitos são atribuídos a circuitos na via dorsal envolvidos na simulação e predição das consequências sensoriais daqueles gestos.

2.4.2 A NEGATIVIDADE DE INCONGRUÊNCIA (MMN) E SUA RELAÇÃO COM N1

Como vimos, a MMN é normalmente observada como uma deflexão negativa na denominada “onda de diferença”, obtida ao se subtrair a resposta a estímulos padrão da resposta a estímulos desviantes. Manifesta nos potenciais evocados como uma negatividade fronto-central com latência de pico entre 150 e 250 ms, é atribuída a geradores neurais localizados no córtex auditivo e em áreas frontais (GIARD *et al.*, 2014; LAPPE; STEINSTRÄTER; PANTEV, 2013; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; DEOUELL, 2007; ROSBURG *et al.* 2005). De acordo com o modelo mais tradicional e dominante (NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; WINKLER, 1999), as respostas N1 e MMN resultam de processos diferentes, sendo o primeiro associado a estágios relativamente

avançados da análise dos atributos acústicos do estímulo e também a um processo não específico ao estímulo de detecção de transientes, relacionado à atenção involuntária. A MMN refletiria, segundo este modelo, um processo de detecção de desvios ou violações de regularidades identificadas pelo sistema na estimulação auditiva. Estas regularidades seriam representadas por traços na memória sensorial auditiva, estabelecendo previsões a respeito dos próximos eventos acústicos. A atualização das representações na memória sensorial, resultante da incongruência entre a previsão e um estímulo desviante, se manifestaria também na MMN.

A formação destes traços sensoriais dependeria não apenas da entrada estimulatória, mas também de traços de memória de logo prazo, o que explica o efeito da experiência/aprendizagem sobre a MMN. Nesta linha, e com base em uma série de evidências experimentais, Näätänen e Winkler (1999) propõem a MMN como um índice do que designam como “Representação Central do Som” – uma representação unitária do evento auditivo, resultado do processamento paralelo e integração dos atributos acústico-sensoriais do estímulo, e que corresponde ao percepto que pode se apresentar à consciência. O componente N1 refletiria não esta representação, mas processos envolvidos na sua formação.

A interpretação da MMN como um componente por si só das respostas evocadas é questionada por May e Tiitinen (2010) a partir de extensa revisão e da argumentação de que as diversas linhas de evidências apresentadas neste sentido (veja NÄÄTÄNEN; JACOBSEN; WINKLER, 2005; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011) são insuficientes para rejeitar a hipótese de que a negatividade observada na onda de diferença resulta de modulações na amplitude e na latência do componente N1 em resposta ao estímulo desviante. Estas poderiam ser explicadas por processos de adaptação e inibição lateral atuantes durante a apresentação de sequências de estímulos repetitivas. De acordo com simulações computacionais do modelo proposto por May e colaboradores (MAY *et al.*, 1999; MAY; TIITINEN, 2004, 2010), a magnitude da resposta N1 a um som em uma sequência *oddball* será maior se este for o estímulo desviante, uma vez que, comparado ao estímulo padrão, estará menos sujeito aos efeitos de adaptação específica ao estímulo – dessa diferença derivaria a MMN. Uma resposta ainda maior seria obtida em condições em que os estímulos padrão fossem substituídos por intervalos de silêncio, dada a reduzida influência de mecanismos supressivos relacionados à adaptação e à inibição lateral. Outra predição do modelo é a de que, devido à inibição lateral,

podem ocorrer atrasos das respostas a estímulos desviantes, o que explicaria as diferenças de latência entre o N1 e a MMN. Evidências empíricas favoráveis à proposta foram encontradas por Jääskeläinen *et al.* (2004). Ulanovsky *et al.* (2003), considerando seus resultados de registros unitários e multiunitários no córtex auditivo primário de gatos, reiteram a sugestão de que a MMN pode ser explicada a partir do conceito de adaptação específica ao estímulo.

Propostas conciliatórias são apresentadas na literatura, com base em evidências de neuroimagem (LAUFER *et al.*, 2008; LAUFER; NEGISHI; CONSTABLE, 2009; OPITZ; SCHRÖGER; VON CRAMON, 2005) e simulações computacionais (GARAGNANI; PULVERMÜLLER, 2011). De acordo com Opitz, Schröger e von Cramon (2005), a MMN é composta por um componente “sensorial”, resultante de processos de adaptação, e um componente “cognitivo” que reflete um mecanismo “comparador” nos moldes do modelo tradicional de Näätänen e colaboradores. Garagnani e Pulvermüller (2011) admitem que a MMN e o N1 envolvem os mesmos princípios neurofuncionais, mas sugerem que os dois componentes refletem atividades de populações diferentes (embora não disjuntas). A MMN manifestaria a ativação de unidades menos atenuadas em resposta ao desviante no córtex auditivo, mas também a atividade de circuitos reverberantes relacionados à memória de longo prazo. Esta distinção torna-se, porém, menos clara se consideramos a possibilidade de que haja contribuições destes circuitos de memória na resposta N1.

No que se refere às respostas aos sons da fala, interessa verificar se o “efeito de limite de categoria” (veja a seção 2.4.3, adiante) observado na MMN pode resultar da adaptação específica ao estímulo, que seria maior no N1 em resposta a uma sequência inter-categorias em comparação a uma sequência intra-categoria de sons da fala – estabelecendo um efeito de “adaptação específica à categoria”. Sequências de estimulação do tipo *oddball* não são adequadas a este propósito, uma vez que, como visto acima, pode ocorrer um atraso na latência do componente N1 na resposta evocada pelo estímulo desviante, tornando-o indissociável de uma suposta MMN “genuína”. Uma das contribuições do presente trabalho ao debate sobre a relação entre o N1 e a MMN reside justamente na tentativa de observar uma adaptação específica à categoria em condições experimentais em que não há estímulos desviantes.

2.4.3 RESPOSTAS EVOCADAS A SONS DA FALA

Efeitos de fatores relacionados ao domínio das frequências dos sons da fala são observados sobre a localização (por ECD) de N1. Em uma série de estudos de campos magnéticos evocados, são relatados efeitos relacionados a distinções de qualidade vocálica na região do córtex auditivo. Respostas N1m a vogais recuadas (ou dorsais) com localizações mais posteriores que as respostas a vogais anteriores (ou coronais) são observadas em estudos que examinaram as oposições entre as recuadas /o, u/ e as anteriores /e, ø, i, y/ do alemão (OBLESER; ELBERT; EULITZ, 2004; OBLESER; LAHIRI; EULITZ, 2003, 2004), e entre /u, w, ɔ, ɑ/ e /i, y, ε, œ/ do turco (SCHARINGER; IDSARDI; POE, 2011). A distinção entre as semivogais do inglês /j/ e /w/ parece produzir efeitos análogos no eixo anteroposterior (SCHARINGER *et al.*, 2011). No eixo longitudinal, dipolos obtidos a partir do N1m para a vogal baixa /a/ foram localizados em áreas superiores aos correspondentes à vogal média /e/ (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; OBLESER *et al.*, 2003), e à vogal alta /i/ (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; SHESTAKOVA *et al.*, 2004).

O estudo de Scharinger, Idsardi e Poe (2011) com falantes do turco é especialmente interessante, considerando, de acordo com os autores, que o sistema de oito vogais dessa língua estabelece, de maneira simétrica, oposições entre quatro vogais altas (/i, y, w, u/) e quatro não-altas (/ε, œ, ɑ, ɔ/); quatro anteriores (/i, y, ε, œ/) e quatro recuadas (/u, w, ɔ, ɑ/); quatro arredondadas (/u, y, ɔ, œ/) e quatro não-arredondadas (/i, w, ε, ɑ/). Isto permite que cada uma dessas três dimensões articulatórias (altura, ponto de articulação e arredondamento) seja explorada no que concerne a possíveis efeitos sobre a resposta. Os autores sugerem que as localizações das respostas às vogais anteriores e recuadas, além de diferirem em relação ao eixo anteroposterior (como mencionado acima), formam dois mapas separados, aproximadamente ortogonais entre si. Paralelo ao plano coronal se estabelecerá um mapeamento das vogais anteriores; paralelo ao plano axial, um mapeamento das vogais recuadas. Isto justifica uma análise em que as vogais anteriores e recuadas foram consideradas separadamente, verificando-se efeitos significativos relacionados à altura entre as vogais anteriores e ao arredondamento entre todas as vogais – a saber, respostas às anteriores altas localizadas inferiormente às respostas às anteriores não-altas, e respostas às arredondadas lateralmente às não-arredondadas.

Note que este modelo de mapeamento das vogais em três dimensões na superfície cortical é consistente com os demais resultados supracitados e não contradiz Mäkelä, Alku e Tiitinen (2003), que indicam, no hemisfério esquerdo, localizações anteriores para o N1m em resposta à vogal alta recuada /u/ em comparação às não-altas /o/ e /a/ do finlandês. É também interessante observar que ocorrem efeitos relacionados ao arredondamento da vogal na direção médio-lateral, a mesma em que se verifica recorrentemente gradientes tonotópicos em que frequências mais baixas se associam a posições mais laterais – um efeito acústico bem conhecido do arredondamento é o de deslocar picos espectrais na direção das frequências mais baixas (STEVENS, 1998).

Entre os principais correlatos acústicos da qualidade vocálica estão picos espectrais resultantes de ressonâncias acústicas características do trato vocal humano denominadas formantes. De maneira geral, as vogais de uma língua podem ser caracterizadas em qualidade pelas frequências dos três primeiros formantes, F_1 , F_2 e F_3 (LADEFOGED; MADDIESON, 1999; STEVENS, 1998). O primeiro se correlaciona fortemente com a altura, ocorrendo em frequências mais baixas nas vogais altas; o segundo com o ponto de articulação, apresentando-se em frequências mais altas nas vogais anteriores. Scharinger Idsardi e Poe (2011) compararam um modelo baseado em parâmetros articulatórios binários correspondentes a traços distintivos (“alto/não-alto”, “anterior/recuado” e “arredondado/não-arredondado”) com um modelo baseado nos parâmetros acústicos contínuos F_1 , F_2 e F_3 , tendo os modelos de traços distintivos se ajustado um pouco melhor aos dados. Os autores interpretam este resultado como indicativo de que os padrões de atividade neural relacionados ao N1 em resposta a vogais manifestam uma organização baseada em distinções entre categorias discretas relacionadas aos traços distintivos (de acordo com propostas apresentadas em OBLESER; LAHIRI; EULITZ, 2003, 2004). Contudo, esta conclusão pode ser questionada a partir do fato de que, dado o plano estabelecido por duas dimensões representando F_1 e F_2 , as vogais se distribuem de modo a formar agrupamentos em razoavelmente estreita correspondência com os traços distintivos de altura e ponto de articulação. Sobre o traço de arredondamento, este se associa a frequências mais baixas em F_2 e F_3 em vogais arredondadas comparadas às vogais não-arredondadas (STEVENS, 1998). Deste modo, ainda que os parâmetros acústicos sejam contínuos, os próprios estímulos formam, segundo estes mesmos parâmetros,

agrupamentos que correspondem aos traços distintivos, o que torna problemática a comparação entre “modelos discretos” baseados nesses traços e “modelos acústicos contínuos”.

A respeito de efeitos relacionados a diferenças entre consoantes, Obleser, Scott e Eulitz (2006) relatam localizações mais anteriores para as oclusivas coronais /d/ e /t/ comparadas às oclusivas dorsais /g/ e /k/ do alemão. Este padrão é consistente com os resultados acima mencionados sobre a distinção entre vogais anteriores (ou coronais) e recuadas (ou dorsais). Efeitos marginais análogos foram encontrados por Tavabi, Obleser, Dobel e Pantev (2007), entre /d/ e /g/. No mesmo estudo, verifica-se ainda que outro componente, o P1, foi localizado mais lateralmente para /g/ do que para /d/. A orientação do dipolo correspondente ao N1 pode também variar com contrastes entre sons da fala, como apontam Obleser, Elbert *et al.* (2003), para /d/ e /g/, e Obleser, Lahiri *et al.* (2004), para /o/ e /ø/.

Em todos os estudos aqui mencionados a respeito da localização de respostas evocadas a sons da fala, os geradores do componente foram modelados por um ECD, definido como o dipolo que melhor se ajusta aos dados. Valem, portanto, as mesmas ressalvas apontadas acima para o caso dos estudos de MEG sobre a tonotopia (GABRIEL *et al.*, 2004; LÜTKENHÖNER; KRUMBHOLZ; SEITHER-PREISLER, 2003). Isto é, admitindo que o N1 é gerado em múltiplas áreas, o resultado reflete o “centro de massa” dessa atividade, e pode dar a impressão ilusória de um único gerador cuja localização varia ao longo de um gradiente que representa o atributo acústico/linguístico estudado (LÜTKENHÖNER; POEPEL, 2011). Todavia, os achados são evidências de que sons diferentes produzem padrões espaciais diferentes de atividade. Alguns dos estudos sobre respostas a vogais incluem análises em que é considerada como variável dependente não a localização por si, mas a distância euclidiana entre os dipolos obtidos para cada vogal. Distâncias maiores nas localizações dos dipolos corresponderam a diferenças maiores entre vogais – sejam estas diferenças expressas em termos de traços distintivos ou de frequências de formantes (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; OBLESER *et al.*, 2003; OBLESER; LAHIRI; EULITZ, 2004; SCHARINGER; IDSARDI; POE, 2011; SHESTAKOVA *et al.*, 2004).

Há evidências de que medidas de latência e de intensidade do N1 são também afetadas por diferenças entre sons da fala, sobretudo no que concerne ao seu conteúdo espectral. De acordo com os resultados de Scharinger, Idsardi *et al.*

(2011), vogais altas, anteriores e arredondadas produziram respostas neuromagnéticas com latências mais longas que, respectivamente, vogais não-altas, recuadas e não-arredondadas. Em outros estudos, com exceção da distinção entre anteriores e recuadas, comparações entre /i/ e as não-altas /e/ e /a/ (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; OBLESER *et al.*, 2003; OBLESER; LAHIRI; EULITZ, 2004), entre as não-arredondadas /i/ e /e/ e as arredondadas /o/ e /u/ (OBLESER; ELBERT; EULITZ, 2004; OBLESER; LAHIRI; EULITZ, 2004) e entre /a/ e /u/ (ROBERTS; FLAGG; GAGE, 2004; TIITINEN *et al.*, 2005) apontam na mesma direção. Vale notar que vogais altas são caracterizadas por frequências mais baixas em F_1 e vogais arredondadas por frequências mais baixas em F_2 e F_3 . Frequências mais baixas são associadas a latências mais longas do N1 em resposta a tons simples (JENKINS; IDSARDI; POEPPPEL, 2010; ROBERTS; POEPPPEL, 1996; STUFFLEBEAM *et al.*, 1998; revisão em ROBERTS *et al.*, 2000)⁸.

Alguns estudos de MEG relatam efeitos sobre medidas da intensidade do N1m, sendo o mais consistente um aumento da resposta à vogal /i/ em comparação a outras (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; OBLESER *et al.*, 2003; SCHARINGER; IDSARDI; POE, 2011; SHESTAKOVA *et al.*, 2004). Obleser, Elbert *et al.* (2003) especulam sobre a possibilidade de que isto reflita a inibição mútua entre unidades neurais ativadas por F_1 e F_2 , que seria menor em vogais em que as frequências desses dois formantes são distantes entre si – como /i/ (a este respeito, veja OHL; SCHEICH, 1997). Shestakova *et al.* (2004), que usaram um grande número de exemplares de cada vogal testada (/i/, /a/ e /u/), notam que os espectros das outras vogais variam menos entre exemplares do que o espectro de /i/, o que poderia causar maior atenuação por repetição. Relatos de diferenças de amplitude do N1m relacionadas a outras distinções entre vogais e entre consoantes são encontrados em Obleser, Elbert *et al.* (2004), Obleser *et al.* (2006), Scharinger, Idsardi, *et al.* (2011) e Tavabi *et al.* (2007).

Medidas de amplitude e de latência de N1 parecem também variar com o tipo ou a natureza do estímulo. Em estudos de MEG e EEG são relatadas respostas com

⁸ Contudo, ao contrário do que se poderia prever a partir dos resultados com vogais, este efeito sobre a latência, no caso dos tons, pode estar mais relacionado à periodicidade da onda sonora do que a seu conteúdo espectral, como mostra Fujioka *et al.* (2003) em um experimento que inclui como estímulos sons com a “fundamental ausente” – isto é, em que a relação entre os harmônicos implica uma frequência fundamental que não se apresenta no espectro.

latências mais longas a vogais em comparação a tons simples (EULITZ *et al.*, 1995; SWINK; STUART, 2012; TIITINEN *et al.*, 1999). Nos registros de EEG são observados efeitos sobre a amplitude do N1, maior para as vogais (SWINK; STUART, 2012; TIITINEN *et al.*, 1999). Uma explicação razoável para as diferenças na latência seria a de que sons mais complexos exigem maior tempo de processamento. De acordo com resultados de Fujjoka *et al.* (2003), a latência do N1m aumenta com a complexidade do estímulo sonoro. Entretanto, o padrão inverso foi encontrado por Jenkins (2010)⁹.

Os resultados revistos até este ponto sobre os efeitos de diferenças entre sons da fala sobre o componente N1 indicam que esta resposta reflete processos perceptivos que possibilitam a discriminação e o reconhecimento desses sons. Pouco informam, contudo, sobre as categorias fônicas e seu papel na percepção. A este respeito, contribuições importantes são dadas em estudos psicofisiológicos de respostas evocadas auditivas, em particular o componente MMN.

Apresentando um exemplar sintetizado da vogal finlandesa /y/ como estímulo padrão, Aaltonen *et al.* (1987) observaram a MMN provocada pela apresentação infrequente de outra vogal finlandesa, /i/, e também por um intermediário entre as duas, verificando maior amplitude e menor latência para o primeiro caso. Este resultado pode ser explicado simplesmente pela diferença acústica entre os estímulos padrão e desviante, que é maior no caso do desviante /i/, mas não descarta a possibilidade de que haja na resposta um componente relacionado à distinção que há no finlandês entre /y/ e /i/. Aulanko *et al.* (1993) apresentaram a falantes do finlandês sílabas /bæ/ e /gæ/, ambas variando em altura entre 16 diferentes valores de frequência fundamental (doravante, F_0). Sendo uma das duas sílabas usada como estímulo desviante, a variação na altura não impediu que fosse obtida uma resposta magnética de incongruência (MMNm). Isto indica que, em uma etapa pré-atencional de processamento, os sons foram agrupados de acordo com categorias correspondentes às duas sílabas; a informação fonética foi extraída em meio à variação linguisticamente irrelevante em F_0 . Resultados semelhantes foram obtidos com vogais francesas (DEGUCHI *et al.*, 2010), vogais russas gravadas por telefone, pronunciadas por centenas de falantes (SHESTAKOVA *et al.*, 2002), vogais

⁹ Uma diferença importante entre os dois estudos é que o primeiro emprega como estímulos tons compostos por quatro componentes senoidais, ao passo que no segundo apenas dois componentes compõem cada tom.

sintetizadas variando em altura e intensidade (JACOBSEN; SCHRÖGER; ALTER, 2004) e tons complexos compostos por três parciais senoidais correspondentes a F_0 e os dois primeiros formantes daquelas mesmas vogais (JACOBSEN; SCHRÖGER; SUSSMAN, 2004; veja também JACOBSEN; SCHRÖGER, 2004; TERVANIEMI; WINKLER; NÄÄTÄNEN, 1997).

Resultados como estes atestam a sensibilidade da MMN a diferenças entre sons da fala, incluindo casos em que a detecção da diferença depende do agrupamento de sons diversos nas duas categorias a serem discriminadas – correspondentes, no caso do paradigma *oddball*, aos estímulos padrão e desviante. Encontra-se em uma série de estudos evidências de que a influência das categorias fônicas sobre a percepção se manifesta em componentes da resposta evocada auditiva, especialmente a MMN. A estratégia mais comum em torno da qual os delineamentos experimentais variam consiste no emprego do paradigma *oddball* em condições inter-categorias, em que os estímulos padrão e desviante pertencem a categorias diferentes, e condições intra-categoria, em que ambos são exemplares de uma mesma categoria. Admitindo diferenças acústicas equivalentes nas condições inter- e intra-categoria, testa-se então a hipótese de que medidas de amplitude e latência da resposta diferem entre as duas condições. São também frequentes as comparações entre falantes de línguas em que uma dada distinção entre sons é relevante com falantes cuja língua não apresenta a mesma distinção. Muitos estudos testam os participantes em condições passivas, em que o foco da atenção não é direcionado aos estímulos de interesse, enquanto outros empregam condições ativas, em que o participante executa uma tarefa – normalmente de discriminação dos estímulos apresentados.

Dehaene-Lambertz (1997) observou, em falantes do francês, desempenho superior em uma tarefa de discriminação e uma MMN em resposta a uma sílaba identificada como /ba/ antecedida por uma sequência de sílabas /da/ idênticas, mas não quando este mesmo estímulo desviante era antecedido por uma variante também identificada como /ba/, mesmo sendo as diferenças acústicas entre desviante e padrão equivalentes nas duas condições. Também não foi detectada a MMN ou melhora no desempenho de discriminação para o desviante /da/, sendo o estímulo padrão a sílaba /ɖa/ – a consoante oclusiva retroflexa /ɖ/, empregada no hindi, é percebida por falantes do francês como uma variante atípica de /d/. A autora conclui que os resultados refletem o acesso a representações fonéticas específicas

à língua e uma perda da capacidade de discriminar sons entre os quais a distinção é linguisticamente irrelevante – supondo ser a razão do desempenho inferior na tarefa e da ausência da MMN para a oposição d/q justamente a ausência deste contraste na língua francesa. Esta suposição é contrariada em Shafer, Schwartz e Kurtzberg (2004), que relatam desempenhos igualmente fracos e ausência de MMN para o contraste d/q em falantes do hindi e do inglês, mas também alguma evidência de efeitos da experiência com a língua materna – uma MMN com menor latência para os falantes do hindi quando o desviante /ba/ foi apresentado em meio a uma sequência de sílabas /qa/.

Uma MMN com maior área em pares inter-categorias em comparação à obtida com pares intra-categoria foi observada por Sharma e Dorman (1999), que variaram o parâmetro de tempo de início de vozeamento (*voice onset time*, VOT) de 30 a 80 ms para criar um *continuum* entre sílabas identificadas como /ba/ e /pa/ por falantes do inglês. Em um estudo posterior (SHARMA; DORMAN, 2000), foi usada uma faixa diferente de variação em VOT (-90 a 0 ms), não empregada normalmente no inglês, contendo consoantes identificadas todas como um /b/ atípico por falantes dessa língua, mas empregada no hindi e contendo, neste caso, duas consoantes distintas. Falantes do hindi apresentaram um desempenho muito superior na discriminação inter-categorias e uma MMN maior em comparação com falantes do inglês (em que a MMN não alcançou significância estatística).

Numa tentativa de explicar observações como essas, recorre-se à hipótese de que traços de memória formados a partir da experiência com uma língua se manifestam na resposta evocada, em particular, no componente MMN. Näätänen *et al.* (1997) relatam uma MMN com maior amplitude em resposta à vogal /ø/ do que à vogal /ɤ/ em falantes do finlandês, e o padrão inverso em falantes do estoniano. Ambas as vogais ocorrem no estoniano, mas apenas a primeira ocorre no finlandês. Como o estímulo padrão /e/ é acusticamente mais próximo de /ø/ do que de /ɤ/, estes resultados indicam um efeito de familiaridade ou “prototipicidade” do estímulo desviante: a vogal menos familiar (ou menos prototípica) eliciou uma MMN menor mesmo sendo acusticamente mais distante do estímulo padrão, de maneira coerente com a hipótese de um traço de memória específico à língua. Cheour *et al.* (1998) estendem estas observações (com as mesmas vogais) ao campo da aquisição da linguagem no primeiro ano de vida ao comparar bebês finlandeses de 12 meses com bebês estonianos da mesma idade e bebês finlandeses de seis meses. Seus

resultados convergem com os de estudos comportamentais que apontam para um declínio na habilidade de discriminação para distinções sonoras irrelevantes na língua nativa associado a melhoras em distinções relevantes durante o primeiro ano de vida (KUHL *et al.*, 2006, 2008; WERKER; TEES, 2005; veja também TRISTÃO; FEITOSA, 2003).

A influência da experiência linguística nos processos geradores da MMN foi atestada também em falantes não nativos altamente fluentes (WINKLER; KUJALA; *et al.*, 1999) e parece depender de fatores diversos, como o tipo e a intensidade de exposição à língua aprendida (PELTOLA *et al.*, 2003) e o sistema sonoro da língua materna (BRANDMEYER; DESAIN; MCQUEEN, 2012; LIPSKI; ESCUDERO; BENDERS, 2012; NENONEN *et al.*, 2005).

Embora efeitos de categorias fonéticas sejam consistentemente atestados na literatura, contrastam com esses resultados alguns estudos em que se observam sobre a MMN efeitos da diferença acústica entre os sons, mas não das categorias fônicas (consoantes variando no ponto de articulação: MAISTE *et al.*, 1995; SHARMA *et al.*, 1993; vogais: SAVELA *et al.*, 2003). Maiste *et al.* (1995), por exemplo, encontraram efeitos categóricos no complexo N2b-P3b, mas não na MMN. Entretanto, como notam esses autores, a simples ausência de efeitos estatisticamente significativos que apontem para um componente categórico não exclui a possibilidade de um efeito real mas com magnitude insuficiente para alcançar significância.

A fim de verificar se o processo de detecção de mudanças que gera a MMN opera tanto com informação categórica (fonética) como com informação puramente sensorial, Winkler, Lehtokoski *et al.* (1999) empregaram um delineamento experimental interlinguístico simétrico: foram usados dois pares de vogais, um dos quais soando intra-categoria (/e/) no finlandês e inter-categorias (/é/ e /ɛ/) no húngaro, e o outro, inversamente, intra-categoria (/ɛ/) no húngaro e inter-categorias (/e/ e /æ/) no finlandês. Ambos foram apresentados no paradigma *oddball* a falantes das duas línguas. Uma MMN significativa foi observada em cada uma das condições, mas com amplitude maior para o par inter-categorias em ambos os grupos de falantes – note que isto significa uma inversão do padrão observado em um grupo com relação ao outro.

Estas evidências são favoráveis à hipótese de que a MMN reflete tanto o processamento de informação sensorial como de informação fonética específica à

língua, e são complementadas por estudos posteriores mostrando também aumento de amplitude e/ou diferenças em latência para distinções linguisticamente relevantes, mas com MMN's significativas tanto para contrastes intra- como inter-categorias (veja DEHAENE-LAMBERTZ *et al.*, 2005; SHAFER; SCHWARTZ; KURTZBERG, 2004, para distinções em ponto de articulação de consoantes oclusivas; NENONEN *et al.*, 2005, 2003; KIRMSE *et al.*, 2008, para distinções em duração de vogal; ZHANG, YANG *et al.*, 2005, para a distinção entre /r/ e /l/). Lipsky e Mathiak (2007), em um estudo envolvendo fricativas do polonês e do alemão, embora não tenham observado diferenças de amplitude e latência na MMNm, relatam diferenças importantes entre falantes das duas línguas no padrão temporal de lateralização da resposta a um contraste exclusivo do polonês (entre /ʃ/ e /ʒ/; para resultados análogos com falantes do inglês e do japonês, veja ZEVIN *et al.*, 2010). Joanisse, Robertson e Newman (2007) consideram ter fornecido evidência adicional do envolvimento de processamento sensorial e fonético na geração da MMN, tendo encontrado, entre dois desviantes categorizados como /ba/, uma resposta mais robusta para aquele que se distanciava do estímulo padrão /da/ por uma diferença acústica maior, embora nenhuma comparação estatística direta entre as respostas para os dois desviantes seja apresentada.

Os resultados expostos até aqui estão de acordo com a hipótese da participação de traços de memória dependentes da experiência linguística no processo de detecção pré-atencional de mudanças manifesto na MMN. Uma explicação alternativa seria que o próprio sistema sensorial se ajustaria, com a experiência, ao sistema de distinções da língua, resultando em compressões do espaço perceptivo intra-categoria e/ou dilatações do mesmo em regiões de limite entre categorias. Contudo, isso não explica resultados como os de Näätänen *et al.* (1997), em que, entre estímulos desviantes em um mesmo parâmetro acústico (no caso, F_2), o mais distante do padrão produz a menor resposta.

Tampas, Harkrider e Hedrick (2005) obtiveram PEs para um par intra-categoria de exemplares da sílaba /ba/, em resposta ao qual não foi detectada a MMN, e para um par de tons simples modulados em frequência de modo a emular a variação em F_2 daquelas sílabas. Neste último caso foi observada uma MMN significativa, em consonância com a ideia de informação categórica independente de descontinuidades sensoriais. Entretanto, este resultado deve ser considerado com cautela, pois pode decorrer do fato de que a complexidade espectro-temporal de

uma sílaba consoante-vogal (CV) é bem maior que a de um tom puro com uma transição em frequência – interferências entre componentes espectrais poderiam diminuir a discriminabilidade entre os sons.

É possível contornar esse tipo de dificuldade se, de alguma forma, um mesmo estímulo puder ser percebido hora como fala, hora como não-fala. Dehaene-Lambertz *et al.* (2005) produziram tons complexos que não são normalmente percebidos como sons da fala, mas podem ser, mediante instrução, identificados como sílabas variando entre /ba/ a /da/ – note que, neste caso, a atenção está necessariamente envolvida. Em uma comparação dos participantes no “modo verbal” e no “modo acústico” de percepção dos estímulos, verifica-se apenas no primeiro desempenho intra-categoria inferior e inter-categorias superior em uma tarefa de discriminação. No “modo acústico”, as diferenças intra- e inter-categorias eliciaram MMN’s similares, ao passo que, quando os sons foram percebidos como sílabas, a MMN em resposta à diferença inter-categorias apresentou latência menor e duração maior. Isto sugere que os efeitos das categorias fonéticas sobre a MMN dependem da ativação de representações em um modo de processamento específico para os sons da fala, o que pode, inclusive, explicar observações de que o efeito de limite de categorias em estudos comportamentais depende do tipo de tarefa de discriminação – especificamente, se a tarefa induz ou não o participante a se basear em categorias fônicas (GERRITS; SCHOUTEN, 2004; SCHOUTEN; GERRITS; VAN HESSEN, 2003; SILVA; ROTHE-NEVES, 2009).

Há, contudo, ao menos um contraexemplo, envolvendo a detecção de diferenças de frequência e duração de tons complexos (não percebidos como sons da fala) em falantes do alemão e do finlandês: foram observadas respostas eletrofisiológicas e comportamentais semelhantes para a diferença de frequência, mas uma superioridade dos falantes do finlandês para a diferença na duração – manifesta em uma MMN maior em amplitude e uma diferença minimamente perceptível (*just noticeable difference*, JND) menor (TERVANIEMI *et al.*, 2006). Os autores atribuem o resultado ao fato de que distinções em duração são fonologicamente muito mais importantes no finlandês (resultados divergentes em NENONEN *et al.*, 2003). Portanto, ao menos no caso do contraste de duração, o componente da MMN relacionado à experiência linguística pode estar ligado a efeitos da mesma sobre processos sensoriais auditivos gerais.

Efeitos de aprendizagem de categorias sobre a MMN não são restritos aos sons da fala, como mostra um estudo em que participantes foram treinados implicitamente a categorizar sons não verbais comparáveis em complexidade espectro-temporal a sílabas CV (LIU; HOLT, 2011). Por meio da associação sistemática de conjuntos desses sons a diferentes estímulos visuais em um tipo de videogame, os participantes aprenderam a agrupá-los em categorias. Foram obtidos PEs em um paradigma *oddball* passivo antes e depois desse treinamento, em resposta a sons que, de acordo com suas características acústicas, deveriam ser incluídos em uma ou outra categoria. Os resultados indicam que o treinamento causou aumento na amplitude e redução na latência da MMN em pares inter-categorias, e redução da amplitude em pares intra-categoria. Este estudo é particularmente interessante, pois, além de estender achados anteriores para além do domínio da percepção da fala, atesta um componente categórico na MMN que não pode ser atribuído a efeitos de familiaridade, mas sim ao agrupamento de sons em categorias formadas em condições experimentais de aprendizagem. Quanto a efeitos de familiaridade de sons não verbais sobre a MMN, estes também já foram relatados (JACOBSEN *et al.*, 2005).

O exame da literatura pertinente revista até este ponto autoriza a conclusão de que a informação armazenada durante o processo de aquisição da língua acerca das categorias sonoras se encontra disponível já no nível do processo de detecção automática de desvios que se manifesta na MMN – que usualmente ocorre dentro do primeiro quarto de segundo a partir do início da entrada sensorial. Capaz de produzir efeitos relacionados tanto à familiaridade dos sons como à categorização dos mesmos, a informação acerca das categorias sonoras pode estar na forma de traços de memória de longo prazo relativamente independentes dos processos sensoriais mais básicos, mas também, ao menos em alguns casos, na forma de restrições ou descontinuidades sensoriais que afetam o processamento auditivo de maneira geral. Ademais, o fenômeno não parece restrito ao domínio da comunicação verbal.

A respeito de um suposto nível de processamento de representações discretas, mais abstratas, designado como “nível fonológico”, Phillips (2000) argumenta que este não pode ser apropriadamente examinado por meio do paradigma usual em que simplesmente são comparadas diferenças intra- e inter-categorias ou distinções “nativas” e “não-nativas”. Efeitos de limites entre categorias e de familiaridade/prototipicidade são evidências dos agrupamentos de sons

diversos que constituem as categorias fonéticas. Neste nível há informação referente tanto à relevância linguística das diferenças como à variabilidade interna às categorias. Já o nível fonológico, mais abstrato, caracterizado por unidades de representação discretas empregadas em operações simbólicas, se manifestaria em condições em que se pudesse demonstrar que toda a variabilidade intra-categoria é definitivamente ignorada pelo sistema.

Na tentativa de estabelecer uma condição experimental com essa característica, em que a MMN pudesse ser usada como um índice da identidade entre os sons mapeados em uma única categoria fonológica, Phillips *et al.* (2000) empregaram um protocolo semelhante ao usado em Aulanko *et al.* (1993), com a diferença fundamental de que o parâmetro acústico que variava entre os estímulos padrão e entre os estímulos desviantes foi justamente o mesmo que diferenciava os dois conjuntos. A partir de um *continuum* de valores de VOT, entre /dæ/ e /tæ/, os autores definiram como estímulos padrão sílabas variando em VOT dentro de uma das categorias, e como desviantes sílabas que, variando no mesmo parâmetro, pertenciam à outra categoria. Embora as diferenças intra-categoria fossem, do ponto de vista acústico, comparáveis às diferenças inter-categorias, foi observada uma MMNm típica em morfologia e latência, o que foi interpretado como evidência de que representações fonológicas são acessadas no córtex auditivo (região em que a atividade foi localizada). Hill, McArthur e Bishop (2004) apresentam resultados semelhantes com as vogais /ɪ/ e /ɛ/. Assim como no estudo de Phillips e colaboradores, os participantes foram testados em uma condição-controle em que o ponto do *continuum* que separava os estímulos padrão e os desviantes foi deslocado de modo a não mais coincidir com a distinção fonológica investigada. Em ambas as condições foram observadas MMN's significativas entre 100 e 200 ms após o início do estímulo, mas apenas na condição experimental¹⁰ foi detectada uma MMN tardia entre 350 e 500 ms.

Outra contribuição de grande interesse é dada por Kazanina, Phillips e Idsardi (2006), que conduziram um estudo com falantes do russo e do coreano sobre a distinção d/t nas duas línguas. Na língua russa, há um contraste fonológico entre essas duas consoantes, uma vez que a distinção entre elas é capaz de determinar diferenças de significado, o que não ocorre no coreano, em que as duas formam um

¹⁰ Contudo, não são apresentados testes estatísticos que atestem a diferença entre as duas condições nesse intervalo do PE, o que torna os resultados menos convincentes.

par de alofones em distribuição complementar – a oclusiva vozeada /d/ ocorre entre dois sons vozeados; a oclusiva surda /t/ ocorre nos demais contextos. Temos, deste modo, no caso do coreano, duas consoantes que são mapeadas em uma mesma unidade no nível fonológico, ao passo que, no russo, duas unidades de representação fonológica são necessárias, uma para cada consoante. É importante notar que ambas as consoantes ocorrem nas duas línguas sem que possam ser livremente comutadas entre si, mas apenas no russo a distinção tem consequências lexicais. Por meio de um protocolo experimental semelhante ao descrito acima, usado por Phillips *et al.* (2000), os autores observaram a MMNm no grupo dos falantes do russo, mas não entre os coreanos, e concluem que a resposta obtida reflete apenas contrastes relevantes para o estabelecimento de distinções de significado (característica dos contrastes no nível fonológico). Infelizmente, embora essa conclusão dependa da diferença entre os dois grupos de falantes, cada um deles foi analisado separadamente, não sendo relatadas comparações estatísticas entre os mesmos.

3 ESTUDO I - ADAPTAÇÃO DAS RESPOSTAS N1 E P2 A VOGAIS

De acordo com a revisão apresentada no capítulo anterior, efeitos de atenuação por repetição observados nos componentes N1 e P2 das respostas evocadas auditivas são interpretados como manifestações de mecanismos de adaptação pelos quais populações neurais envolvidas na geração desses componentes, ao serem ativadas, se tornam menos responsivas durante um certo intervalo de tempo. Há estudos cujos resultados indicam que o referido efeito de adaptação pode ser específico ao estímulo – ou seja, uma atenuação mais pronunciada seria observada em sucessões de estímulos mais semelhantes (ou idênticos) em comparação a sucessões de estímulos menos semelhantes (AHVENINEN *et al.*, 2006; ALTMANN *et al.*, 2008; BUTLER, 1972; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988; TIAN; POEPEL, 2013; YAGCIOGLU; UNGAN, 2008).

Com o estudo apresentado neste capítulo, investigou-se a adaptação dos componentes N1 e P2 em resposta a vogais. Há particular interesse sobre se categorias vocálicas – isto é, as classes que agrupam sons vocálicos funcionalmente equivalentes em uma língua – se manifestam nos padrões de adaptação das respostas em questão. Assumindo que *a*) estímulos diferentes causam distribuições de atividade diferentes em populações de neurônios no córtex cerebral, e que *b*) o grau de semelhança entre dois estímulos está associado ao grau de semelhança entre os padrões de atividade neural por eles gerados, coloca-se a seguinte questão: a adaptação que se segue à apresentação de um som S_1 causa maior atenuação na resposta a um som S_2 se ambos são identificados como exemplares de uma mesma categoria?

Potenciais evocados (PEs) foram obtidos em resposta a pares de sons sucessivos (S_1S_2). Três tipos de par foram empregados: pares de “estímulos idênticos”, em que um mesmo som foi apresentado como S_1 e S_2 ; pares “intra-categoria”, formados por sons diferentes, mas ambos identificados como exemplares de uma mesma categoria vocálica; pares “inter-categorias”, em que sons de categorias diferentes são apresentados como S_1 e S_2 . O experimento foi elaborado de modo a permitir o teste de três hipóteses:

- Hipótese 1 (*adaptação*): dado um par de sons vocálicos apresentados sucessivamente (S_1S_2), a resposta a S_2 apresentará menor amplitude que a resposta a S_1 .
- Hipótese 2 (*adaptação específica ao estímulo*): respostas a S_2 com menor amplitude serão observadas nos pares de estímulos idênticos em comparação aos pares formados por sons diferentes.
- Hipótese 3 (*adaptação específica à categoria*): respostas a S_2 com menor amplitude serão observadas nos pares “intra-categoria” em comparação aos pares “inter-categorias”. Trata-se de um tipo particular de adaptação específica ao estímulo que será aqui denominado como “adaptação específica à categoria”.

Adicionalmente, como seis diferentes sons foram apresentados na posição S_1 , as respostas aos mesmos foram também investigadas com o objetivo de verificar possíveis variações de amplitude em N1 e P2 associadas às diferenças entre esses estímulos.

A especificidade da adaptação do componente N1 é de especial interesse, uma vez que um efeito de atenuação específico à categoria seria consistente com a proposição de que a resposta MMN, que apresenta efeitos relacionados à categorização de sons, resultaria, ao menos em parte, da adaptação (específica ao estímulo) de N1 em sequências repetitivas de sons.

3.1 MÉTODOS

3.1.1 PARTICIPANTES

Participaram deste estudo 28 voluntários (14 mulheres) falantes nativos de variedades do Português faladas em Minas Gerais, com idades entre 18 e 33 anos (média: 24) e com preferência manual direita – avaliada por meio do inventário Edimburgo (OLDFIELD, 1971). Os participantes relataram ausência de histórico de acometimentos neurológicos ou audiológicos e assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido, de acordo com as exigências do Comitê de Ética em Pesquisa - UFMG, pelo qual o projeto em que se insere este estudo foi aprovado (parecer nº 369.878).

3.1.2 ESTÍMULOS

Uma implementação do sintetizador KLSYN88 (KLATT; KLATT, 1990) no programa *Praat* (BOERSMA & WEENINK, 2012), apresentada em Weenink (2009), foi usada para a síntese dos estímulos. Foram sintetizados 28 sons vocálicos, compondo uma série sobre um *continuum* entre as vogais /i/ e /ɛ/, passando por /e/, estabelecido com base em dados de falantes do Português Brasileiro do sexo masculino (ESCUADERO *et al.*, 2009; RAUBER, 2008) e em resultados de testes-piloto. Este *continuum* corresponde a um segmento de reta em um espaço definido por três eixos representando as frequências dos três primeiros formantes (F_1 , F_2 e F_3), com valores expressos não em Hertz, mas na escala *Bark*, de acordo com a transformação proposta por Traunmüller (1990):

$$f_{Bark} = \frac{26,81f_{Hz}}{1960 + f_{Hz}} - 0,53$$

onde f_{Hz} representa a frequência em unidades de Hertz e f_{Bark} o valor convertido em *Bark*. Trata-se de uma escala psicoacústica que expressa distâncias perceptivas¹¹.

Para simular o processo de fonação, a fase aberta de um ciclo glótico foi modelada como

$$g(t) = t^3 - t^4$$

onde g representa o fluxo glótico e $0 \leq t \leq 1$ o tempo entre a abertura e o fechamento. Uma função de fluxo glótico foi então gerada de modo a se obter uma onda sonora com duração de 150 ms e com a frequência fundamental (F_0) decaindo linearmente de 120 a 90 Hz. O trato vocal foi simulado por um banco de filtros correspondentes a oito formantes. As frequências dos três primeiros formantes foram ajustadas para cada vogal da série, variando ao longo do *continuum* em passos fixos de 0,13 (F_1), 0,06 (F_2) e 0,03 Bark (F_3), de 2,01 a 5,39 (F_1), de 14,20 a 12,52 (F_2) e de 15,69 a 14,76 Bark (F_3) – ou, em Hertz, de 205 a 555; de 2390 a 1860; de 3000 a 2600 Hz. As frequências f_i dos demais formantes, F_4 a F_8 , são dadas (em Hertz) por

$$f_i = 3900 + 1000(i - 3)$$

¹¹ De acordo com Fastl e Zwicker (2007), há uma correspondência aproximada entre uma unidade de *Bark* e a distância de cerca de 1,3 mm ao longo de uma membrana basilar com comprimento total de 32 mm.

onde $4 \leq i \leq 8$. As larguras de banda dos dois primeiros formantes são de 60 e 90 Hz, respectivamente, e de 150 Hz para os demais. A onda foi manipulada de modo a apresentar uma elevação gradual em amplitude, de zero a um nível máximo nos primeiros 20 ms (*fade in*), e um decaimento a zero nos últimos 20 ms (*fade out*). Para isto, os 20 ms iniciais foram multiplicados pelo primeiro meio período da função $f(x) = (1 - \cos(x))/2$ e os 20 ms finais pelo primeiro meio período da função $f(x) = (1 + \cos(x))/2$.

Foram, deste modo, sintetizadas 28 vogais com 150 ms de duração, durante os quais F_0 decai de 120 a 90 Hz, sendo a intensidade média quadrática fixada em 70 dB (NPS). Exemplos com representações oscilográficas e espectrais são dados na Figura 3.1.

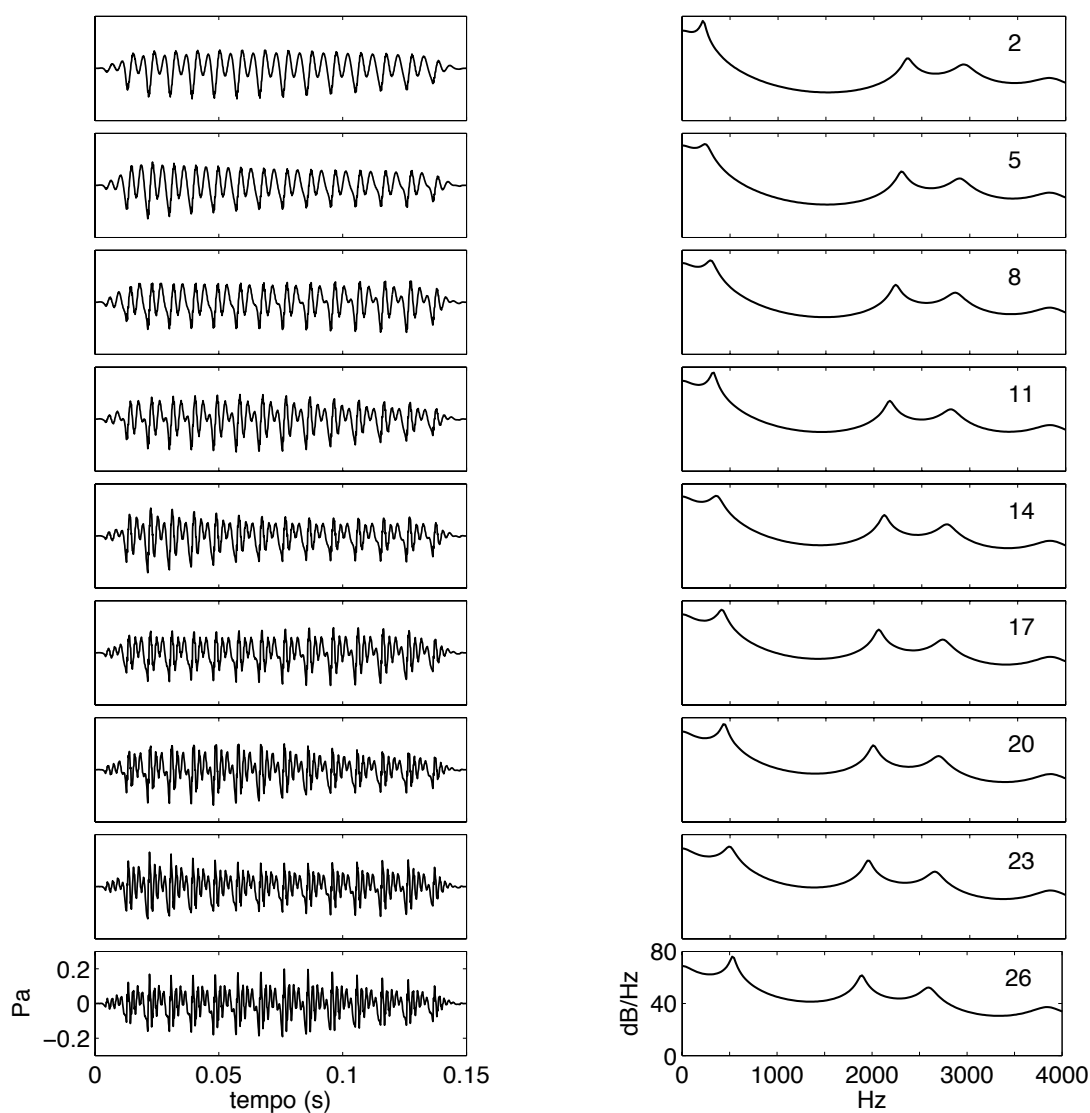
3.1.3 PROCEDIMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os participantes compareceram a duas sessões, realizadas em dias separados. Na primeira, executaram duas tarefas de classificação de vogais; na segunda, foi registrado o EEG. Os estímulos sonoros empregados para a obtenção dos PEs foram selecionados com base nos resultados das tarefas de classificação.

3.1.3.1 Tarefas de classificação

Os participantes executaram duas tarefas de escolha forçada em que estímulos sonoros deveriam ser classificados como exemplares de uma entre duas categorias vocálicas – /i/ e /e/ em uma das tarefas; /e/ e /ɛ/ na outra. Cada tarefa consiste em uma sequência de 432 provas, em cada uma das quais um som é apresentado e o participante deve indicar, pressionando uma tecla, a vogal à qual o som mais se assemelha. Como estímulos para a tarefa de classificação “i/e”, foram usados os 18 sons mais próximos ao extremo “i” do *continuum* descrito acima, ao passo que os 18 sons mais próximos ao extremo “ɛ” foram empregados na tarefa de classificação “e/ɛ”. A sequência de estímulos da tarefa é formada por 24 repetições de cada um dos 18 sons – 432 provas – ocorrendo em ordem pseudoaleatória (sem sons idênticos consecutivos). A cada 144 provas foi permitida uma breve pausa. Entre a resposta e a apresentação do próximo som, deu-se um intervalo de 1,0 s.

Figura 3.1 - Oscilogramas (coluna à esquerda) e espectros LPC (coluna à direita) correspondentes a nove dos 28 sons vocálicos sintetizados.



Os números no canto superior de cada gráfico na coluna da direita indicam a posição do som no *continuum* vocálico. Note que F_1 aumenta, ao passo que F_2 e F_3 decrescem ao longo do *continuum*.

A ordem de execução das duas tarefas foi contrabalanceada entre os participantes. Cada tarefa foi antecedida por uma versão reduzida de treinamento em que cada estímulo ocorre apenas uma vez (ou seja, 18 provas, também em ordem aleatorizada) e cujos resultados não foram incluídos na análise. Os participantes foram orientados a manter os dedos indicadores sobre as duas teclas de resposta e responder assim que ouvissem o som, mas não foram dadas instruções que sugerissem esforço para minimizar o tempo de resposta. Os estímulos sonoros foram apresentados de forma binaural por meio de fones supra-

aurais TDH-39. As respostas foram registradas e a proporção em que cada estímulo foi atribuído a cada categoria foi calculada.

3.1.3.2 Protocolo para a obtenção dos PEs

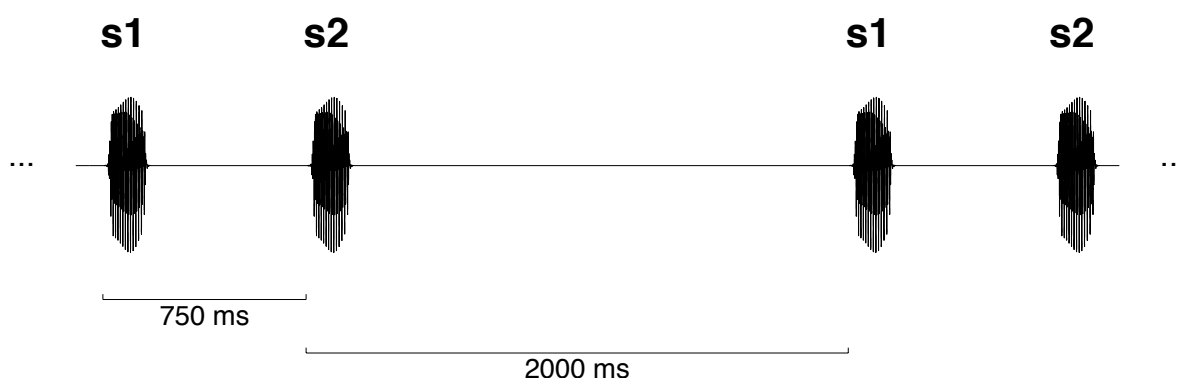
Para cada participante, seis sons foram selecionados a partir dos resultados das tarefas de classificação: três sons identificados como exemplares da categoria vocálica /i/ e três sons identificados como exemplares da categoria /e/. Esta seleção de estímulos foi realizada de forma que os seis sons formassem uma série sobre o *continuum* vocálico descrito acima, variando em passos fixos de 0,39 (F_1); 0,18 (F_2); 0,09 (F_3) Bark. Estes sons serão aqui designados por:

$$i_1; \quad i_2; \quad i_3; \quad e_1; \quad e_2; \quad e_3.$$

O limite entre as categorias vocálicas foi definido como o ponto do *continuum* em que uma curva de regressão logística ajustada aos dados de classificação passa pelo valor de proporção de resposta $p = 0.5$ (ou seja, o ponto em que as proporções seriam as mesmas para as duas categorias; vide Figura 3.6 e item 3.2.1). Dois participantes (um de cada sexo) foram excluídos do estudo em razão de seus resultados não permitirem a seleção adequada dos estímulos. Em ambos os casos, a porção do *continuum* contida na categoria /i/ foi insuficiente para que três exemplares da mesma fossem selecionados de acordo com as condições impostas.

Sequências de estímulos binaurais compostas pelos sons selecionados, apresentados em pares (S_1S_2), foram apresentadas aos participantes durante o registro do EEG. O intervalo entre o início do primeiro som (S_1) e o início do segundo som (S_2) de um par foi fixado em 750 ms. O intervalo entre o término de S_2 e o início de S_1 no próximo par foi aleatorizado, variando entre 1800 e 2200 ms (Figura 3.2). Seis pares S_1S_2 foram definidos, sendo dois compostos por sons idênticos ($i_3 - i_3; e_1 - e_1$), dois compostos por exemplares diferentes de uma mesma categoria ($i_1 - i_3; e_3 - e_1$) e dois compostos por exemplares de categorias diferentes ($e_2 - i_3; i_2 - e_1$) – vide Tabela 3.1. Dois aspectos deste protocolo de estimulação são dignos de nota. Primeiramente, os sons que ocorrem como S_2 são os mesmos nos três tipos de par, quais sejam, i_3 e e_1 . Em segundo lugar, os seis sons do conjunto de estímulos ocorrem como S_1 .

Figura 3.2 - Representação da sequência de estímulos apresentada durante o registro do EEG



Uma sequência de 180 repetições de cada par foi dividida em quatro blocos, cada um composto por 45 repetições de cada par apresentadas em ordem pseudoaleatória (sem apresentações consecutivas de um mesmo par). Entre os blocos, foram dadas pausas de cerca de dois minutos. Durante a apresentação da sequência de estímulos, os participantes assistiram a um filme legendado sem áudio e foram instruídos a ignorar os sons.

Tabela 3.1 - Pares de sons para a aquisição dos PEs.

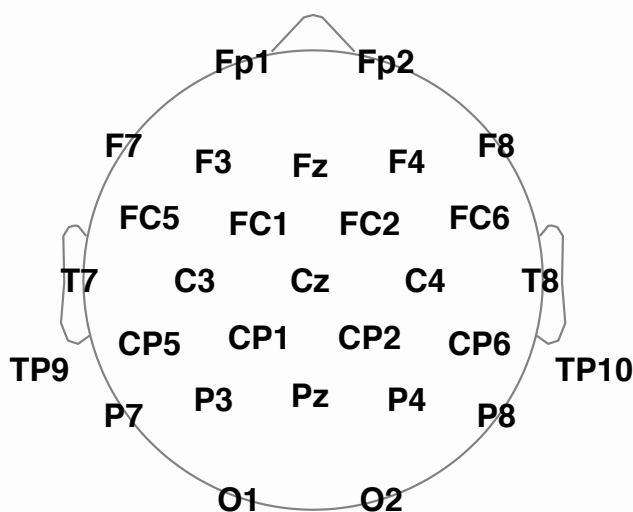
<i>Tipo</i>	<i>Par</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>
<i>Sons idênticos</i>	1.	i_3	i_3
	2.	e_1	e_1
<i>Intra-categoria</i>	3.	i_1	i_3
	4.	e_3	e_1
<i>Inter-categorias</i>	5.	e_2	i_3
	6.	i_2	e_1

3.1.3.3 *Aquisição dos PEs*

Para o registro do EEG, 29 eletrodos de Ag/AgCl foram fixados em uma touca elástica e posicionados no couro cabeludo de acordo com o Sistema Internacional 10-10, além de um eletrodo de referência na ponta do nariz e um eletrodo terra em AFz. As derivações empregadas foram Fp₁; Fp₂; F₇; F₃; Fz; F₄; F₈; FC₅; FC₁; FC₂; FC₆; T₇; C₃; Cz; C₄; T₈; CP₅; CP₁; CP₂; CP₆; TP₉; TP₁₀; P₇; P₃; Pz; P₄; P₈; O₁; O₂

(Figura 3.3). Para o registro do eletro-oculograma (EOG) vertical, foi usado um eletrodo abaixo do olho direito, posteriormente referenciado (*off-line*) em Fp₂. O EOG horizontal foi registrado por um par de eletrodos posicionados lateralmente aos cantos externos de ambos os olhos, formando uma derivação bipolar estabelecida *off-line*.

Figura 3.3 - Derivações para o registro do EEG.



As impedâncias foram mantidas abaixo de 15 K Ω em todos os eletrodos, nível adequado ao sistema *ActiCap* (Brain Products GmbH, Alemanha) de eletrodos ativos empregado. O sinal foi amplificado por meio de um sistema *BrainAmp DC* (Brain Products GmbH, Alemanha) e registrado com uma taxa de amostragem de 1000 Hz e filtros passa-alta em 0.016 Hz e passa baixa em 70 Hz. Os estímulos foram apresentados por meio de fones TDH-39.

O EEG foi segmentado de maneira que, para cada evento sonoro fosse obtido um trecho de 700 ms (de 100 ms antes a 600 ms após o evento). Deste modo, foram obtidos 2160 trechos para cada participante (180 repetições \times 6 pares \times 2 sons). Trechos que contivessem diferenças em amplitude maiores que 400 μ V entre quaisquer amostras foram excluídos. Sobre os trechos restantes foram aplicados o método Gratton-Coles para correção de artefatos oculares (GRATTON; COLES; DONCHIN, 1983; MILLER; GRATTON; YEE, 1988), reamostragem para

250 Hz, filtro passa banda ¹² (0,1 Hz a 20 Hz) e uma “correção pela linha de base” em que a média das amplitudes nos 100 ms anteriores ao estímulo foi subtraída de todo o trecho. Trechos contendo amplitudes superiores a 50 μ V ou inferiores a -50 μ V foram então excluídos, assim como os trechos correspondentes a S_1 e S_2 do primeiro par de cada um dos quatro blocos de estímulos. Para cada vogal (i_1 ; i_2 ; i_3 ; e_1 ; e_2 ; e_3) em cada posição (S_1 e S_2), foi calculada a média coerente dos trechos.

Os picos dos componentes N1 e P2 foram definidos, respectivamente, como o valor mínimo (em Cz) entre 70 e 140 ms e o valor máximo (em Cz) entre 150 e 250 ms após o início do estímulo sonoro. A amplitude de N1 foi quantificada como a amplitude média entre 80 e 120 ms (11 amostras com frequência de amostragem em 250 Hz) e a amplitude de P2 como a amplitude média entre 156 e 204 ms (13 amostras) após o início do estímulo. Essas janelas de tempo, centradas em 100 e 180 ms, foram estabelecidas com base na inspeção da média entre as médias coerentes dos participantes (*Grand Average*) e estão de acordo com a literatura pertinente.

3.1.3.4 *Análise dos dados*

Para a análise estatística das amplitudes de N1 e P2, foram empregadas as derivações Fz, Cz e Pz. Adicionalmente, foram analisadas medidas na janela temporal correspondente ao N1 obtidas nas derivações TP9 e TP10 (região do mastoide em ambos os hemisférios). Trata-se de uma forma de avaliar o subcomponente do N1 que se manifesta em derivações inferiores à fissura de Sylvius como uma inversão de polaridade, ou seja, um pico positivo (NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; SANMIGUEL; TODD; SCHRÖGER, 2013; WOODS, 1995). Este subcomponente, denominado “componente 1” em Näätänen e Picton (1987), será aqui designado como $N1_{c1}$. Vale notar, a este respeito, que o N1 medido na linha média (particularmente em Cz) resulta da combinação de dois ou mais subcomponentes, incluindo o $N1_{c1}$.

As comparações estatísticas de interesse foram efetuadas por meio de Análise de Variância (ANOVA) para medidas repetidas tendo como variável dependente a amplitude de N1 ou P2. Testes de *Shapiro-Wilk* e de *Levene* indicam que os dados não parecem violar de maneira significativa os pressupostos de

¹² Foi usado um filtro digital FIR *sinc* janelado, implementado no software EEGLAB (DELORME; MAKEIG, 2004), com janela *Hamming* e comprimento $M = 827$ (ordem $M - 1 = 826$).

distribuição normal e de homogeneidade das variâncias. Para violações do pressuposto de esfericidade, foi usada a correção de Greenhouse-Geisser. Quando usada a correção, os valores ε de Greenhouse-Geisser são apresentados juntamente com o valor F, os graus de liberdade originais e o valor p . Também é apresentada a medida de tamanho de efeito η_p^2 (“Eta ao quadrado parcial”). Interações entre dois fatores¹³ foram exploradas por meio de ANOVAs adicionais para cada um dos níveis de um dos fatores envolvidos – ajustes de Bonferroni para múltiplas comparações foram empregados.

Figura 3.4 - Condições experimentais (destaques em vermelho) consideradas nos testes das hipóteses 1, 2 e 3.

H1: $S_2 < S_1$

H2: ident. < intra/inter

H3: intra. < inter.

<i>Tipo</i>	<i>Par</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>Tipo</i>	<i>Par</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>
<i>Sons idênticos</i>	1.	<i>i₃</i>	<i>i₃</i>	<i>Sons idênticos</i>	1.	<i>i₃</i>	<i>i₃</i>
	2.	<i>e₁</i>	<i>e₁</i>		2.	<i>e₁</i>	<i>e₁</i>
<i>Intra-categoria</i>	3.	<i>i₁</i>	<i>i₃</i>	<i>Intra-categoria</i>	3.	<i>i₁</i>	<i>i₃</i>
	4.	<i>e₃</i>	<i>e₁</i>		4.	<i>e₃</i>	<i>e₁</i>
<i>Inter-categorias</i>	5.	<i>e₂</i>	<i>i₃</i>	<i>Inter-categorias</i>	5.	<i>e₂</i>	<i>i₃</i>
	6.	<i>i₂</i>	<i>e₁</i>		6.	<i>i₂</i>	<i>e₁</i>

A primeira hipótese (H1) se refere à atenuação em S_2 ; a segunda (H2) prediz menores amplitudes nas respostas a S_2 quando este é precedido por um som idêntico; a terceira (H3) prediz menores amplitudes das respostas a S_2 nos pares intra-categoria em comparação aos pares inter-categorias.

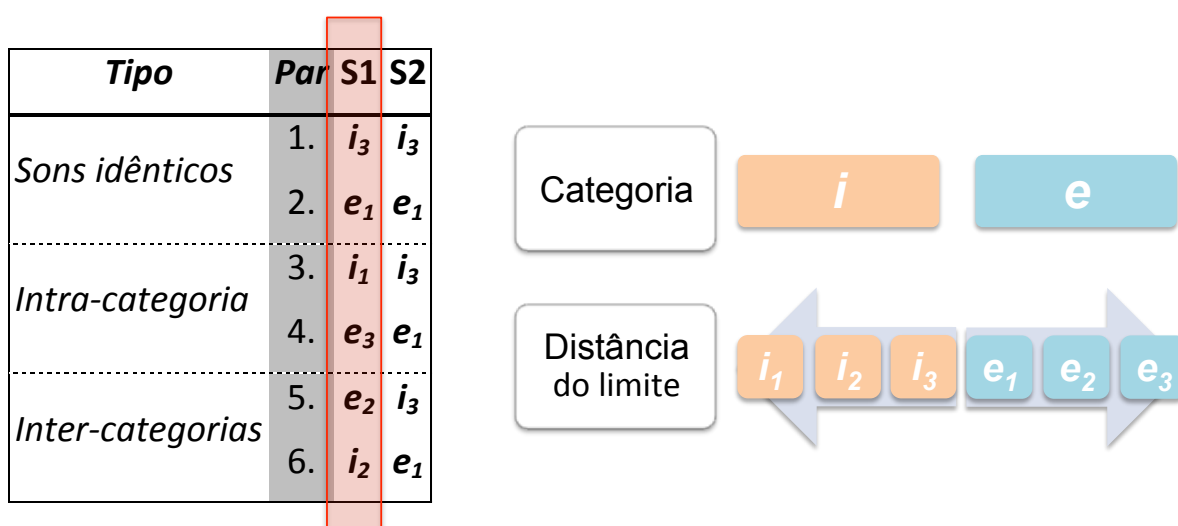
Para verificar a presença de efeitos de adaptação (hipótese 1), ou seja, uma atenuação na resposta a S_2 em comparação a S_1 , apenas os pares de sons idênticos foram considerados – pois, nestes casos, a diferença entre S_1 e S_2 pode ser atribuída exclusivamente à posição do estímulo no par e não a diferenças acústicas entre os dois sons (Figura 3.4). Foram aplicadas ANOVAs com os fatores “POSIÇÃO” ($S_1 \times S_2$), “VOGAL” ($i_3 \times e_1$) e “DERIVAÇÃO”. Nos casos das medidas de N1 e P2 na linha média, este último fator compreende os níveis Fz \times Cz \times Pz

¹³ Interações envolvendo mais de dois fatores não ocorreram neste estudo.

(nesta ordem) e corresponde, deste modo, ao eixo anteroposterior. Em casos de efeito significativo do mesmo, análises de tendência (contrastes ortogonais polinomiais) foram executadas – em que efeitos lineares se referem ao contraste $Fz \times Pz$ e efeitos quadráticos ao contraste entre Cz e os demais. No caso das medidas de $N1$ na região do mastoide, o fator “DERIVAÇÃO” compreende os níveis $TP9 \times TP10$, dando conta, portanto, de diferenças entre hemisférios.

Para o teste das hipóteses 2 e 3, referentes aos efeitos de adaptação específica ao estímulo e adaptação específica à categoria, foram empregadas ANOVAs sobre as medidas das respostas a S_2 (Figura 3.4), com os fatores “TIPO DE PAR” (*estímulos idênticos* \times *intra-categoria* \times *inter-categorias*), “VOGAL” e “DERIVAÇÃO”. Verifica-se, deste modo, se há diferenças significativas nas respostas a S_2 entre as condições em que este é precedido por um som idêntico, outro exemplar da mesma categoria ou um exemplar de uma categoria diferente. No caso de efeito significativo do fator “TIPO DE PAR”, seria realizada uma análise de contrastes planejados ortogonais do tipo *Helmert* – estabelecendo contrastes entre pares de *sons idênticos* e os demais (hipótese 2) e entre pares inter-categorias e intra-categoria (hipótese 3).

Figura 3.5 - Explorando as resposta a S_1 .



Possíveis efeitos relacionados aos sons apresentados como S_1 (i_1 ; i_2 ; i_3 ; e_1 ; e_2 ; e_3) foram também investigados. Os seis sons foram caracterizados por dois fatores: “CATEGORIA” ($/i/ \times /e/$) e “DISTÂNCIA DO LIMITE” ($[i_1 e_3] \times [i_2 e_2] \times [i_3 e_2]$).

Note que o último agrupa os sons de acordo com o quão afastado cada um se encontra do limite entre as categorias /i/ e /e/ (Figura 3.5). Isto reflete o caráter “fatorial completo” do delineamento experimental, em que, para cada categoria, são definidos três níveis de “distância do limite”. Foram então realizadas ANOVAs com os fatores “CATEGORIA”, “DISTÂNCIA DO LIMITE” e “DERIVAÇÃO”. Análises em que foram observados efeitos significativos de “DISTÂNCIA DO LIMITE”, assim como de “DERIVAÇÃO”, foram seguidas por análises de tendências (contrastes polinomiais).

Para além dos procedimentos tradicionais de medida e análise descritos acima, baseados em medidas de amplitude em janelas temporais em torno do pico do componente de interesse, um método de *Análise Têmporo-espacial de Componentes Principais* (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005) foi aplicado sobre os PEs. Descrições, justificativas e resultados dessa etapa adicional de análise são apresentados na seção 3.4.

3.2 RESULTADOS

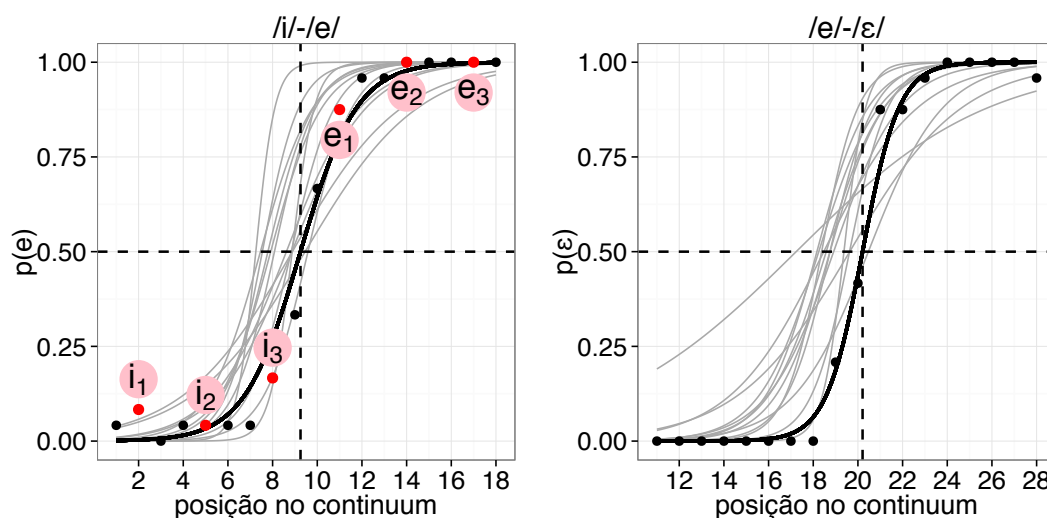
3.2.1 TAREFAS DE CLASSIFICAÇÃO

Às proporções de resposta de cada participante nas duas tarefas de classificação foram ajustadas curvas de regressão logística, a partir das quais os limites entre as categorias foram estimados. O limite entre duas categorias foi definido como o ponto em que a curva de regressão cruza a linha correspondente ao valor de proporção $p = 0,5$. Este ponto é encontrado pela substituição de p por 0,5 na equação da curva logística

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x$$

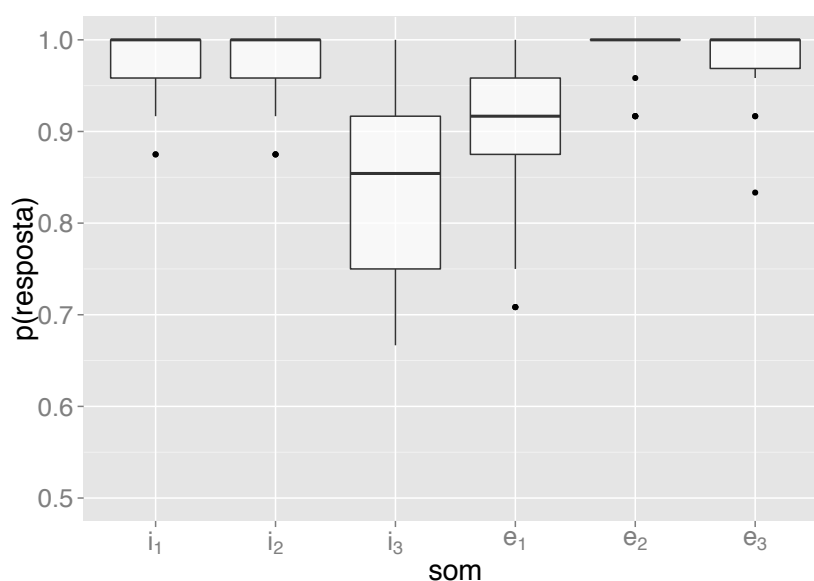
onde p representa a probabilidade de uma das duas alternativas de resposta, β_0 o intercepto, β_1 o coeficiente de inclinação, e x a variável independente que contém os pontos ao longo do *continuum*. Portanto, o valor de x no limite entre categorias é dado por $-\beta_0/\beta_1$. São assim atribuídas a cada participante estimativas do limites entre /i/ e /e/ e entre /e/ e /ɛ/. A média dos valores de limite na tarefa de classificação “i-e” se situou entre os pontos 8 e 9 do *continuum* ($8,7 \pm 0,16$; média \pm EPM); na tarefa “e-ɛ”, entre os pontos 19 e 20 ($19,16 \pm 0,20$).

Figura 3.6 - Curvas de regressão logística (linhas pretas) ajustadas aos dados de classificação de um dos participantes (círculos).



Esquerda: proporções de respostas “e” na tarefa “i-e”. *Direita*: proporções de respostas “ε” na tarefa “e-ε”. *Linha tracejada vertical*: limite entre categorias; *Círculos vermelhos*: sons selecionados para a aquisição dos PEs; *linhas cinza*: curvas para os demais participantes.

Figura 3.7 - *Boxplots* das proporções de respostas /i/ aos sons “i₁”, “i₂” e “i₃”, e de respostas /e/ aos sons “e₁”, “e₂” e “e₃”.

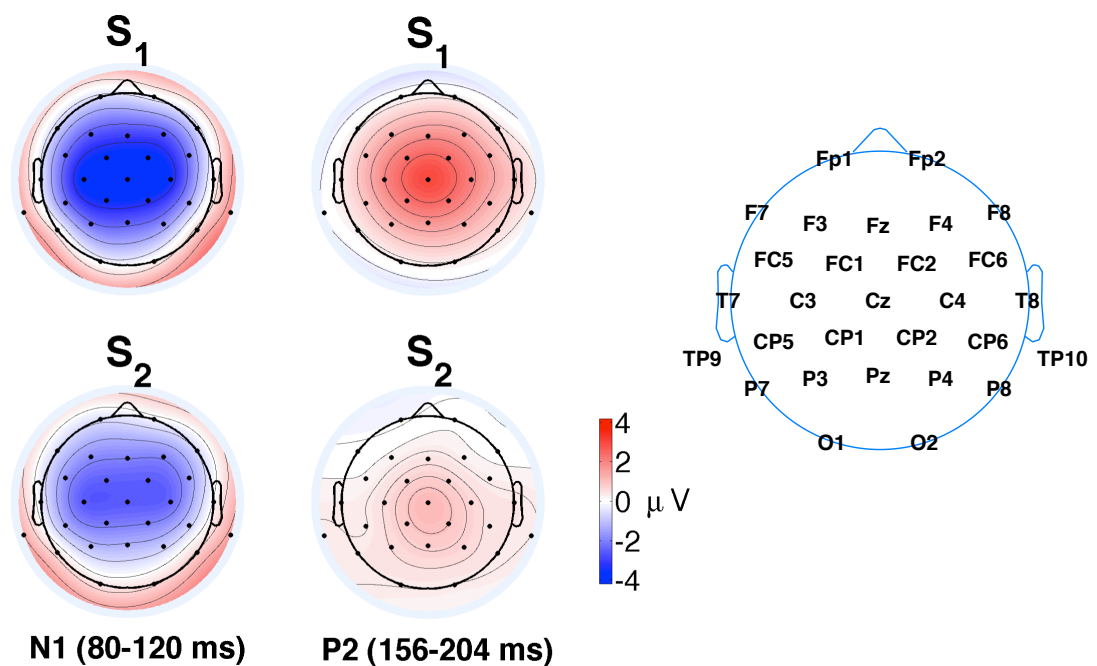


A Figura 3.6 mostra as proporções de resposta e as curvas de regressão para um dos participantes. Também são mostrados (círculos vermelhos) os sons selecionados para aquele participante como os estímulos a serem empregados na aquisição dos PEs. As variações entre participantes das proporções de respostas /i/ aos sons “i₁”, “i₂” e “i₃”, e de respostas /e/ aos sons “e₁”, “e₂” e “e₃” são representadas por meio de *boxplots* na Figura 3.7.

3.2.2 POTENCIAIS EVOCADOS

Deflexões negativas e positivas com latências e topografias típicas dos componentes N1 e P2 foram observadas nos PEs. O N1 apresentou um pico a cerca de 100 ms, com amplitude máxima na derivação Cz e clara inversão de polaridade em TP9 e TP10. Com pico a cerca de 180 ms, o componente P2 apresentou amplitude máxima também em Cz. Distribuições topográficas dos PEs nas janelas de tempo correspondentes a N1 e P2 são representadas na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Topografias dos componentes N1 e P2 em resposta a S_1 e S_2 .

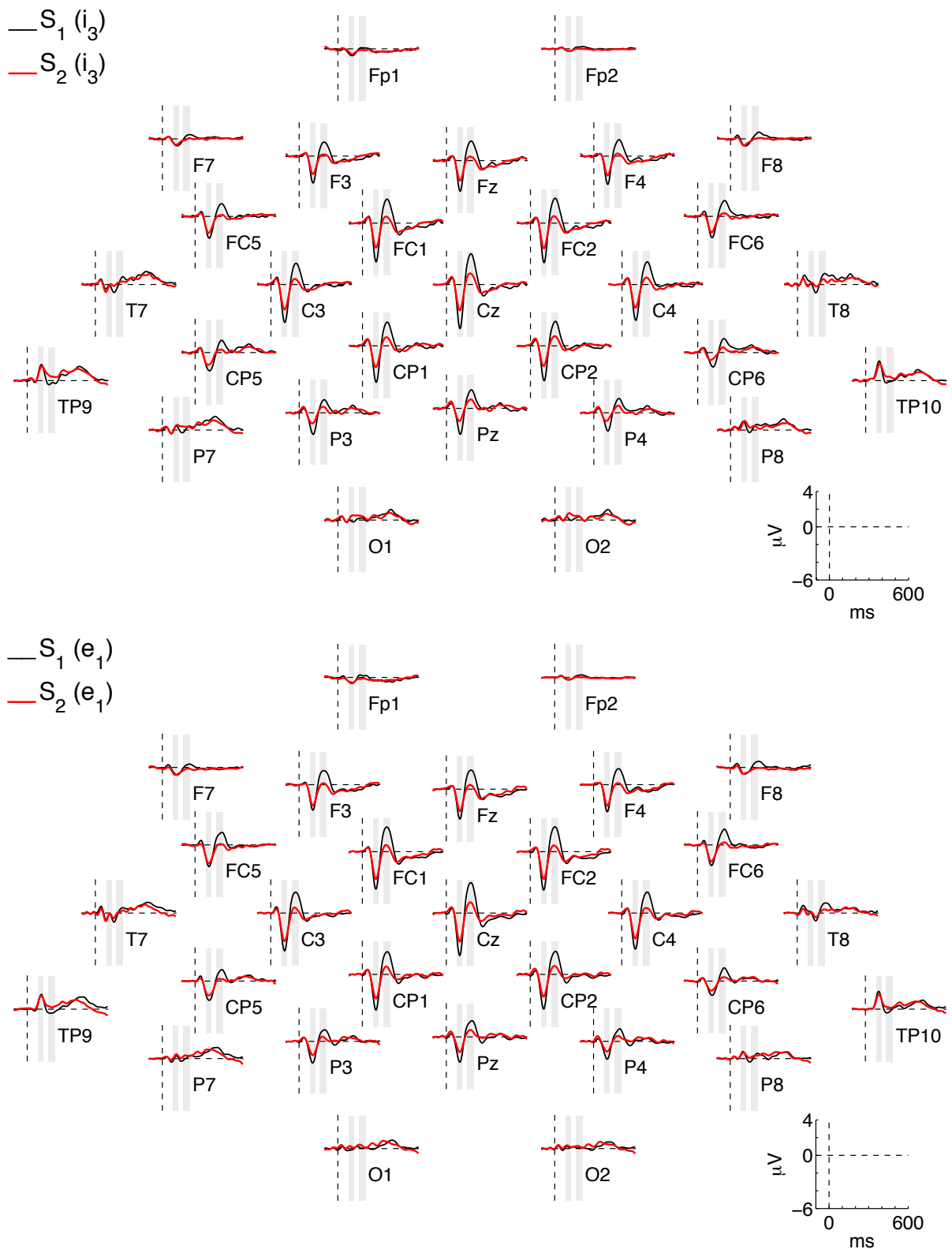


(Grand Averages; N = 26)

3.2.2.1 Atenuação da resposta a S_2

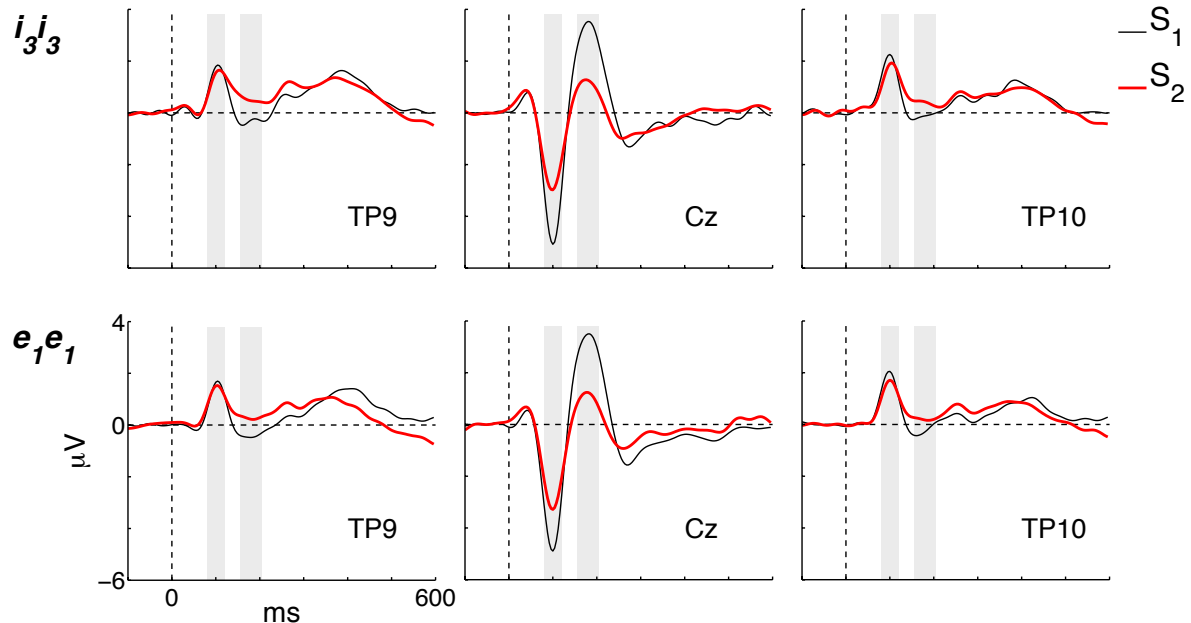
As médias das respostas entre os participantes para os pares de estímulos idênticos são mostradas nas figuras 3.9 e 3.10. Nota-se facilmente a atenuação dos componentes N1 e P2 nas respostas a S_2 , sobretudo nas regiões próximas ao vértice (Cz), onde esses componentes atingiram amplitudes máximas (veja também a Figura 3.8 acima). A respeito das medidas do subcomponente $N1_{c1}$ nas derivações TP9 e TP10, as amplitudes parecem pouco diferir – embora amplitudes ligeiramente menores nas respostas a S_2 tenham sido observadas em ambas as derivações e para ambos os pares de sons (Figura 3.10).

Figura 3.9 – PEs em resposta aos sons S_1 e S_2 em pares de sons idênticos.



São representadas as respostas médias entre os participantes nas 29 derivações empregadas. Parte superior: par $i_3 - i_3$. Parte inferior: par $e_1 - e_1$. (*Grand Averages*; $N = 26$).

Figura 3.10 - PEs em resposta aos sons S_1 e S_2 em pares de sons idênticos.



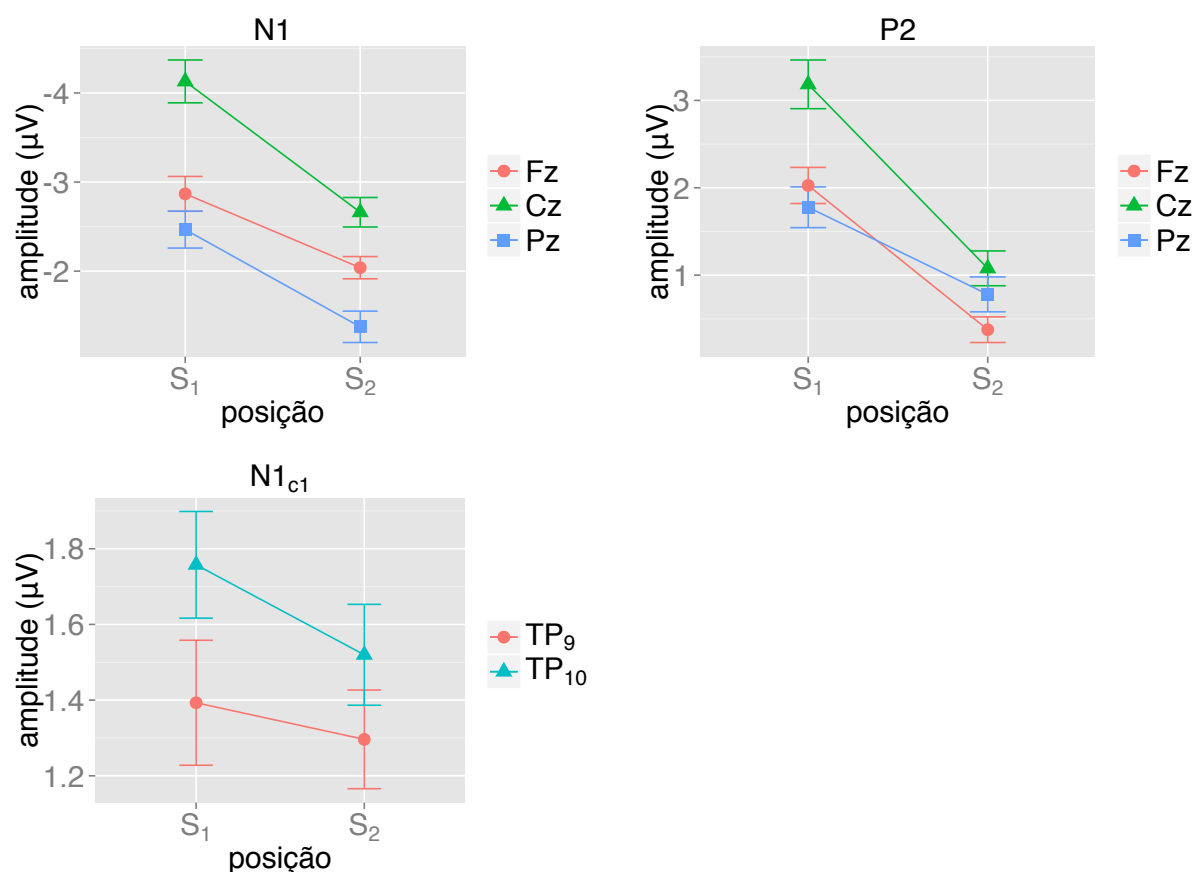
Respostas médias entre os participantes nas derivações Cz, TP9 e TP10. As áreas em cinza indicam as janelas de tempo usadas nas medidas das amplitudes médias de N1 e P2. Linha superior: par $i_3 - i_3$. Linha inferior: par $e_1 - e_1$. (*Grand Averages*; N = 26).

No que se refere às medidas de amplitude de N1 e P2 nas derivações da linha média (Fz, Cz e Pz), para ambos os componentes foram observados efeitos de atenuação na resposta a S_2 em comparação a S_1 . Para ambos os componentes, os resultados da ANOVA indicam uma interação significativa entre os fatores POSIÇÃO e DERIVAÇÃO (**N1**: $F_{(2;50)} = 14,17$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,723$; $\eta_p^2 = 0,36$; **P2**: $F_{(2;50)} = 33,33$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,812$; $\eta_p^2 = 0,57$), além de efeitos principais de POSIÇÃO (**N1**: $F_{(1;25)} = 39,88$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,62$; **P2**: $F_{(1;25)} = 51,34$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,67$) e de DERIVAÇÃO (**N1**: $F_{(2;50)} = 50,62$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,669$; $\eta_p^2 = 0,735$; **P2**: $F_{(2;50)} = 23,82$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,873$; $\eta_p^2 = 0,49$). Para explorar essa interação POSIÇÃO \times DERIVAÇÃO, foram efetuadas ANOVAs separadas para cada uma das três derivações (com valores p devidamente ajustados pela correção de Bonferroni).

Em todos os casos foram encontrados efeitos significativos de POSIÇÃO em que as respostas a S_2 apresentam amplitudes menores que as respostas a S_1 . N1 foi atenuado em 29% em Fz, 36% em Cz e 44% em Pz. A interação pode ser explicada por diferenças entre os graus de atenuação observados nas três derivações (Figura 3.11). O efeito é significativo em Fz ($F_{(1;25)} = 17,82$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,42$), Cz ($F_{(1;25)} = 52,43$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,68$) e Pz ($F_{(1;25)} = 38,51$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,61$). P2 foi atenuado em 82% em Fz, 66% em Cz e 56% em Pz. O efeito é

significativo nas três derivações (**Fz**: $F_{(1;25)} = 56,69$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,69$; **Cz**: $F_{(1;25)} = 66,25$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,73$; **Pz**: $F_{(1;25)} = 19,73$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,44$).

Figura 3.11 – Amplitudes médias de N1, P2 e N1_{c1} nas respostas a S₁ e S₂.



Nas derivações TP9 e TP10, não foram detectados efeitos significativos de atenuação do subcomponente N1_{c1}, embora a ANOVA indique alguma tendência nessa direção ($F_{(1;25)} = 3,31$; $p = 0,081$; $\eta_p^2 = 0,12$). Numericamente, a resposta a S₂ foi atenuada em 7% em TP9 e 14% em TP10. Um efeito significativo do fator DERIVAÇÃO indica amplitudes significativamente maiores em TP10 ($F_{(1;25)} = 5,67$; $p = 0,025$; $\eta_p^2 = 0,19$).

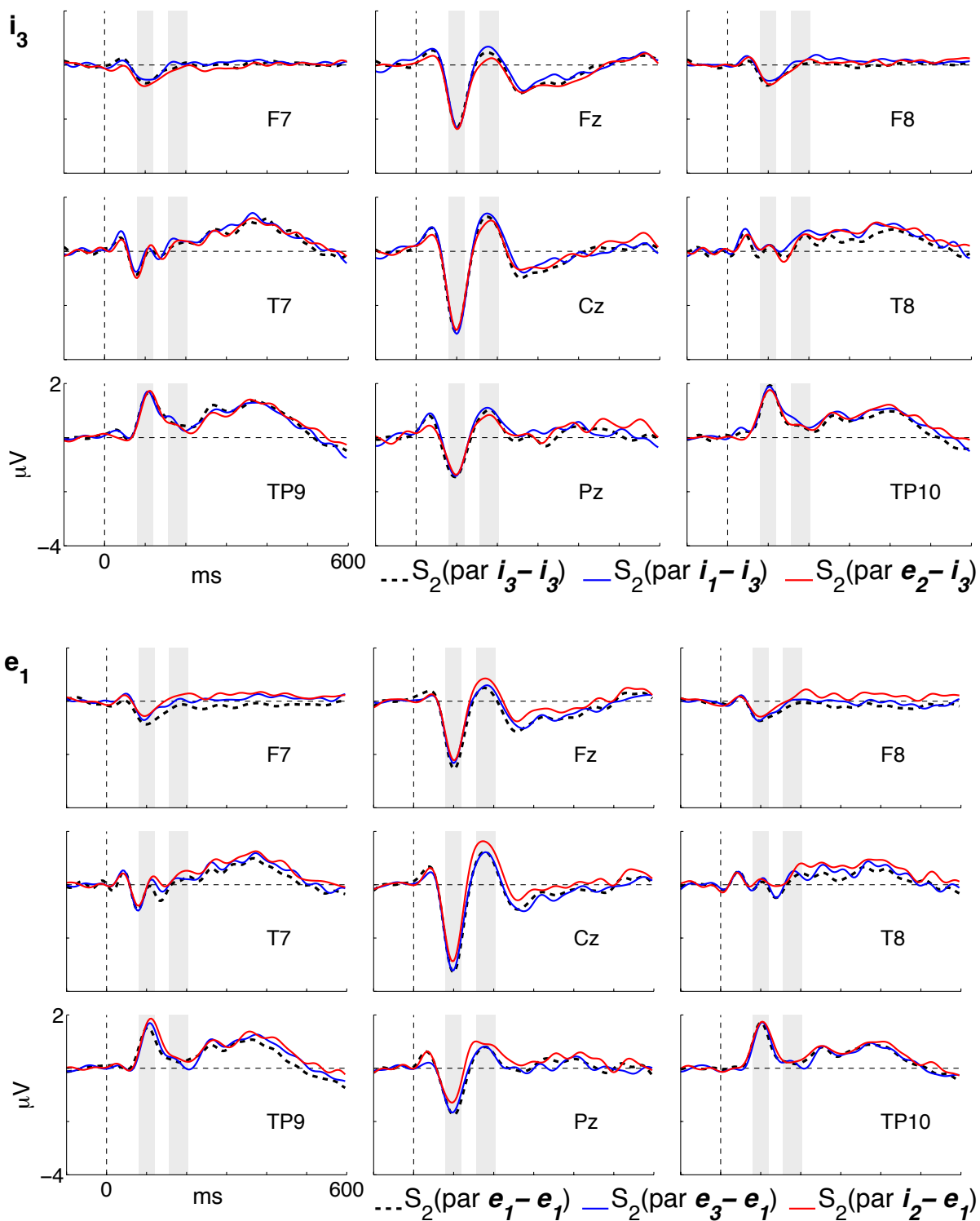
3.2.2.2 *Adaptação específica ao estímulo*

Sobre as comparações das respostas a S₂ entre pares de *sons idênticos*, pares intra-categoria e pares inter-categorias, não foram encontrados efeitos significativos do fator TIPO DE PAR em nenhum dos componentes estudados. Portanto, os dados não corroboram as hipóteses 2 e 3 – referentes,

respectivamente, à *adaptação específica ao estímulo* e à *adaptação específica à categoria*. As medidas de amplitude do componente N1 nas respostas a S_2 (tanto nas derivações da linha média como em TP9/TP10) são semelhantes entre os três tipos de par de sons (figuras 3.12 e 3.13). No caso do componente P2, a ANOVA sugere uma tendência à interação entre os fatores TIPO DE PAR e VOGAL ($F_{(2;50)} = 3,01$; $p = 0,07$; $\varepsilon = 0,865$; $\eta_p^2 = 0,11$). A este respeito, observa-se que o P2 em resposta a S_2 parece seguir padrões diferentes entre as duas vogais, isto é, i_3 e e_1 . A amplitude de P2 é mais elevada no par inter-categorias (figuras 3.12 e 3.13) no segundo caso (e_1 como S_2), mas não no primeiro (i_3 como S_2). Contudo, uma vez que a interação em questão não alcançou significância, o exame da mesma não será levado adiante.

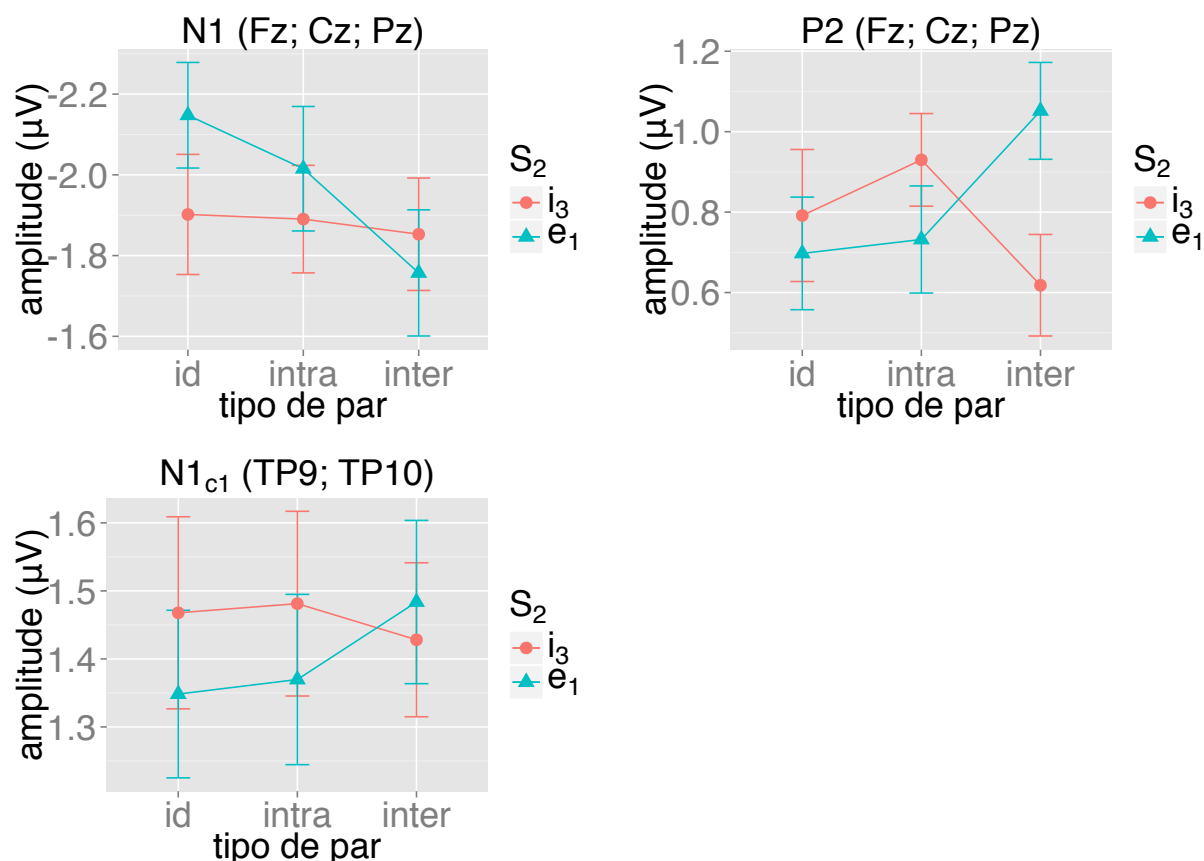
Efeitos significativos de DERIVAÇÃO ocorreram em ambos os componentes medidos na linha média (**N1**: $F_{(2;50)} = 61,54$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,673$; $\eta_p^2 = 0,71$; **P2**: $F_{(2;50)} = 12,72$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,732$; $\eta_p^2 = 0,34$). Análises de tendências indicam que, na resposta a S_2 , a amplitude de N1 é maior em Cz que em Fz e Pz (*efeito quadrático*: $F_{(1;25)} = 286,17$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,92$) e maior em Fz que em Pz (*efeito linear*: $F_{(1;25)} = 21,50$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,46$), e que a amplitude de P2 é maior em Cz que em Fz e Pz (*efeito quadrático*: $F_{(1;25)} = 47,39$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,66$). Uma interação significativa entre VOGAL e DERIVAÇÃO foi encontrada para P2 ($F_{(2;50)} = 6,24$; $p = 0,014$; $\varepsilon = 0,598$; $\eta_p^2 = 0,20$) e, a fim de examiná-la, as três derivações foram analisadas separadamente. Porém, em nenhuma delas foi obtido efeito significativo do fator VOGAL. De maneira semelhante, uma interação VOGAL \times DERIVAÇÃO foi também observada na análise do $N1_{c1}$ ($F_{(1;25)} = 4,45$; $p = 0,045$; $\eta_p^2 = 0,15$), mas as respostas não diferem entre as vogais em nenhuma das derivações (TP9 e TP10).

Figura 3.12 – Respostas a S_2 nos pares de sons *idênticos* (em preto tracejado), pares intra-categoria (em azul) e pares inter-categorias (em vermelho).



Na parte superior são mostradas respostas ao som i_3 apresentado como S_2 ; na parte inferior, respostas ao som e_1 apresentado como S_2 . (*Grand Averages*; $N = 26$).

Figura 3.13 – Amplitudes médias de N1, P2 e N1_{c1} em resposta a S₂ em pares de sons idênticos (“id”), pares intra-categoria (“intra”) e pares inter-categorias (“inter”).



Os gráficos apresentam as médias marginais das amplitudes de N1 e P2 em Fz, Cz e Pz e de N1_{c1} em TP9 e TP10.

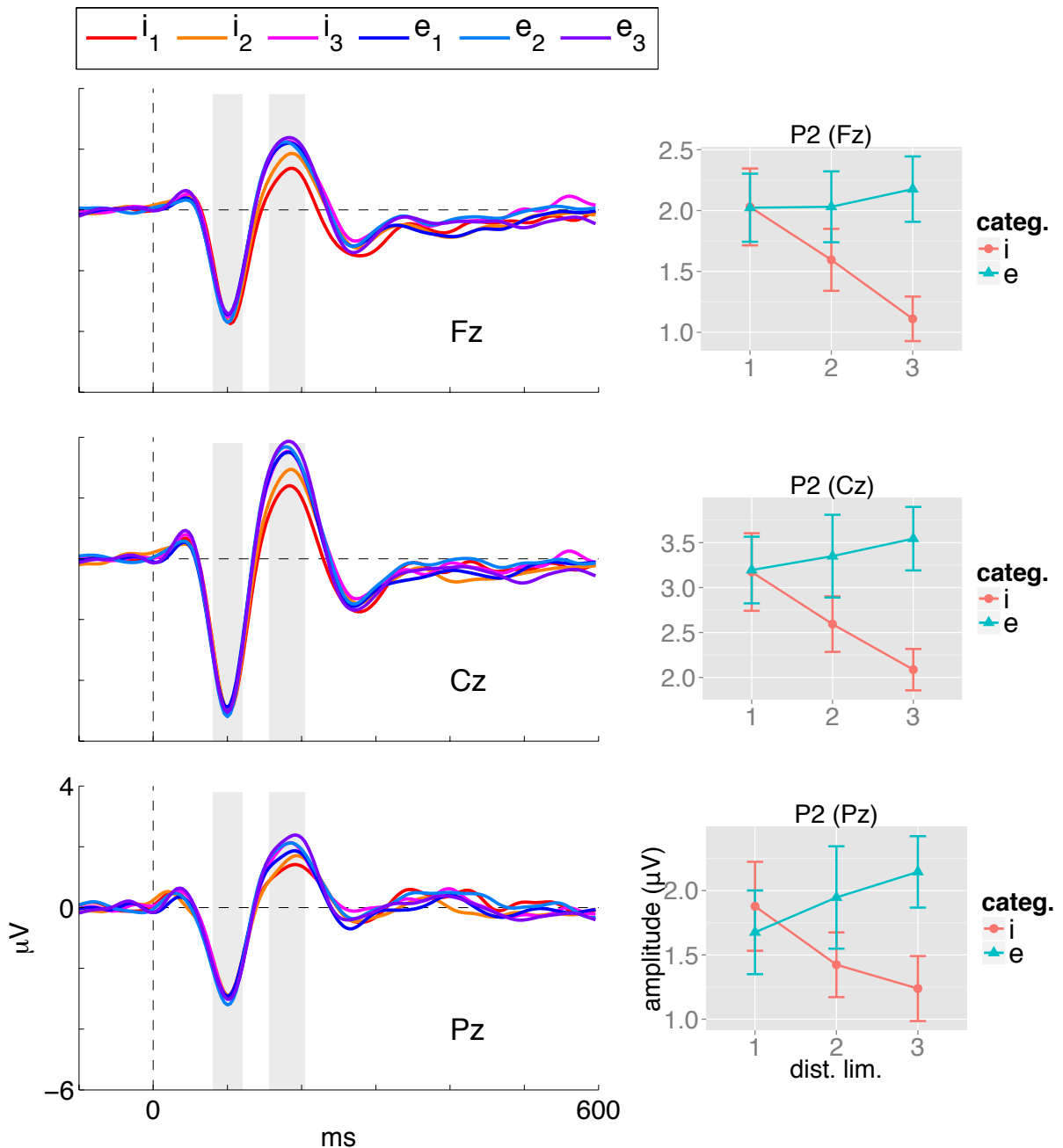
3.2.2.3 Respostas a S₁: efeitos relacionados às diferenças entre as vogais

As respostas aos sons usados como S₁ foram também exploradas. Os PEs obtidos nas derivações da linha média são mostrados na Figura 3.14. As amplitudes de N1 são notadamente semelhantes nas respostas às seis vogais, ao passo que, em P2, as curvas sugerem uma variação sistemática em que as amplitudes aumentam¹⁴ de *i*₁ a *e*₃. Nenhum efeito ou interação envolvendo diferenças entre as vogais foi detectado em N1. Um efeito principal de DERIVAÇÃO ($F_{(2;50)} = 60,56$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,779$; $\eta_p^2 = 0,71$), juntamente com os resultados da análise de tendências em que são observados um efeito linear ($F_{(1,25)} = 5,13$; $p = 0,033$; $\eta_p^2 = 0,17$) e um efeito quadrático ($F_{(1,25)} = 219,51$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,90$), indicam que N1 apresenta

¹⁴ Note que os números 1, 2 e 3 no eixo horizontal dos gráficos representam os três níveis do fator DISTÂNCIA DO LIMITE, e não os subscritos usados para denominar os seis sons.

amplitudes significativamente maiores em Cz e menores em Pz (de forma consistente com a topografia fronto-central esperada para este componente).

Figura 3.14 - Respostas a S_1 em Fz, Pz e Cz.



Coluna da esquerda: PEs (*Grand Averages*; N = 26). Coluna da direita: os gráficos ilustram a interação entre os fatores CATEGORIA (*categ.*) e DISTÂNCIA DO LIMITE (*dist.lim.*).

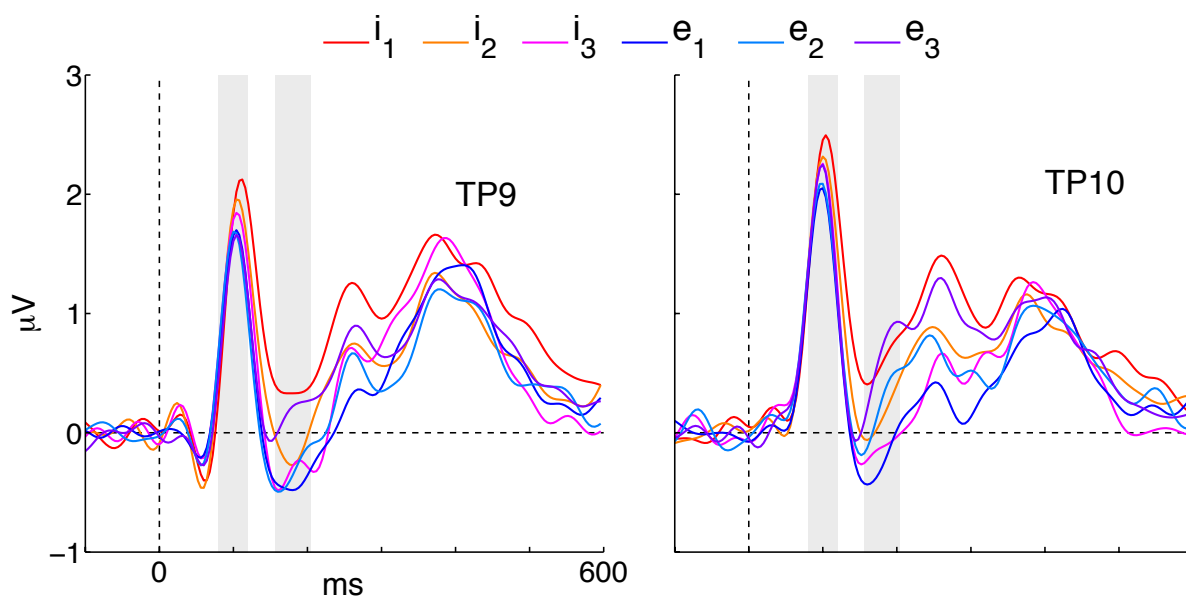
Sobre P2, foram obtidos efeitos principais significativos dos fatores CATEGORIA ($i/i \times e/e$; $F_{(1;25)} = 11,69$; $p = 0,002$; $\eta_p^2 = 0,32$) e DERIVAÇÃO ($F_{(2;50)} = 34,64$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,907$; $\eta_p^2 = 0,58$), e interações significativas entre DISTÂNCIA

DO LIMITE ($[i_1 e_3] \times [i_2 e_2] \times [i_3 e_2]$) e CATEGORIA ($F_{(2;50)} = 6,63$; $p < 0,004$; $\varepsilon = 0,91$; $\eta_p^2 = 0,21$), entre CATEGORIA e DERIVAÇÃO ($F_{(2;50)} = 6,34$; $p = 0,008$; $\varepsilon = 0,758$; $\eta_p^2 = 0,20$) e entre DISTÂNCIA DO LIMITE e DERIVAÇÃO ($F_{(4,100)} = 3,0$; $p = 0,04$; $\varepsilon = 0,698$; $\eta_p^2 = 0,11$). O efeito de DERIVAÇÃO está associado a maiores amplitudes em Cz em comparação às outras duas derivações, como sugere o efeito quadrático ($F_{(2,50)} = 98,63$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,80$) detectado na análise de tendências. A respeito do efeito de CATEGORIA, verifica-se que, de maneira geral, as amplitudes de P2 são maiores para a categoria /e/ comparada à categoria /i/. Contudo, a influência desse fator deve ser interpretada à luz de sua interação com o fator DISTÂNCIA DO LIMITE. Observa-se, na Figura 3.14, que a amplitude de P2 decresce com o aumento da distância do limite na categoria /i/, mas aumenta na categoria /e/ – padrão sugestivo de que, num *continuum* entre i_1 e e_3 , vogais mais altas estejam associadas a amplitudes menores e vogais mais baixas a amplitudes maiores¹⁵. Esta interação foi explorada por meio de duas ANOVAs, uma para cada categoria vocálica – sendo os valores p ajustados pela correção de Bonferroni. Um efeito significativo de DISTÂNCIA DO LIMITE foi encontrado para a categoria /i/ ($F_{(2;50)} = 6,40$; $p = 0,02$; $\varepsilon = 0,739$; $\eta_p^2 = 0,20$), mas não para a categoria /e/. Em consonância com a observação de que P2 aumenta em amplitude de i_1 a i_3 , apenas um efeito linear foi detectado na análise de tendências ($F_{(1;25)} = 8,09$; $p = 0,018$; $\eta_p^2 = 0,24$).

A interação CATEGORIA \times DERIVAÇÃO pode ser entendida como resultante de diferenças entre as derivações no efeito do fator CATEGORIA, que foi significativo em Fz ($F_{(1;25)} = 13,53$; $p = 0,003$; $\eta_p^2 = 0,35$) e Cz ($F_{(1;25)} = 15,55$; $p = 0,002$; $\eta_p^2 = 0,38$), mas não em Pz. Em relação à interação DISTÂNCIA DO LIMITE \times DERIVAÇÃO, não foram encontrados efeitos significativos de DISTÂNCIA DO LIMITE nas análises efetuadas para cada derivação.

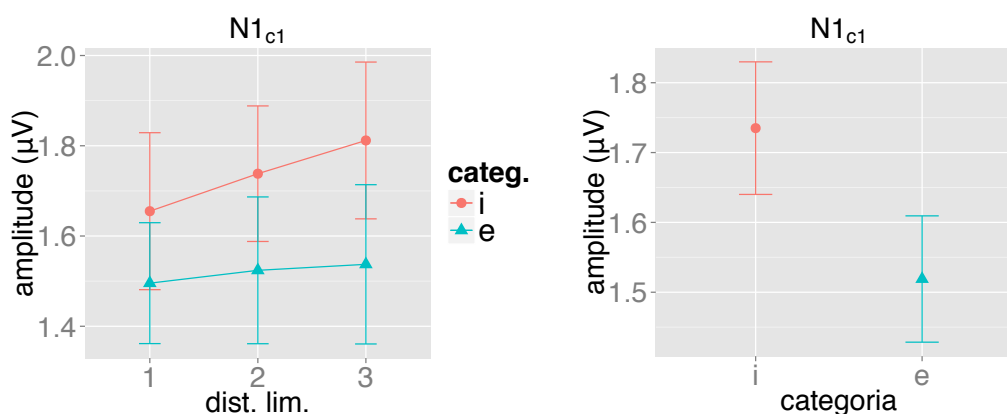
¹⁵ Note que, na categoria /i/, a distância do limite e o grau de abertura da vogal variam em direções opostas, ao passo que, na categoria /e/, ambas variam na mesma direção.

Figura 3.15 - Resposta a S_1 em TP9 e TP10. (*Grand Averages*; $N = 26$).



Os PEs obtidos em TP9 e TP10 são mostrados na Figura 3.15. A amplitude de $N1_{c1}$ é maior para a categoria /i/ que para a categoria /e/ ($F_{(1;25)} = 6,51$; $p = 0,017$; $\eta_p^2 = 0,21$) e maior em TP10 que em TP9 ($F_{(1;25)} = 13,33$; $p = 0,004$; $\eta_p^2 = 0,29$). Em comparação à derivação TP10, as amplitudes de $N1_{c1}$ em TP9 parecem se agrupar de maneira mais consistente com as duas categorias. Contudo, não há evidência de interação entre CATEGORIA e DERIVAÇÃO ($F_{(1;25)} = 0,02$; $p = 0,88$; $\eta_p^2 = 0,00$). Os gráficos na Figura 3.16 ilustram as comparações entre as amplitudes de $N1_{c1}$ nas duas categorias e nos três níveis de DISTÂNCIA DO LIMITE.

Figura 3.16 - Amplitude do subcomponente $N1_{c1}$ em resposta a S_1 .



Esquerda: amplitudes médias em função da DISTÂNCIA DO LIMITE. Direita: médias marginais nas categorias /i/ e /e/.

3.3 DISCUSSÃO

Respostas com latências e amplitudes típicas de N1 e P2 foram observadas em todas as condições experimentais – isto é, nas posições S_1 e S_2 e para os seis sons empregados. O N1 se apresenta como uma deflexão negativa cujo pico ocorre por volta dos 100 ms, máxima no vértice (Cz), com amplitudes maiores em derivações frontais que em derivações posteriores e inversão de polaridade nas derivações posicionadas na região dos mastoides (TP9 e TP10). O P2 se apresenta como uma deflexão positiva com pico a cerca de 180 ms, máxima no vértice e, em comparação ao N1, distribuída mais simetricamente no eixo anteroposterior.

As amplitudes de N1 medidas na linha média (Fz, Cz, Pz) e em TP9/TP10 parecem refletir processos neurais distintos, modulados diferentemente pelos fatores manipulados no experimento: na linha média, um efeito claro de adaptação; em TP9/TP10, variações associadas às diferenças entre os sons apresentados. Neste último caso, a deflexão positiva ali observada é considerada como uma manifestação do subcomponente supratemporal aqui denominado $N1_{c1}$ que, na linha média, estaria misturado a um ou mais subcomponentes gerados em fontes diferentes no córtex auditivo, áreas frontais ou outras não específicas à modalidade sensorial (GIARD *et al.*, 1994; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; WOODS, 1995; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011). O P2 é modulado tanto pela adaptação como por efeitos espectrais nos estímulos. Para nenhuma das respostas, os dados indicam adaptação específica ao estímulo.

Efeitos robustos de adaptação foram verificados em ambas as respostas medidas na linha média, mas não em $N1_{c1}$. A atenuação observada é predominantemente póstero-central no N1 (maior em Pz e Cz que em Fz), e predominantemente fronto-central no P2 (maior em Fz e Cz que em Pz). Em nenhum dos componentes foram detectados efeitos significativos de adaptação específica ao estímulo – sejam eles relacionados a distinções acústicas ou entre categorias. Ao menos no caso de N1, os dados sugerem que o efeito de fato não ocorre, isto é, que não se trata apenas de falta de significância estatística. Em nenhum caso as amplitudes médias de N1 (sejam medidas na linha média ou em TP9/TP10) são numericamente maiores em pares de sons diferentes em comparação aos pares de sons idênticos ou em pares inter-categorias em comparação a pares intra-categoria. Tais resultados são, portanto, interpretados como evidência da ausência de efeitos de adaptação específica ao estímulo (ou à

categoria) sobre o componente N1 obtido nas condições aqui descritas. Quanto ao componente P2, os resultados são menos claros. Para a vogal /e/, mas não para a vogal /i/, a amplitude de P2 em resposta a S_2 é numericamente maior no par inter-categorias, causando uma interação marginalmente significativa entre os fatores VOGAL e TIPO DE PAR. A este respeito, é relevante o estudo de campos magnéticos evocados em que Altman (2008) observou efeitos de adaptação não-específica no N1m e de adaptação específica ao estímulo no P2m em respostas a pares de sons complexos – vocalizações de animais ou ruído branco filtrado a partir das envoltórias espectrais dessas vocalizações. Sobre a possibilidade de que alguma característica do som ou das circunstâncias em que o registro é realizado torne o P2 mais ou menos propenso a efeitos de atenuação específica ao estímulo, isso deve ser investigado futuramente.

Em contraste com os resultados aqui relatados, estudos anteriores fornecem evidências de adaptação específica ao estímulo no componente N1. Usando sequências de estímulos formadas por dois tons simples, *A* e *B*, que se alternavam repetidamente, Näätänen *et al.* (1988) observaram aumentos na amplitude de N1 associados a aumentos da diferença entre as frequências de *A* e *B*. Yagcioglu e Ungan (2008) relatam menores amplitudes de N1 em resposta a tons simples apresentados em uma sequência monótona de sons idênticos em comparação a sequências em que dois tons de frequências diferentes se alternavam ou ocorriam em ordem aleatória. Näätänen *et al.* (1988) e Butler (1972) observaram efeitos análogos em tons simples que alternavam não em frequência, mas na localização de sua fonte. Em respostas a tons simples que variavam aleatoriamente em frequência, Herrmann e colaboradores verificaram decréscimos na amplitude de N1 associados à proximidade do estímulo ao centro da faixa de variação, resultado interpretado como evidência de adaptação específica ao estímulo (HERRMANN; HENRY; OBLESER, 2013; HERRMANN; SCHLICHTING; OBLESER, 2014).

Há, todavia, ao menos duas importantes diferenças entre aqueles estudos e o presente. Primeiramente, os sons usados como estímulos nos referidos estudos foram tons simples¹⁶, ao passo que os estímulos aqui empregados (vogais), caracterizados por picos em torno de certas frequências, apresentam considerável

¹⁶ Ondas sonoras que seguem um padrão senoidal, caracterizadas pela presença de energia acústica em uma faixa muito estreita em torno de uma única frequência.

complexidade espectral comparativamente aos tons simples. É possível que as respostas a estes dois tipos de sons sejam moduladas diferentemente por efeitos relacionados à repetição. Em um estudo de campos magnéticos evocados, Pantev *et al.* (2004) apresentam evidências de que o componente N1 pode ser atenuado não apenas por uma perda de sensibilidade dos geradores causada pela ativação prévia das mesmas unidades neurais (adaptação), mas também por um mecanismo de inibição lateral pelo qual a ativação de unidades neurais maximamente responsivas a uma determinada frequência causa inibição de unidades maximamente responsivas a frequências próximas. Assim, a atividade neural relacionada à frequência de um formante da vogal S_1 poderia provocar uma inibição de neurônios sintonizados a outras frequências e conseqüentemente uma modulação da resposta à vogal consecutiva S_2 . O resultado seria uma combinação entre efeitos de adaptação e inibição lateral que não poderia ser decomposta a partir das medidas e do delineamento experimental empregados neste estudo. Também digno de nota é o fato de que um tom simples é caracterizado por uma única frequência, que determina tanto sua periodicidade F_0 (fundamental para a percepção da altura, ou *pitch*) quanto seu conteúdo espectral. Já os sons complexos podem variar em F_0 enquanto a envoltória espectral é mantida (resultando em um mesmo timbre em diferentes alturas), e vice versa. A percepção da altura e a percepção do conteúdo espectral envolvem mecanismos e processos distintos no cérebro (veja, por exemplo, MCLACHLAN; WILSON, 2010). Os resultados citados sobre a seletividade da atenuação de N1 a frequências de tons simples não permitem que os efeitos observados sejam atribuídos especificamente a processos relacionados à percepção da altura ou à análise do conteúdo espectral, ou ainda a ambas. Já as vogais empregadas no presente estudo foram sintetizadas todas com o mesmo contorno de F_0 e variaram apenas no conteúdo espectral, de maneira que os resultados reflitam a análise deste último atributo.

Em segundo lugar, as seqüências de estímulos nos estudos de Butler (1972), Näätänen *et al.* (1988) e Yagcioglu e Ungan (2008) são formadas por sons que se alternam, sendo fixo o intervalo de tempo entre os mesmos. Já neste trabalho, foram apresentados pares de sons S_1S_2 em que o intervalo entre estímulos (600 ms) é menor que o intervalo entre o segundo som de um par e o primeiro do par consecutivo (1800-2200 ms). Isto permite a distinção entre uma condição de estimulação (S_2) em que são esperados efeitos de atenuação relativamente

pronunciados e uma condição (S_1) em que tais efeitos seriam consideravelmente mais fracos. Torna-se assim possível observar o efeito de “atenuação de curto prazo” sobre a resposta a S_2 , atribuído à adaptação causada pela apresentação de S_1 . Protocolos compostos por pares de sons parecem suficientes para a observação de pelo menos a parte principal deste efeito. São encontrados na literatura resultados indicativos de que, em séries de mais de dois sons (entre 3 e 10), há atenuação significativa de N1 entre o primeiro e o segundo, mas não entre o segundo e os demais – evidências obtidas a partir de MEG (ROSBURG, 2004; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010), EEG de superfície (BUDD *et al.*, 1998; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; ROSBURG *et al.*, 2006; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011) e EEG intracraniano (ROSBURG *et al.*, 2004, 2006). Rosburg *et al.* (2010) verificaram padrões semelhantes em P2. Contudo, há também evidências de um efeito lento de atenuação de N1, usualmente denominado “habituação de longo prazo”, que se manifesta na comparação entre longas sequências sucessivas de sons (BRATTICO; TERVANIEMI; PICTON, 2003; WOODS; ELMASIAN, 1986). Deste modo, a atenuação de N1 observada nos estudos que empregam (com intervalos constantes entre estímulos) sequências de sons alternantes ou aleatoriamente variáveis pode resultar de uma combinação entre os efeitos de “curto” e de “longo prazo”, não sendo seguro, portanto, atribuir o caráter de especificidade ao estímulo a nenhum dos dois tomado isoladamente.

Os efeitos de adaptação observados e a ausência de especificidade ao estímulo nas respostas a S_2 sugerem, particularmente no caso de N1, adaptação não-específica ao menos em condições passivas de estimulação – em que os participantes não estão engajados em nenhuma tarefa que dirija o foco da atenção para o estímulo. Tian e Poeppel (2013) verificaram maiores amplitudes de N1m e P2m na resposta a uma sílaba-teste (/ba/ ou /ki/) quando precedida por uma sílaba diferente (/ki/ ou /ba/) que quando precedida por uma sílaba idêntica. Um padrão similar ocorreu em P2m quando a sílaba-teste foi precedida não por um som, mas pela imaginação auditiva de uma das sílabas. A 3,4 segundos antes da apresentação da sílaba-teste, os participantes do experimento de Tian e Poeppel recebiam pistas visuais que os orientavam a realizar uma das seguintes ações: articular silenciosamente uma das sílabas, imaginar a articulação de uma das sílabas, imaginar o som de uma das sílabas ou ouvir o som de uma sílaba que

precederia a sílaba-teste. Em contraste com o presente estudo, em que os participantes eram orientados a ignorar os sons e assistir a um vídeo, o experimento de Tian e Poeppel envolve atenção dirigida aos estímulos. Ahveninen *et al.* (2006) encontraram evidências de que a atenção pode de fato modular a adaptação de N1. Seus resultados indicam que a atenção sobre a identidade fonética de vogais reduz seletivamente a adaptação do N1m em pares de vogais foneticamente distintas (/ø/ e /æ/ do finlandês), ao passo que a atenção sobre a localização dos sons reduz a adaptação em pares de vogais foneticamente idênticas mas localizadas em pontos diferentes do espaço.

A adaptação não-específica de N1 aqui observada não confere apoio à proposta de que a MMN, uma resposta que não depende da atenção para que seja gerada, resulta de efeitos de adaptação específica ao estímulo sobre N1. De acordo com esta proposta (JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2004; MAY; TIITINEN, 2010), a apresentação de um estímulo desviante ativaria unidades neurais geradoras de N1 que não se encontram no estado de menor responsividade provocado pela repetição dos estímulos-padrão, ocasionando a negatividade adicional interpretada como o componente MMN. Mesmo que processos semelhantes ocorram em populações corticais (ULANOVSKY *et al.*, 2004; ULANOVSKY; LAS; NELKEN, 2003), os presentes resultados indicam que, ao menos no caso do efeito de atenuação de curto prazo aqui investigado, tais processos não se manifestam em registros extracranianos de N1.

A MMN é sensível tanto a diferenças meramente acústicas entre sons da fala como a distinções entre categorias específicas à língua (KIRMSE *et al.*, 2008; NENONEN *et al.*, 2003; WINKLER; LEHTOKOSKI; *et al.*, 1999; ZHANG, YANG *et al.*, 2005; revisões em NÄÄTÄNEN, 2001; PHILLIPS, 2001; SILVA; ROTHE-NEVES, 2014). Ambos os tipos de distinção foram considerados aqui, uma vez que, além de pares de sons idênticos, foram usados pares intra- e inter-categorias, sendo as amplitudes de N1 nas resposta a S_2 semelhantes entre as três condições. No capítulo 4, abaixo, são apresentados resultados de um estudo da MMN em que os estímulos foram selecionados a partir do mesmo conjunto de vogais usado no experimento aqui descrito, sendo observado um aumento significativo em amplitude relacionado ao limite entre as categorias /i/ e /e/.

Embora não tenham sido obtidas evidências de especificidade ao estímulo nos padrões de adaptação das respostas a S_2 , as respostas a S_1 apresentam

modulações associadas à variação entre os seis estímulos. A amplitude de P2 variou sistematicamente com o grau de abertura (ou altura) das vogais. Numericamente, vogais mais abertas, caracterizadas principalmente por um F_1 mais elevado, estão associadas a maiores amplitudes. Estatisticamente, este padrão se reflete na ANOVA como uma interação entre os fatores “DISTÂNCIA DO LIMITE” e “CATEGORIA” – ou seja, a amplitude aumenta com a distância do limite na categoria /i/, mas decresce na categoria /e/. Contudo, separadas as categorias /i/ e /e/, o efeito é significativo apenas na primeira. É possível especular sobre um efeito não linear que se aproxima de um ponto de saturação à medida em que o grau de abertura é aumentado, de maneira que, a partir de um certo nível de abertura próximo ao limite entre as categorias, o efeito não apresente magnitude suficiente para atingir significância estatística. Cumpre salientar, a este respeito, que os seis sons variaram em passos iguais não em Hertz, mas na escala psicofísica Bark – que expressa, em unidades de “bandas críticas”, a tonotopia no sistema auditivo humano (FASTL; ZWICKER, 2007; TRAUNMÜLLER, 1990). Para um dado intervalo em Hertz, o intervalo correspondente em Bark diminui com o aumento da frequência. Portanto, admitindo que a escala Bark representa adequadamente as distâncias perceptivas entre as vogais, não é provável que a forma com que o referido efeito se apresenta decorra de variações nestas distâncias.

Nas medidas realizadas em TP9/TP10, verifica-se que o subcomponente $N1_{c1}$ apresenta maiores amplitudes nos sons classificados como /i/ em comparação aos sons classificados como /e/. Este resultado concorda com relatos anteriores de maiores amplitudes de $N1_m$ para /i/ que para /a/ (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004; OBLESER *et al.*, 2003) ou /e/ (EULITZ; OBLESER; LAHIRI, 2004) e maiores amplitudes para vogais altas que para vogais não-altas (SCHARINGER; IDSARDI; POE, 2011). Não foram observadas variações sistemáticas relacionadas a diferenças entre sons dentro de uma mesma categoria, dada a ausência de efeito ou interações envolvendo o fator DISTÂNCIA DO LIMITE. Embora levantem questões interessantes sobre a natureza das representações neurais subjacentes à geração de $N1$, estes resultados não são suficientes como evidência segura de que tais representações incluam informação sobre categorias vocálicas. Ainda que apenas o efeito do fator CATEGORIA tenha sido detectado, este deve ser considerado com cuidado. Não se deve ignorar a possibilidade de que as respostas se agrupem de uma maneira diferente da que aquele fator sugere – isto é, nas categorias /i/ e /e/.

Nota-se, por exemplo, que a diferença entre as respostas a i_3 e e_2 não é maior que a diferença entre as respostas a i_1 e i_3 (figuras 3.15 e 3.16).

Scharinger, Idsardi e Poe (2011) mostraram que variações na localização de um dipolo supratemporal que modela a fonte do N1m em resposta a vogais naturais são melhor explicadas por um modelo estatístico baseado em traços fonológicos distintivos (que estabelecem categorias fônicas) comparado a um modelo baseado em variações contínuas dos formantes. Entretanto, como os próprios autores reconhecem, os parâmetros acústicos relevantes (frequências de formantes) dos estímulos empregados naquele estudo se agrupam em torno das categorias vocálicas testadas, de modo que a vantagem do modelo “categórico” pode resultar não da organização neural subjacente ao N1m, mas do conjunto de estímulos e sua distribuição no espaço de vogais possíveis.

Bidelman, Moreno e Alain (2013) apresentam resultados interpretados como evidências de que não N1, mas P2 reflete a percepção categórica de cinco sons vocálicos de um *continuum* entre as vogais do inglês /a/ e /u/. Nas janelas de tempo correspondentes tanto a N1 como a P2, as amplitudes foram menos negativas/mais positivas para sons classificados pelos participantes como /a/. Contudo, uma análise das dissimilaridades entre as respostas evocadas forneceu uma previsão adequada das respostas na tarefa de classificação apenas quando efetuada a partir de P2. A clara correspondência entre as curvas de previsão e os dados de classificação indicariam que P2 reflete o processamento de informações referentes a categorias vocálicas. Há, porém, um problema na escolha dos estímulos que torna esta interpretação questionável. O *continuum* entre as vogais /i/ e /u/ cruza outras categorias vocálicas do inglês, como /u/, /ɪ/, /o/ ou /ɔ/ (HILLENBRAND *et al.*, 1995; PETERSON; BARNEY, 1952). Deste modo, é provável que um ou mais entre os cinco sons usados por Bidelman e colaboradores sejam na verdade identificados por falantes do inglês como outras vogais que não /a/ ou /u/. Como os participantes do estudo tinham apenas “a” e “u” como alternativas de resposta, não é de surpreender que tenham estabelecido algum critério que separasse os sons entre duas classes úteis para a execução da tarefa (que não refletem categorias vocálicas do inglês). De modo interessante, sendo a tarefa efetuada durante a aquisição dos PEs, as amplitudes de P2 se mostraram fortemente relacionadas a essas classes de resposta. Entretanto, os resultados não proporcionam, de maneira convincente, evidências de atividade neural relacionada a categorias fônicas.

Em contraste com o estudo supracitado, o experimento descrito neste capítulo usou como estímulos seis sons de duas categorias vocálicas adjacentes no português. As amplitudes de P2 não refletem uma organização categórica, mas variações na atividade neural associadas a correlatos acústicos do grau de abertura da vogal (em particular de /i/). Quanto ao padrão observado em N1_{c1}, embora consistente com representações de categorias, os dados não autorizam de maneira contundente a rejeição da hipótese de que o mesmo resulte de variações em parâmetros acústicos contínuos (não categóricos) – assim como em estudos anteriores de localização da fonte do N1m. Portanto, a questão a respeito da presença ou ausência de informação referente a categorias vocálicas em processos subjacentes a N1 e P2 permanece em aberto. Uma das questões que motivaram este estudo diz respeito à possibilidade de que padrões de adaptação em N1 e P2 pudessem proporcionar uma forma de acessar efeitos relacionados a categorias de sons da fala. Como verificado acima, os resultados são negativos.

A ausência de efeitos das vogais sobre as medidas de amplitude de N1 na linha média pode refletir um subcomponente não específico, como o “componente 3” de Näätänen e Picton (1987), com geradores externos ao córtex auditivo (possivelmente em áreas frontais; ATCHERSON *et al.*, 2006; GIARD *et al.*, 1994; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; PICTON *et al.*, 1999; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011) e associado não à análise sensorial de atributos acústicos dos estímulos, mas a mecanismos de detecção de mudanças no ambiente auditivo e de captação da atenção pelas mesmas (LANGE, 2012, 2013; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; SANMIGUEL; TODD; SCHRÖGER, 2013). Há ainda evidências de mais de uma fonte supratemporal que poderia contribuir com o “componente 1” (N1_{c1}): uma mais anterior, associada à análise de atributos espectrais e à identificação do objeto sonoro, e uma mais posterior, associada à localização de sons no espaço (AHVENINEN *et al.*, 2006). Esta última seria também menos influenciada pelas diferenças entre as vogais.

3.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Os resultados acima reforçam a já bem aceita dissociação entre N1 e P2 (CROWLEY; COLRAIN, 2004; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987) e a ideia de que a resposta N1 pode ser decomposta em subcomponentes que refletem processos neurais relativamente independentes (NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987). Medidos na

linha média, tanto N1 como P2 são consideravelmente atenuados pela apresentação precedente de um som, mas parecem se diferenciar tanto no grau da adaptação como na sensibilidade a variações espectrais nas vogais. Já o subcomponente N1_{c1} se diferencia do N1 medido na linha média tanto pela sensibilidade a diferenças entre as vogais como por se apresentar muito menos sujeito à adaptação.

Estes resultados foram obtidos por meio de procedimentos tradicionais em que as amplitudes são medidas em janelas de tempo e um conjunto pequeno de derivações em que as respostas de interesse são tipicamente máximas ou apresentam alguma característica conhecida. Tais procedimentos são muito bem estabelecidos e legitimados ao longo de décadas de pesquisa envolvendo PEs. Contudo, com essa metodologia, permanece inexplorada parte considerável da informação disponível contida na variabilidade das tensões elétricas entre derivações, pontos no tempo, condições experimentais e participantes. Para cada participante em cada condição experimental, foram obtidas neste estudo 29 formas de onda (uma para cada derivação) com um curso temporal estabelecido sobre 175 pontos – o intervalo de 700 ms amostrado a 250 Hz. O exame direto e a análise deste grande volume de dados são dificultados pelo fato de que os componentes dos PEs se sobrepõem nas derivações e no tempo.

Um campo elétrico gerado no cérebro e detectado por eletrodos na superfície da cabeça se espalha a partir de seu ponto de origem através de diferentes meios condutores e, deste modo, pode contribuir em algum grau com os potenciais registrados em todas as derivações. Esta condução volumétrica dos campos elétricos torna as derivações correlacionadas entre si e faz com que sinais gerados por processos diferentes em regiões diferentes (ainda que se distribuam de maneiras distintas sobre a superfície de registro) se sobreponham em cada uma das derivações. Ademais, diferentes processos podem gerar sinais cujos cursos temporais sejam sobrepostos. Mesmo assumindo, por exemplo, que N1 e P2 sejam respostas geradas em fontes distintas, é muito provável que o segundo exerça alguma influência sobre as medidas de amplitude do primeiro e vice versa. Sobre o N1_{c1}, ainda que se admita as medidas de amplitude de pico em TP9/TP10 como apropriadas para isolar o subcomponente supratemporal, este permanece misturado a pelo menos um outro em outras derivações, como Cz. Há ainda a possibilidade de que outros processos neurais modulem as amplitudes na janela temporal correspondente a N1 em TP9/TP10.

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica multivariada que, aplicada aos PEs, permite uma extração de fatores, os “componentes principais”, (doravante, CPs), a partir da informação contida em todo o conjunto de dados – isto é, nas variações de tensão entre amostras no tempo, derivações, participantes e condições experimentais. A ideia básica é a de que, dado um grupo de variáveis que variam conjuntamente, há um fator subjacente (como um componente dos PEs) que causa esta covariação. O objetivo é obter uma representação dos dados em que um pequeno número de CPs explique grande parte da variabilidade – ou seja, a partir de uma representação altamente redundante (devido às covariações) em que a variabilidade se encontra distribuída em um grande número de dimensões, chegar a uma representação simplificada, compacta, em que a variabilidade se concentre em poucas dimensões. Em uma PCA aplicada a PEs, as variáveis podem ser derivações – PCA espacial – ou amostras no tempo – PCA temporal (DIEN, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005; DIEN; KHOE; MANGUN, 2007). No primeiro caso, um valor de tensão medido em uma derivação em um determinado momento pode ser representado como um ponto no espaço n -dimensional cujas dimensões representam, cada qual, uma das n derivações. Os componentes resultantes da análise, cada um associado a uma proporção da variância nos dados, são combinações lineares entre estas dimensões. Já na PCA temporal, o mesmo valor de tensão pode ser representado como um ponto no espaço p -dimensional cujas dimensões representam p amostras no tempo. Neste estudo, foi empregada uma PCA têmporo-espacial, em que resultados da PCA temporal são analisados via PCA espacial (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005). Isto porque respostas com topografias similares (como N1 e P2) impõem dificuldades à PCA espacial, e respostas com cursos temporais similares (como os subcomponentes 1 e 3 de N1) impõem dificuldades à PCA temporal. A PCA têmporo-espacial permite que componentes identificados na etapa temporal sejam analisados em uma etapa espacial adicional. A análise foi realizada por meio do programa *ERP PCA Toolkit* (DIEN, 2010b; versão 2.43)

3.4.1 EXTRAÇÃO E SELEÇÃO DE COMPONENTES

O primeiro e principal passo na PCA consiste na extração dos CPs por meio da “decomposição por autovalores” da matriz de covariância¹⁷. Trata-se de um procedimento de descorrelação (cujos detalhes matemáticos estão fora do escopo deste texto) em que os dados são transformados para um novo sistema de coordenadas. Seja \mathbf{x} uma matriz de dados $n \times q$ composta por q observações em n variáveis (x_1, x_2, \dots, x_n). \mathbf{x} é transformada em outra matriz \mathbf{y} $m \times q$ composta por q escores em $m \leq n$ dimensões (y_1, y_2, \dots, y_m) ortogonais de tal modo que y_1 capture a maior proporção possível da variância, y_2 a maior proporção possível da variância restante, y_3 a maior proporção possível da variância não capturada por y_1 e y_2 , e assim por diante. A transformação é linear:

$$\mathbf{y} = \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{x}$$

onde $\mathbf{\Gamma}$ é uma matriz $n \times m$ cujas colunas são “autovetores” unitários da matriz de covariância de \mathbf{x} .

A matriz de covariância é uma matriz quadrada $n \times n$ que contém as variâncias das n variáveis e as covariâncias entre elas. Na matriz de covariância de \mathbf{x} , aqui denominada \mathbf{C} , a entrada \mathbf{C}_{ij} (para $i \neq j$) contém a covariância entre as variáveis x_i e x_j . Na diagonal principal ($i = j$), a entrada \mathbf{C}_{ij} contém a variância de x_i . Um vetor não nulo $\boldsymbol{\gamma}$ é um “autovetor” da matriz \mathbf{C} se houver um escalar λ tal que $\mathbf{C}\boldsymbol{\gamma} = \lambda\boldsymbol{\gamma}$. Neste caso, o escalar λ é um “autovalor” de \mathbf{C} . Vale notar que $\boldsymbol{\gamma}$ é, portanto, um vetor cuja direção é preservada na multiplicação $\mathbf{C}\boldsymbol{\gamma}$ (há apenas uma alteração no comprimento por um fator de escala).

Na matriz \mathbf{y} obtida na equação acima, as covariâncias são nulas. A diagonal principal da matriz de covariância de \mathbf{y} contém as variâncias de cada dimensão y_i . Estas variâncias são iguais aos autovalores ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) associados aos autovetores ($\boldsymbol{\gamma}_1, \boldsymbol{\gamma}_2, \dots, \boldsymbol{\gamma}_n$) em $\mathbf{\Gamma}$. O primeiro CP corresponde ao autovetor associado ao maior autovalor (ou seja, à maior variância); o segundo CP, ao autovetor associado ao segundo maior autovalor e assim por diante. Cada um desses autovetores é composto por n elementos cujos valores correspondem aos n coeficientes de regressão que associam as variáveis em $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ a uma das

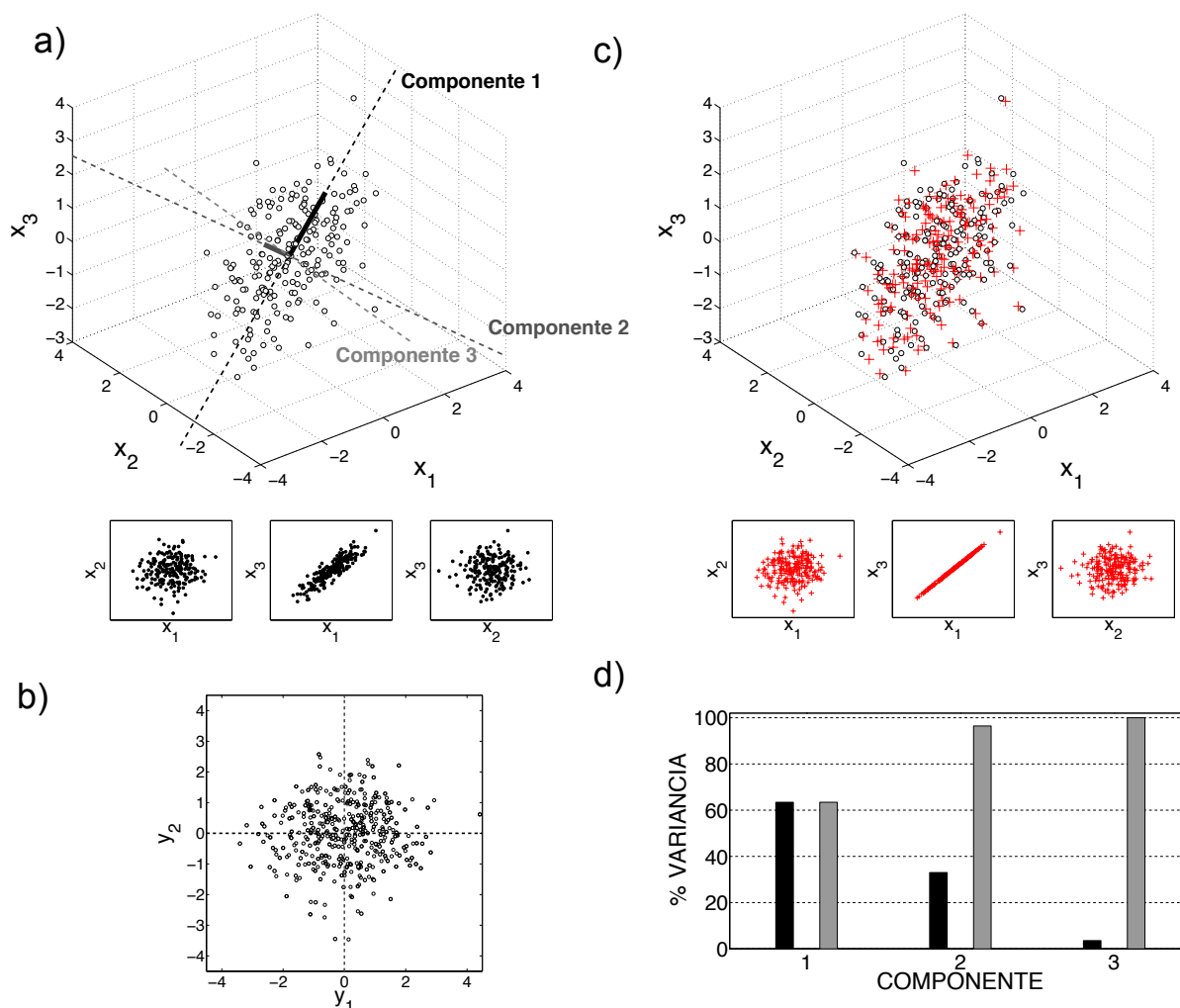
¹⁷ A PCA pode também ser feita sobre a matriz de correlações ou sobre a matriz das somas dos quadrados e produtos cruzados. Todavia, recomenda-se o uso da matriz de covariância no campo das aplicações sobre PEs (DIEN, 2006; DIEN; BEAL; BERG, 2005; KAYSER; TENKE, 2003, 2006)

dimensões em \mathbf{y} . Assim, por exemplo, o primeiro CP contém os coeficientes a_1, a_2, \dots, a_n que mapeiam \mathbf{x} em y_1 :

$$y_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

Esses coeficientes de regressão/correlação são denominados “cargas fatoriais” (usa-se o termo “fator” como sinônimo de “componente”). Enquanto a matriz \mathbf{x} contém q observações (linhas) em n variáveis (colunas), a matriz \mathbf{y} , denominada “matriz de escores fatoriais”, contém q escores (linhas) nas m dimensões (colunas) correspondentes aos m CPs (sendo $m \leq n$). Se o número de dimensões em \mathbf{y} é igual ao número de dimensões em \mathbf{x} , estas duas matrizes contêm exatamente a mesma informação – representada em sistemas de coordenadas diferentes. Espera-se, normalmente, que um número relativamente pequeno de CPs expliquem uma proporção muito grande da variância. Deste modo, pode ser interessante selecionar alguns poucos CPs e rejeitar os demais (assumindo que estes representam apenas ruído), o que resultaria em uma matriz \mathbf{y} com um número m de dimensões menor que o número n de variáveis em \mathbf{x} . Os critérios e procedimentos de seleção dos CPs variam com as aplicações e objetivos. Pode-se, por exemplo, simplesmente estabelecer uma porcentagem da variância que deverá ser mantida em \mathbf{y} (como 98%), ou, alternativamente, ordenar os CPs de acordo com as proporções da variância que explicam e rejeitar todos a partir de um ponto em que se identifica uma queda brusca nessas proporções.

Figura 3.17 - Ilustração da decomposição por autovetores.



Legenda: a) CPs obtidos a partir de observações fictícias (círculos) nas variáveis x_1 , x_2 e x_3 . b) escores fatoriais em y_1 e y_2 . c) dados originais (círculos) e dados recuperados (cruzes vermelhas) após a remoção do *componente 3*. d) proporções da variância explicadas pelos CPs (em cinza, as proporções cumulativas).

Esta extração e seleção de CPs é ilustrada de modo simplificado na Figura 3.17, com dados fictícios compostos por 201 observações em 3 variáveis. Na Figura 3.17a, estão representados esses dados e os três CPs extraídos pelo procedimento descrito acima. Como combinações lineares entre as variáveis, os CPs são representados pelas linhas ortogonais tracejadas. Os segmentos sólidos sobre as linhas tracejadas representam o autovalor associado ao CP, ou seja, a variância atribuída ao mesmo. O *componente 1* representa a direção de maior variância, seguido pelo *componente 2*. Juntos, estes CPs dão conta de 96% da variância total (63% para o *componente 1*; 33% para o *componente 2*; Figura 3.17d). Admitindo esta proporção como suficiente, o *componente 3* pode ser considerado como ruído e

rejeitado. As coordenadas dos dados nas dimensões y_1 e y_2 (correspondentes, respectivamente, aos componentes 1 e 2) são os escores fatoriais representados na Figura 3.17b. Nota-se facilmente que, após transformados, os dados são descorrelacionados. É possível, por meio da transformação inversa, converter os dados de volta ao sistema de coordenadas original. Sendo isto feito após a rejeição do *componente 3*, há, obviamente, alguma perda de informação, como se verifica na comparação entre os dados originais (círculos) e os dados recuperados (cruzes vermelhas) na Figura 3.17b.

Quanto à análise dos dados obtidos no presente estudo, a etapa inicial consiste na extração de CPs a partir de uma matriz de dados em que as variáveis representam amostras no tempo (PCA temporal) e cada observação corresponde a uma derivação em um participante em uma das condições experimentais. Foram analisados os PEs, isto é, médias coerentes entre trechos de EEG associados a eventos. Dadas as 29 derivações em 26 participantes, sendo os estímulos apresentados em 12 condições (S_1 e S_2 nos seis diferentes pares de sons), a matriz é composta por $29 \times 26 \times 12 = 9048$ linhas (observações) por 175 colunas (variáveis), que correspondem às 175 amostras no curso temporal do PE (-100 a 600 ms, com frequência de amostragem de 250 Hz). Deste modo, cada linha contém o PE de um participante registrado em uma das derivações e obtido em uma das condições de estimulação. Cada CP extraído é caracterizado por um curso temporal, que é determinado por suas 175 cargas fatoriais. Os escores fatoriais informam como o CP varia entre derivações, participantes e condições experimentais.

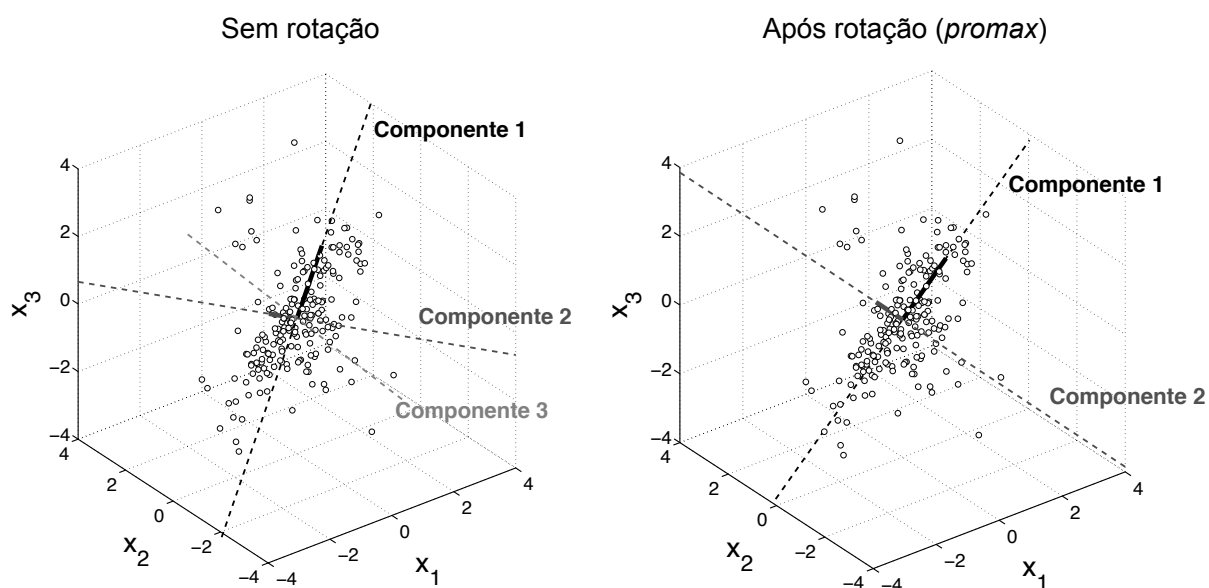
Foram extraídos 175 CPs, dos quais 158 foram rejeitados. Os 17 CPs restantes explicam 96% da variância total. O critério de seleção foi definido por um ponto de corte referente à variância atribuída ao CP. Para determinar este ponto, o mesmo processo de extração de CPs foi efetuado sobre um conjunto aleatório de dados criados com as mesmas dimensões dos dados reais. Ordenados os CPs pela variância explicada, o ponto de exclusão é definido como o ponto a partir do qual os CPs dos dados reais se associam a autovalores (ou variâncias) menores que os CPs dos dados aleatórios (DIEN, 2012).

3.4.2 ROTAÇÃO DOS COMPONENTES

Em aplicações cujos objetivos não vão além da redução de dimensionalidade, da compressão, ou da descorrelação dos dados, a PCA está concluída com a extração e seleção de CPs. Não é o caso deste trabalho, uma vez que o interesse reside na possibilidade de obter CPs que reflitam fatores latentes, ou processos cerebrais subjacentes aos padrões de covariação nos dados. Na forma como são extraídos, os CPs representam as direções ortogonais de maior variância, de tal modo que o primeiro explique a maior parcela possível e cada um dos demais explique a maior parcela possível da variância não explicada pelos anteriores. Este critério de máxima variância é geralmente satisfeito por combinações de fatores latentes e não por fatores latentes individuais, como seria desejável. Pode ocorrer, por exemplo, que o primeiro CP, para maximizar a parcela da variância explicada, reflita uma mistura entre dois ou mais componentes dos PEs. O problema pode ser mitigado pelo uso de métodos de “rotação”, por meio dos quais se tenta encontrar um conjunto equivalente de combinações lineares que sejam mais interpretáveis. Normalmente, trata-se de uma busca por uma “estrutura simples” em que poucas variáveis apresentem carga considerável em cada CP.

Com fins de ilustração, os gráficos na Figura 3.18 apresentam, a partir de dados fictícios, três CPs não rotacionados e os CPs correspondentes após a exclusão do terceiro (mantendo 97% da variância total) e um procedimento de rotação. É possível perceber que o *componente 1* se torna, após a rotação, mais associado às variáveis x_1 e x_3 e menos associado à variável x_2 , ao passo que o *componente 2* se torna mais associado à variável x_2 e menos associado às demais. Supondo, por exemplo, a existência de um processo subjacente à associação entre x_1 e x_2 , como os dados sugerem, a solução obtida após a rotação o refletiria mais satisfatoriamente.

Figura 3.18 - Ilustração de um procedimento de rotação.



À direita: CPs obtidos sem rotação a partir de observações fictícias (círculos) em três variáveis. À esquerda: CPs após rejeição do *Componente 3* e rotação pelo procedimento *Promax*.

Um dos procedimentos de rotação mais utilizados e recomendados no campo das respostas evocadas cerebrais (veja, por exemplo, KAYSER; TENKE, 2003, 2006; MOLFESE; ERWIN, 1981; MOLFESE; SCHMIDT, 1983) é o Varimax (KAISER, 1958), que, mantendo a ortogonalidade dos CPs, maximiza a variância das cargas fatoriais elevadas ao quadrado. O resultado é um conjunto de CPs cujas cargas fatoriais são elevadas em algumas variáveis e se aproximam de zero em outras. Assim, valores intermediários são evitados e a estrutura da solução simplificada. Este ponto é especialmente relevante para a PCA temporal se considerarmos que, em geral, componentes dos PEs são ativos em um conjunto restrito de pontos no tempo e próximos a zero nos demais. Entendida por alguns autores (KAYSER; TENKE, 2003, 2006) como vantajosa para a decomposição de PEs, a exigência de que os CPs resultantes sejam ortogonais (ou seja, não correlacionados) é considerada irrealista por outros (DIEN, 2006, 2010a; DIEN; BEAL; BERG, 2005; PICTON; LINS; SCHERG, 1995).

Uma alternativa é a rotação não ortogonal, ou oblíqua, Promax (HENDRICKSON; WHITE, 1964), que consiste no procedimento Varimax (ou outra rotação ortogonal) seguido de uma etapa de “relaxamento” que possibilita um grau limitado de correlação entre CPs. Para isto, o algoritmo estabelece uma matriz de CPs “alvo” elevando as cargas fatoriais dos CPs ortogonais a uma potência –

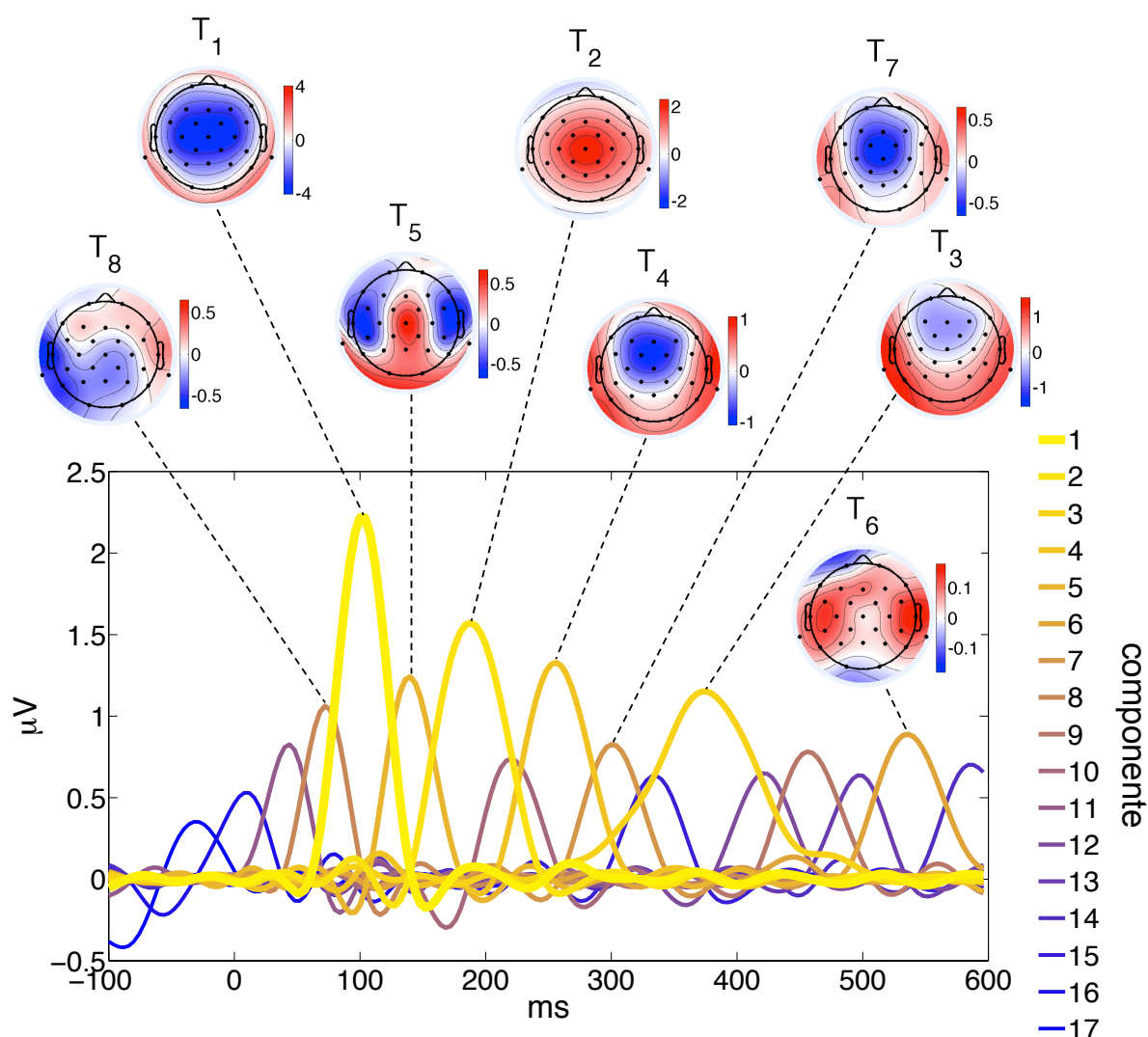
determinada pelo parâmetro “*Kappa*”, usualmente fixado em 3 ou 4. Quanto maior a potência, maior o grau permitido de correlação entre CPs. A matriz de CPs ortogonais é então transformada linearmente de maneira a se aproximar da matriz “alvo”¹⁸. Isto resulta em um aumento da diferença entre cargas fatoriais altas e baixas pois, embora todas sejam reduzidas após o “relaxamento”, o impacto é maior quanto mais próxima de zero for a carga.

A partir de considerações teóricas a respeito dos problemas em admitir apenas CPs não correlacionados e com base em estudos de simulação de PEs, Dien e colaboradores recomendam o uso do procedimento Promax na PCA temporal (DIEN, 2006, 2010a, 2012; DIEN; BEAL; BERG, 2005; DIEN; FRISHKOFF, 2005; DIEN; KHOE; MANGUN, 2007). Considerando o desempenho superior da rotação Promax, relatado nos trabalhos citados, e com vistas a evitar a suposição de que não há correlação entre as respostas cerebrais de interesse, essa recomendação é seguida na presente investigação.

O procedimento Promax (*Kappa* = 3) foi usado para a rotação dos 17 CPs selecionados (vide item 3.4.1). Os CPs rotacionados, juntamente com as topografias de oito deles, são mostrados na Figura 3.19. São CPs “temporais” (isto é, obtidos em uma PCA temporal), e serão portanto denominados T_1, T_2, \dots, T_{17} . Como mencionado anteriormente, seu curso temporal é dado por suas cargas fatoriais nas variáveis que, aqui, representam, cada uma, uma amostra no tempo. O valor de cada carga fatorial, como coeficiente de correlação, é convertido em unidades de microvolt (μV) se multiplicado pelo desvio padrão da variável correspondente (DIEN, 2006, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005). A topografia de um CP pode ser determinada a partir da matriz de escores fatoriais, onde se encontra a informação sobre a magnitude de cada CP em cada derivação.

¹⁸ Trata-se de uma transformação dita “procustiana”, em referência ao personagem da mitologia grega Procusto, que amputava ou esticava suas vítimas para que elas se ajustassem a uma cama de ferro. Sendo **A** e **B** matrizes $n \times m$, é determinada a transformação linear de **A** que melhor se conforma a **B** (isto é, que minimiza o erro quadrático médio).

Figura 3.19 - Componentes principais da PCA temporal com rotação *Promax*.



Os dois primeiros CPs, T_1 e T_2 , dão conta, respectivamente, de 19,2 % e 13,3% da variância total e correspondem em latência e topografia às respostas N1 e P2. Também digno de nota é o componente T_5 , aparentemente relacionado ao complexo-T (WOLPAW; PENRY, 1975, 1977), também denominado “componente 2”, nos termos usados por Näätänen e Picton (1987) para designar subcomponentes de N1. Esta resposta é descrita como uma deflexão positiva a cerca de 100 ms seguida por uma deflexão negativa em torno dos 150 ms, ambas detectadas em derivações posicionadas na região temporal (derivações T7 e T8; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; WOLPAW; PENRY, 1975, 1977).

Um dos motivos da aplicação da PCA neste estudo é a tentativa de decompor a resposta N1 obtida no vértice (Cz), com pico em torno dos 100 ms, em ao menos dois subcomponentes: um positivo na região de TP9/TP10 e negativo na linha média

(como o “componente 1” de Näätänen e Picton, ou $N1_{c1}$); outro por uma negatividade difusa e máxima na região do vértice (como o “componente 3”). Esta decomposição não ocorreu na PCA temporal acima descrita. O componente T_1 (Figura 3.19) é muito semelhante em topografia à resposta $N1$ descrita na seção 3.2.2: uma negatividade pronunciada no vértice com inversão de polaridade em TP9 e TP10 (Figura 3.8). Se de fato dois ou mais subcomponentes contribuem para esta resposta, esses continuam misturados no componente principal T_1 . Sabe-se, todavia, que uma limitação importante da PCA temporal é sua ineficácia na separação de componentes com latências e cursos temporais semelhantes (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005). Na próxima etapa da análise, os CPs da PCA temporal serão decompostos por meio de uma PCA espacial.

3.4.3 ANÁLISE TÊMPORO-ESPACIAL DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Um CP de uma PCA temporal é definido por seu curso no tempo, que é dado por suas cargas fatoriais (Figura 3.19). Portanto, se dois componentes dos PEs apresentam cursos temporais suficientemente semelhantes, eles serão representados pelo mesmo CP em uma PCA temporal. Contudo, se suas topografias são suficientemente distintas, os mesmos podem ser ainda separados por meio de uma PCA espacial. Os escores fatoriais de cada CP da PCA temporal podem ser rearranjados em uma matriz em que cada coluna corresponde a uma derivação, e então submetidos a uma PCA espacial. Trata-se de uma PCA têmporo-espacial (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; FRISHKOFF, 2005).

Orientados à obtenção de uma “estrutura simples”, com CPs cujas cargas fatoriais são altas em um número limitado de variáveis e próximas de zero nas demais, os procedimentos de rotação acima descritos não são tão apropriados à PCA espacial como o são à PCA temporal (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; KHOE; MANGUN, 2007). No caso da primeira, as distribuições topográficas dos componentes dos PEs normalmente não se adequam a esse padrão de estrutura simples, uma vez que a condução volumétrica dos campos elétricos gerados no cérebro se dá de tal forma que o sinal correspondente a cada gerador se manifeste em quase todas as derivações. Ou seja, os componentes dos PEs não são tão bem delimitados no espaço como tipicamente o são no tempo. Conforme recomendações de Dien e colaboradores (DIEN, 2010a, 2012; DIEN; BEAL; BERG, 2005; DIEN; KHOE; MANGUN, 2007), outro procedimento de rotação, denominado *Infomax*, foi

empregado neste estudo. Trata-se de um algoritmo usado em Análise de Componentes Independentes (ICA) que, aplicado sobre CPs extraídos em uma PCA, pode ser considerado como uma rotação oblíqua dos mesmos (DIEN, 2010a).

O termo ICA se refere a um conjunto de métodos de separação cega de sinais em que dados multivariados são decompostos em componentes maximamente independentes e não-gaussianos – ou não-normais (HYVÄRINEN; KARHUNEN; OJA, 2001; HYVÄRINEN; OJA, 2000). Dada uma matriz de dados \mathbf{z} composta pelas variáveis z_1, z_2, \dots, z_n , parte-se da suposição de que cada uma delas é gerada por combinações lineares entre componentes independentes $s_1, s_2 \dots s_n$ contidos em uma matriz \mathbf{s} :

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}\mathbf{s}$$

onde a “matriz de mistura” \mathbf{A} especifica a transformação que combina componentes em \mathbf{s} para gerar \mathbf{z} . Na ICA, estima-se \mathbf{A} e \mathbf{s} com base apenas na informação dada por \mathbf{z} . Sendo \mathbf{W} a matriz correspondente à transformação inversa à estabelecida por \mathbf{A} , os componentes independentes s_1, s_2, \dots, s_n , são dados por:

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{z}$$

Trata-se, deste modo, de encontrar a “matriz de separação” \mathbf{W} de forma que os componentes s_1, s_2, \dots, s_n sejam tão independentes entre si quanto possível. Convém observar que este requisito de “independência” é mais restritivo que um requisito de “não correlação”. O último se refere apenas às covariâncias, ou seja, a estatísticas de segunda ordem, ao passo que o primeiro diz respeito a toda a estrutura de dependências entre as variáveis. Se duas variáveis, s_1 e s_2 , são independentes, então quaisquer transformações não lineares dessas variáveis, $g(s_1)$ e $h(s_2)$, são não correlacionadas. Normalmente, antes da aplicação da ICA, a matriz de dados \mathbf{x} é linearmente transformada de modo que as variáveis que a compõem tenham todas média zero, variância 1 e sejam descorrelacionadas. Assim, a informação sobre a qual a ICA opera diz respeito a dependências de ordem superior entre as variáveis e não às covariâncias. A ICA pode ser descrita também como uma busca por componentes maximamente não gaussianos. Em decorrência do teorema do limite central, misturas entre sinais não gaussianos têm distribuições mais próximas à gaussiana que os sinais tomados isoladamente (HYVÄRINEN; KARHUNEN; OJA, 2001; HYVÄRINEN; OJA, 2000).

O algoritmo *Infomax* (BELL; SEJNOWSKI, 1995; MAKEIG *et al.*, 1997) opera uma decomposição em que a informação mútua¹⁹ entre os componentes resultantes é minimizada. No programa *ERP PCA Toolkit* (DIEN, 2010b; versão 2.43), a rotação *Infomax* é implementada tal como no programa *EEGLab* (DELORME; MAKEIG, 2004). Sendo aplicado a dados descorrelacionados, como é o caso dos escores fatoriais resultantes da decomposição por autovalores em uma PCA, o algoritmo proporciona uma rotação não ortogonal, já que a busca por componentes independentes não opera sobre a informação contida na matriz de covariância.

Para a análise dos PEs aqui registrados, uma PCA espacial com rotação *Infomax* foi efetuada sobre os escores fatoriais de cada CP obtido na PCA temporal. Para isto, estes escores foram reorganizados em uma matriz cujas colunas correspondem, cada uma, a uma das derivações – que são as variáveis na PCA espacial. Considerando as equações da ICA exibidas logo acima, esta matriz corresponde à matriz **z**. Note que não há informação temporal nos escores fatoriais de uma PCA temporal, mas apenas informação referente às variações entre participantes, condições experimentais e derivações – a variação no tempo é representada nas cargas e não nos escores fatoriais. A análise resulta em CPs têmporo-espaciais caracterizados, cada qual, por um curso temporal representado nas cargas fatoriais da PCA temporal e por uma topografia representada pelas cargas fatoriais da PCA espacial.

Uma vez que, neste trabalho, o interesse é restrito ao complexo N1-P2 do PE, serão considerados apenas CPs que apresentem um pico entre 80 e 140 ms com polaridade negativa em Cz (após conversão para unidades de microvolt) ou um pico entre 150 e 250 ms com polaridade positiva em Cz. Ademais, não foram considerados CPs têmporo-espaciais que expliquem menos de 2,5% da variância total ou que derivem de CPs temporais que expliquem menos de 5%. Dos quatro CPs que satisfazem estes critérios (entre $17 \times 29 = 493$), dois foram extraídos do componente temporal T_1 e dois do componente temporal T_2 .

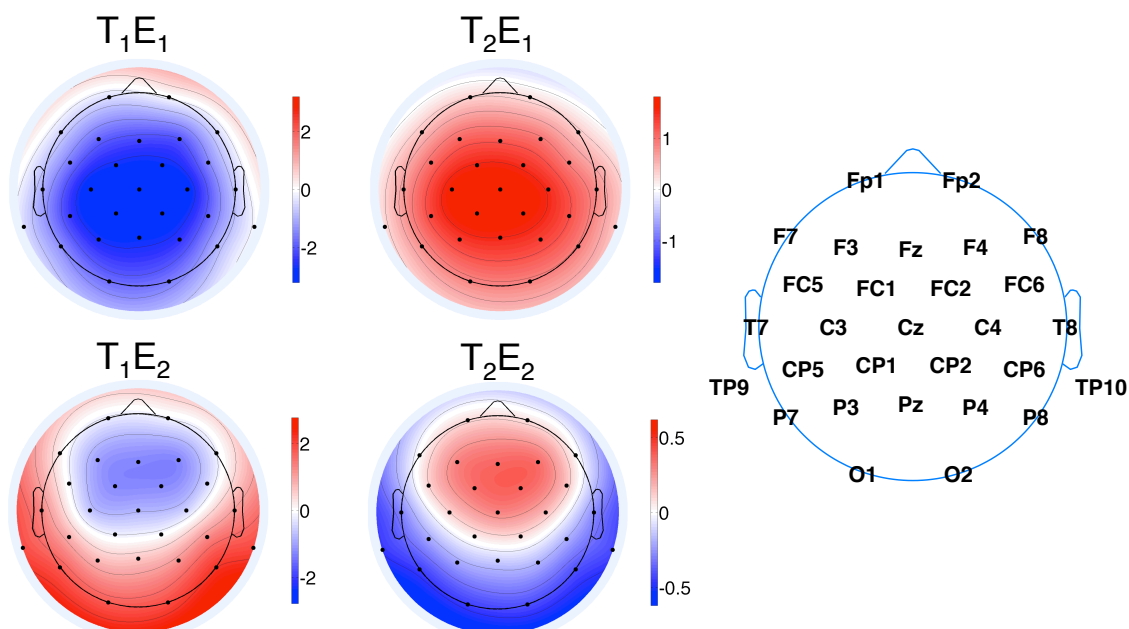
¹⁹ A informação mútua é uma medida da dependência entre variáveis. A informação mútua entre as variáveis x_1 e x_2 é dada por
 $I(x_1; x_2) = H(x_1) - H(x_1 | x_2) = H(x_2) - H(x_2 | x_1)$
 onde $H(x_i)$ é a entropia marginal de x_i e $H(x_i | x_j)$ é a entropia condicional de x_i dado x_j .

Tabela 3.2 - Componentes extraídos nas etapas temporal e espacial da PCA têmporo-espacial. São mostradas as proporções da variância explicada (% var.), os picos temporais dos componentes T_1 e T_2 e as derivações em que as cargas dos componentes têmporo-espaciais T_1E_1 , T_1E_2 , T_2E_1 e T_2E_2 atingem o valor absoluto máximo.

PCA temporal		PCA espacial	
T_1	(pico: 104 ms) (% var. 19,13)	T_1E_1	(máximo em Cz) (% var.: 13,3)
		T_1E_2	(máximo em P8) (% var.: 2,9)
T_2	(pico: 192 ms) (% var.: 13,7)	T_2E_1	(máximo em Cz) (% var.: 9,3)
		T_2E_2	(máximo em TP9) (% var.: 2,7)

Os dois primeiros CPs têmporo-espaciais extraídos de T_1 , denominados T_1E_1 e T_1E_2 , dão conta de 13,3% e 2,9% da variância total, respectivamente. Os dois primeiros CPs de T_2 , denominados T_2E_1 e T_2E_2 , explicam, respectivamente, 9,3 % e 2,7% da variância total (Tabela 3.2). As topografias desses quatro CPs têmporo-espaciais são exibidas na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Topografias dos componentes da PCA têmporo-espacial.



Valores de amplitude, em unidades de μV , no pico (104 ms para T_1E_1 e T_1E_2 ; 192 ms para T_2E_1 e T_2E_2)

Para cada CP têmporo-espacial, o valor de amplitude, em microvolts, em um ponto no tempo t e em uma derivação d é dado por

$$C_t V_t C_d S_d V_d$$

onde C_t é a carga fatorial do CP temporal correspondente no tempo t ; V_t é o desvio padrão de t ; C_d é a carga fatorial do CP espacial na derivação d ; S_d é a média dos escores fatoriais deste mesmo CP; V_d é o desvio padrão destes mesmos escores (DIEN; FRISHKOFF, 2005).

Entre os dois CPs têmporo-espaciais que correspondem à resposta N1, verifica-se que T_1E_1 é caracterizado por uma negatividade difusa e máxima no vértice e T_1E_2 por uma negatividade frontal e polaridades positivas na região do mastoide e regiões posteriores. Estas características se adequam bem às descri es clássicas dos subcomponentes 3 e 1 de N  t nen e Picton (1987). O subcomponente 1, considerado como uma manifesta o do processamento sensorial auditivo em áreas do plano supratemporal (N  T NEN; KUJALA; WINKLER, 2011; N  T NEN; PICTON, 1987; SANMIGUEL; TODD; SCHR GER, 2013), se assemelha a T_1E_2 , sendo descrito como uma negatividade fronto-central com inversão de polaridade em deriva es localizadas abaixo da fissura de Sylvius (como deriva es auriculares ou na região do mastoide). O subcomponente 3, aqui associado a T_1E_1 , é descrito como uma negatividade difusa, máxima no vértice e com topografia posterior em compara o ao subcomponente 1 (N  T NEN; PICTON, 1987).

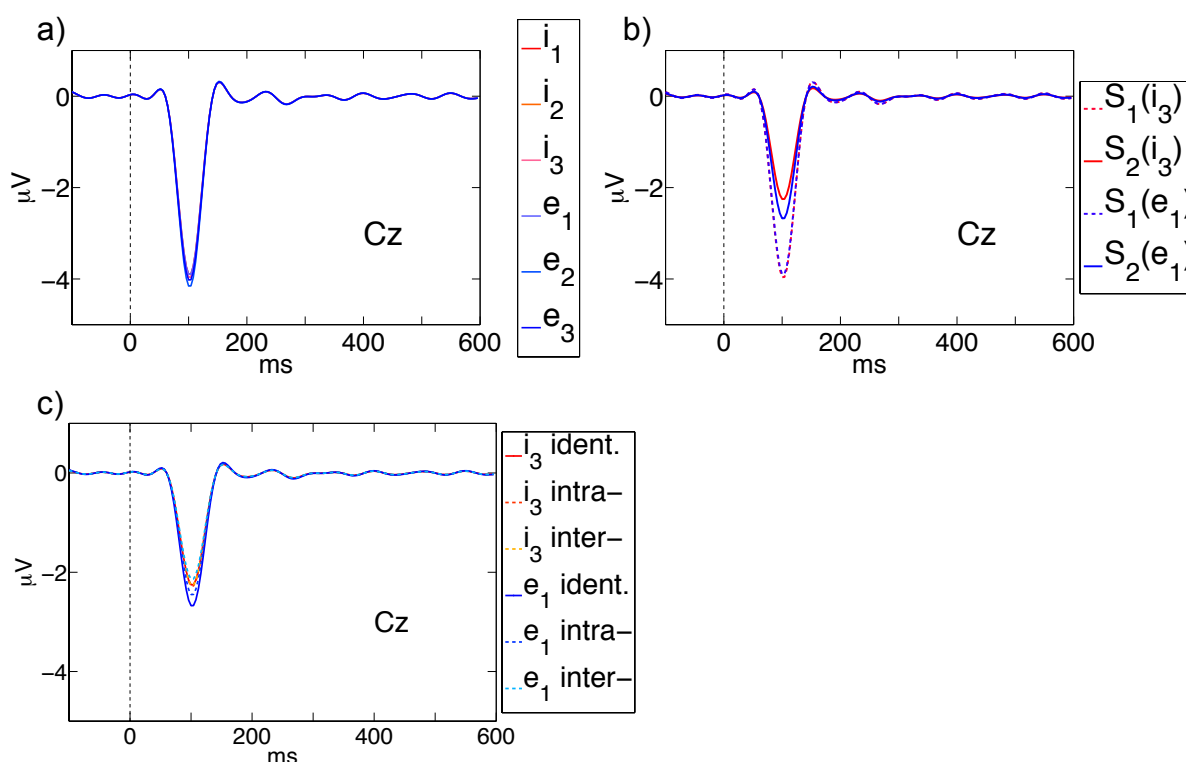
Os CPs têmporo-espaciais T_2E_1 e T_2E_2 refletem a resposta P2 e são notavelmente semelhantes em distribui o topográfica a T_1E_1 e T_1E_2 (Figura 3.20). Embora menos se saiba a respeito das fontes de P2, há evidências de que esta resposta, assim como N1, reflete a atividade de mais de um gerador, um dos quais localizado no córtex auditivo supratemporal (VERKINDT *et al.*, 1994; RIF *et al.*, 1991; revisões em CROWLEY; COLRAIN, 2004; EGGERMONT; PONTON, 2002).

3.4.4 ADAPTA O E ESPECIFICIDADE AO ESTÍMULO NA PCA TÊMPORO-ESPACIAL

Os padrões de adapta o dos CPs da PCA têmporo-espacial e o modo como estes são modulados pelas diferenças entre os sons vocálicos usados como estímulos foram também investigados. Os procedimentos de estatística inferencial empregados para as compara es de interesse são os mesmos que os descritos na se o 3.1.3.4 para a análise das amplitudes médias de N1, $N1_{c1}$ e P2. Como

variável dependente nas ANOVAs para medidas repetidas, serão usados os escores fatoriais dos CPs têmporo-espaciais. Estes indicam a magnitude do CP em cada participante e condição experimental. Para a comparação entre S_1 e S_2 (nos pares de estímulos idênticos) foi executada uma ANOVA com os fatores POSIÇÃO ($S_1 \times S_2$) e VOGAL ($i_3 \times e_1$); para as comparações pertinentes às hipóteses sobre a especificidade da adaptação, foi executada uma ANOVA com os fatores TIPO DE PAR (*estímulos idênticos* \times *intra-categoria* \times *inter-categorias*) e VOGAL. Efeitos relacionados às diferenças entre os seis sons em S_1 foram examinados por meio de uma ANOVA com os fatores CATEGORIA ($/i/ \times /e/$) e DISTÂNCIA DO LIMITE ($[i_1 e_3] \times [i_2 e_2] \times [i_3 e_2]$).

Figura 3.21 - Componente T_1E_1 na derivação de máxima magnitude.

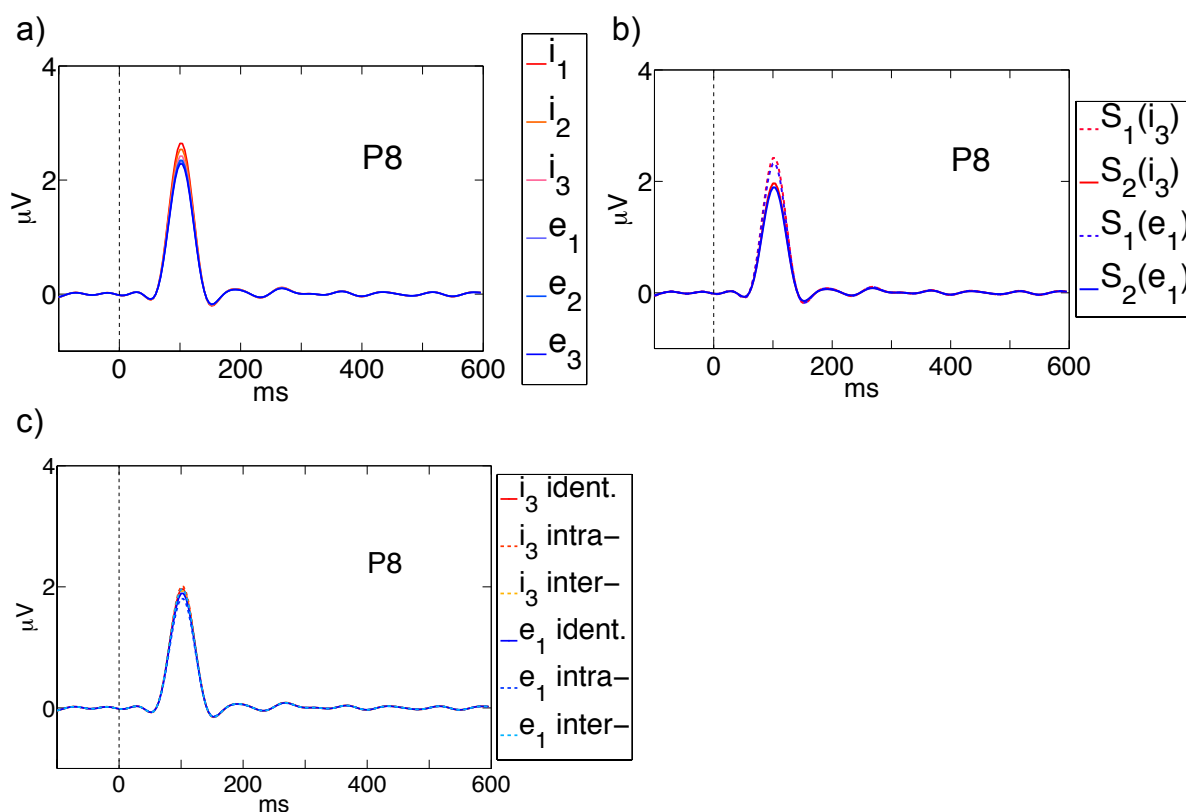


Legenda: a) respostas a S_1 ; b) efeito de adaptação; c) respostas a S_2 em pares de sons idênticos (*ident.*), pares intra-categoria (*intra-*) e inter-categorias (*inter-*).

Os quatro CPs têmporo-espaciais apresentaram efeitos significativos de adaptação, mas em nenhum deles foi verificada adaptação específica ao estímulo (figuras 3.21; 3.22; 3.23; 3.24). Esses CPs diferem em relação aos efeitos das diferenças entre os sons em S_1 , sendo os padrões observados semelhantes aos obtidos na análise das respostas $N1$, $N1_{c1}$ e $P2$. O componente T_1E_1 apresenta um

efeito significativo de adaptação ($F_{(1,25)} = 42,71$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,63$), sendo atenuado em 38% de S_1 para S_2 (Figura 3.21b). Não foram observados efeitos relacionados à variabilidade dos sons em S_1 (Figura 3.21a). Estes resultados são bem semelhantes aos observados nas medidas de amplitude média de N1 na linha média (particularmente em Cz e Pz; veja seção 3.2.2). Assim como $N1_{c1}$, o componente T_1E_2 em resposta a S_1 ocorre com maiores escores para a categoria /i/ em comparação à categoria /e/ ($F_{(1,25)} = 6,06$; $p = 0,021$; $\eta_p^2 = 0,20$; Figura 3.22a). Enquanto a atenuação de $N1_{c1}$ não atingiu significância (seção 3.2.2), um efeito significativo de adaptação foi observado em T_1E_2 ($F_{(1,25)} = 15,53$; $p = 0,001$; $\eta_p^2 = 0,38$; Figura 3.22b), com 19% de atenuação em S_2 em relação a S_1 .

Figura 3.22 - Componente T_1E_2 na derivação de máxima magnitude.

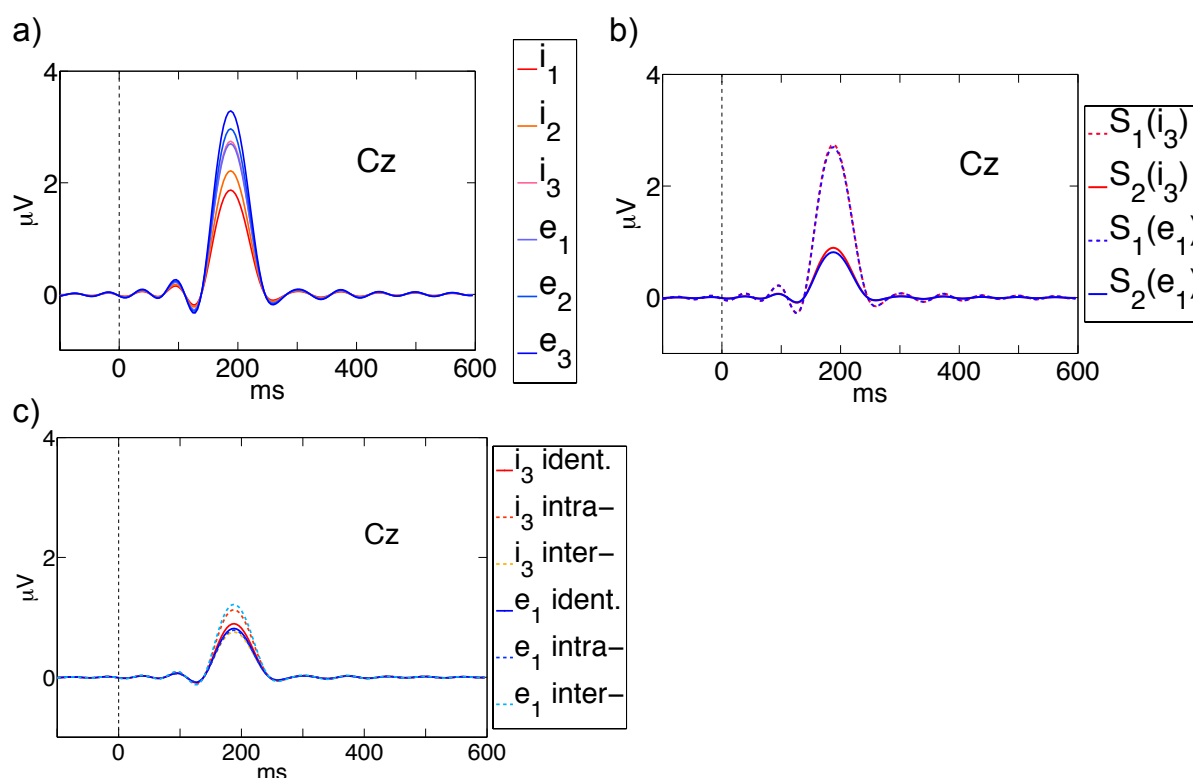


Legenda: a) respostas a S_1 ; b) efeito de adaptação; c) respostas a S_2 em pares de sons idênticos (*ident.*), pares intra-categoria (*intra-*) e inter-categorias (*inter-*).

Sobre os CPs têmporo-espaciais derivados de T_2 , quais sejam, T_2E_1 e T_2E_2 , ambos variam sistematicamente com o som em S_1 , porém de maneiras distintas (figuras 3.23a e 3.24a). De modo semelhante ao que se observou em P2 (seção 3.2.2), uma interação CATEGORIA \times DISTÂNCIA DO LIMITE foi detectada em T_2E_1

($F_{(2,50)} = 6,32$; $p = 0,004$; $\varepsilon = 0,922$; $\eta_p^2 = 0,20$). A variação dos escores com a distância do limite toma direções opostas nas duas categorias (Figura 3.23a) – isto é, os escores aumentam com o grau de abertura da vogal, ou à medida em que se avança no *continuum* de i_1 a e_3 . Contudo, nas ANOVAs adicionais realizadas separadamente para cada categoria, com correção de Bonferroni, o efeito do fator DISTÂNCIA DO LIMITE foi significativo apenas na categoria /i/ ($F_{(2,50)} = 4,17$; $p = 0,042$; $\varepsilon = 0,776$; $\eta_p^2 = 0,14$) – assim como no caso das amplitudes de P2. A análise de tendências indica um efeito linear marginal ($F_{(1,25)} = 5,46$; $p = 0,056$; $\eta_p^2 = 0,18$) na categoria /i/. Já o componente T₂E₂ apresenta escores maiores na categoria /e/ comparada à categoria /i/ ($F_{(1,25)} = 6,38$; $p = 0,018$; $\eta_p^2 = 0,20$) e aumentos nos escores associados à proximidade do som ao limite entre as categorias ($F_{(2,50)} = 22,41$; $p < 0,001$; $\varepsilon = 0,803$; $\eta_p^2 = 0,47$; Figura 3.24a).

Figura 3.23 - Componente T₂E₁ na derivação de máxima magnitude.

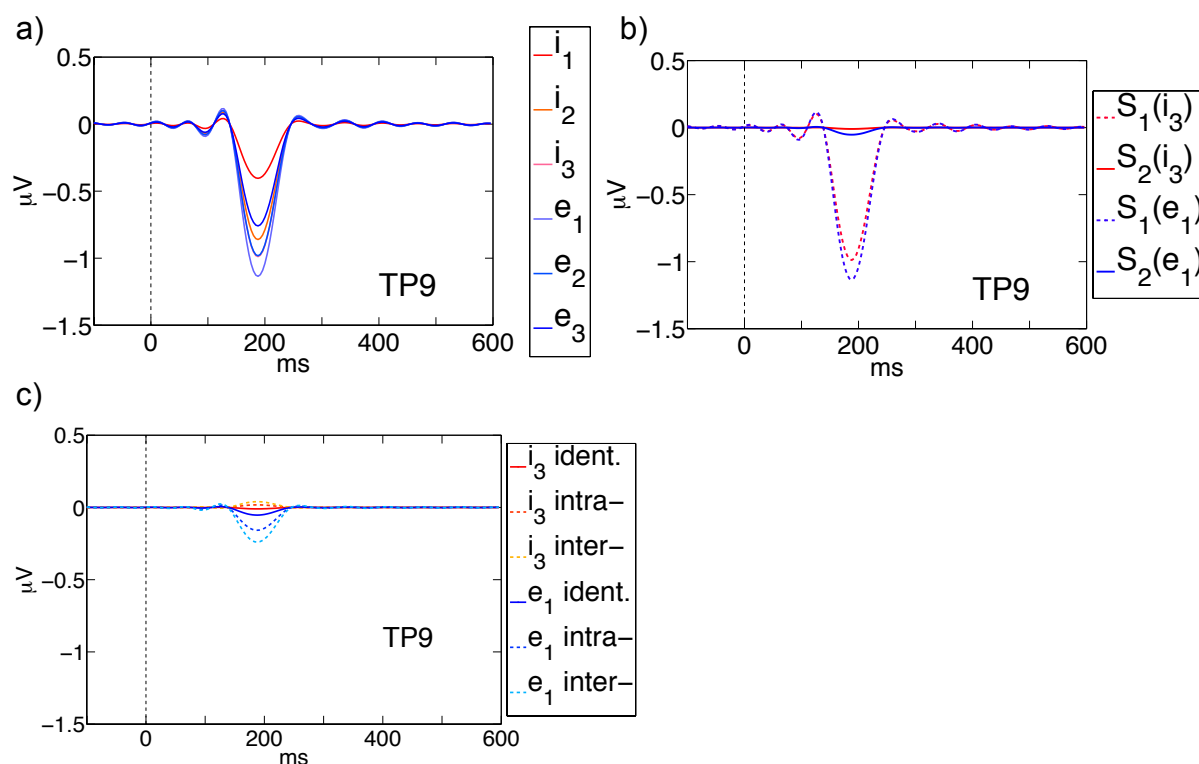


Legenda a) Respostas a S_1 ; b) efeito de adaptação; c) respostas a S_2 em pares de sons idênticos (*ident.*), pares intra-categoria (intra-) e inter-categorias (inter-).

Efeitos pronunciados de adaptação são observados em T₂E₁ ($F_{(1,25)} = 44,21$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,64$) e T₂E₂ ($F_{(1,25)} = 65,22$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,72$), sendo o primeiro

atenuado em 69% e o segundo em 97% (figuras 3.23b e 3.24b). Em nenhum caso a resposta a S_2 difere significativamente entre os tipos de par de sons. De maneira consistente com as respostas a S_1 , os escores de T_2E_2 em S_2 são mais elevados para a vogal /e/ que para a vogal /i/ ($F_{(1,25)} = 6,82$; $p < 0,015$; $\eta_p^2 = 0,21$)).

Figura 3.24 - Componente T_2E_2 na derivação de máxima magnitude.



Legenda: a) Respostas a S_1 ; b) efeito de adaptação; c) respostas a S_2 em pares de sons idênticos (ident.), pares intra-categoria (intra-) e inter-categorias (inter-).

3.5 DISCUSSÃO: DECOMPONDO O COMPLEXO N1-P2 PELA PCA TÊMPORO-ESPACIAL

A decomposição do complexo N1-P2, efetuada por meio da PCA têmporo-espacial, resultou em quatro CPs, cada um dos quais derivado de um dos dois principais componentes temporais, a saber, T_1 e T_2 . Estes são consistentes, tanto em curso temporal como em distribuição topográfica, com as respostas N1 e P2, respectivamente. De maneira geral, os resultados reforçam as conclusões extraídas a partir das medidas de amplitude de N1 e P2 na linha média e de $N1_{c1}$ (seção 3.3).

Os CPs têmporo-espaciais T_1E_1 e T_1E_2 herdam o curso temporal de T_1 e resultam da decomposição da topografia do mesmo por meio de uma PCA espacial. O componente T_1E_1 corresponde às descrições do subcomponente 3 de N1 no modelo de Näätänen e Picton (1987). Como mencionado anteriormente, propõe-se

que o subcomponente 3 seja associado a mecanismos de orientação e direcionamento da atenção (EGGERMONT; PONTON, 2002; LANGE, 2012, 2013; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; SANMIGUEL; TODD; SCHRÖGER, 2013). A localização de sua(s) fonte(s) é incerta, mas é provável a contribuição de áreas frontais (ATCHERSON *et al.*, 2006; EGGERMONT; PONTON, 2002; GIARD *et al.*, 1994; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; PICTON *et al.*, 1999; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011). O modo como T_1E_1 responde às manipulações experimentais realizadas neste estudo se assemelha ao padrão observado nas medidas de amplitude de N1 na linha média, sobretudo em Cz e Pz. Isto sugere que, nas medidas de N1 obtidas nestas derivações, predomina o subcomponente 3.

O componente T_1E_2 é consistente com as descrições do subcomponente 1 de Näätänen e Picton (1987), caracterizado por uma negatividade fronto-central com inversão de polaridade em derivações na região do mastoide, e associado a processos de análise de estímulos auditivos no plano supratemporal (ATCHERSON *et al.*, 2006; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; PICTON *et al.*, 1999; WOODS, 1995; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011). Esta inversão de polaridade permite que este subcomponente, aqui denominado $N1_{c1}$, seja medido como uma deflexão positiva em derivações como TP9/TP10. De maneira semelhante a $N1_{c1}$, T_1E_2 exibe um efeito do fator CATEGORIA, com maiores magnitudes em vogais identificadas como /i/. Quanto ao efeito de adaptação, T_1E_2 foi significativamente atenuado em S_2 , o que não se verifica em $N1_{c1}$, cuja atenuação não atingiu significância (ainda que tenha se manifestado como uma tendência marginal). O efeito de adaptação é consideravelmente menos acentuado em T_1E_2 se comparado a T_1E_1 . Estes resultados sugerem que as medidas de amplitude em TP9/TP10 na janela temporal de N1 (aqui definida entre 80 e 100ms após o início do estímulo) são adequadas como medidas do subcomponente supratemporal $N1_{c1}$.

Os CPs T_2E_1 e T_2E_2 resultam da decomposição do CP temporal T_2 , que corresponde à resposta P2. Se há muito a se esclarecer a respeito dos processos geradores de N1, ainda menos se sabe sobre P2 (CROWLEY; COLRAIN, 2004), o que confere um caráter mais especulativo à interpretação de T_2E_1 e T_2E_2 . Os resultados da PCA têmporo-espacial sugerem que P2 pode ser decomposto de maneira similar a N1, ou seja, em um CP distribuído pela superfície da cabeça e máximo no vértice (T_2E_1) e um CP que inclui uma positividade predominantemente

frontal e uma negatividade na região do mastoide e derivações posteriores (T_2E_2). Em analogia com o padrão observado nos CPs têmporo-espaciais associados a N1, a topografia de T_2E_2 suscita especulações a respeito de geradores supratemporais; T_2E_1 poderia estar associado a geradores localizados em outras áreas. Crowley e Colrain (2004) sugerem, com base em uma revisão da literatura, que P2 reflete processos específicos à modalidade auditiva, que se dão em áreas do plano supratemporal e do aspecto lateral do giro temporal superior, e processos não específicos à modalidade que ocorrem em outras áreas. Vale notar a semelhança desta proposta com a descrições de Näätänen e Picton (1987) sobre N1. Resultados indicativos de geradores supratemporais de P2 foram obtidos a partir de registros intracranianos no córtex auditivo (GODEY *et al.*, 2001), MEG (GODEY *et al.*, 2001; LÜTKENHÖNER; STEINSTRÄTER, 1998) e EEG de superfície (PICTON *et al.*, 1999). Há evidências da existência de ao menos um subcomponente de P2 além do supratemporal (VERKINDT *et al.*, 1994), possivelmente com geradores em áreas frontais (PICTON *et al.*, 1999).

Na análise das medidas de amplitude das respostas evocadas, P2 é o componente que apresenta os maiores efeitos de adaptação (seção 3.2.2). Na análise dos CPs têmporo-espaciais, os efeitos de adaptação mais pronunciados ocorreram em T_2E_1 e T_2E_2 , com supressão aparentemente total do segundo em S_2 . No que concerne a efeitos relacionados à variabilidade dos estímulos em S_1 , tanto T_2E_1 como T_2E_2 variam sistematicamente com as diferenças entre as vogais. De maneira análoga ao caso das medidas de amplitude de P2, T_2E_1 aumenta em magnitude com o grau de abertura da vogal (padrão que aqui se manifesta como uma interação CATEGORIA \times DISTÂNCIA DO LIMITE), mas com diferenças significativas apenas na categoria /i/. A variação de T_2E_2 em resposta a S_1 segue um padrão diferente, com uma aparente combinação de dois efeitos: sendo os sons agrupados nas categorias /i/ e /e/, a segunda se associa a maiores escores de T_2E_2 ; consideradas as variações dentro das categorias, os escores aumentam à medida em que se aproxima do limite entre as categorias (ou seja, à medida em que os sons se tornam mais ambíguos em relação à identidade da vogal).

Em resumo, além de possibilitar uma separação entre as respostas N1 e P2, a PCA têmporo-espacial identificou contribuições de quatro subcomponentes ao complexo N1-P2 registrado em torno do vértice. Dois dos CPs têmporo-espaciais correspondem claramente a dois conhecidos subcomponentes de N1, quais sejam,

os subcomponentes 1 e 3, nos termos de Näätänen e Picton (1987). Em contraste com o primeiro, que pode ser medido em TP9 e TP10 ($N1_{c1}$), o subcomponente 3 não pode ser isolado tão facilmente nos PEs, fato que destaca a relevância da PCA têmporo-espacial. Outros dois CPs têmporo-espaciais sugerem que, de maneira similar a N1, P2 pode ser decomposto em dois subcomponentes: um com topografia difusa e máxima no vértice e outro caracterizado por uma positividade predominantemente frontal e uma negatividade distribuída nas proximidades dos mastoides e regiões posteriores. A respeito desta semelhança nos padrões observados em N1 e P2, interessa salientar que, como mencionado acima, há na literatura propostas segundo as quais P2, assim como N1, resulta da ação combinada de geradores localizados no córtex auditivo e em outras regiões não específicas à modalidade, incluindo áreas frontais (CROWLEY; COLRAIN, 2004). Também interessante é a concordância entre o exame das magnitudes dos CPs têmporo-espaciais nas condições experimentais testadas e os resultados baseados nas medidas de amplitude média dos componentes dos PEs.

4 ESTUDO II - RESPOSTAS EVOCADAS DE INCONGRUÊNCIA E CATEGORIZAÇÃO DE VOGAIS

Os resultados do Estudo I, apresentado no capítulo anterior, são desfavoráveis à hipótese de que a MMN resulte de adaptação específica ao estímulo em geradores de N1 em resposta a estímulos repetitivos. Ao menos no que se refere à atenuação de curto prazo que se dá entre o primeiro e o segundo sons de um par, os dados apresentados não sustentam que a adaptação de N1 seja específica ao estímulo. A ausência de efeitos de adaptação específica ao estímulo foi observada, seja em pares de sons de uma mesma categoria, seja em pares de sons de categorias diferentes. No caso da resposta N1, não há indícios de que esta ausência possa decorrer de uma falta de poder estatístico em detectar o referido efeito – isto é, de que possa haver um efeito com magnitude insuficiente para atingir significância. Entretanto, antes que se chegue a formular uma conclusão, cumpre examinar a MMN em resposta a vogais do mesmo conjunto a partir do qual os estímulos do Estudo I foram selecionados. É este o objetivo do Estudo II.

A MMN ocorre em resposta a estímulos desviantes, ou seja, estímulos que acarretam uma violação de uma regularidade em uma sequência de estímulos. Nos casos mais simples (sequências *oddball*), a regularidade consiste simplesmente na repetição de um som, e é violada pela apresentação de um som diferente. Winkler, Lehtokoski *et al.* (1999) verificaram que, em sequências *oddball* compostas por uma vogal repetitiva (estímulo padrão) e uma vogal desviante, a MMN pode ocorrer tanto em condições em que ambas são exemplares de uma mesma categoria vocálica como em condições em que cada vogal pertence a uma categoria diferente. Porém, as amplitudes da MMN foram maiores no último caso.

No presente estudo, foram comparadas as amplitudes da MMN em resposta a um uma vogal desviante, exemplar da categoria /e/, em sequências intra-categoria (em que o estímulo padrão é outro exemplar da categoria /e/) e em sequências inter-categorias (em que o estímulo padrão é identificado como pertencente à categoria /i/). Em contraste com estudos anteriores, a diferença entre o estímulo padrão e o desviante foi fixada em unidades de *Bark*, e não em Hertz. Espera-se, deste modo, que essa diferença traduza as distâncias perceptivas de maneira mais adequada.

4.1 MÉTODOS

4.1.1 PARTICIPANTES

Participaram deste estudo 16 voluntários (8 mulheres) falantes nativos de variedades do Português faladas em Minas Gerais, com idades entre 18 e 34 anos (média: 27) e com preferência manual direita – avaliada por meio do inventário Edimburgo (OLDFIELD, 1971). Os participantes relataram ausência de histórico de acometimentos neurológicos ou audiológicos e assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido, de acordo com as exigências do Comitê de Ética em Pesquisa – UFMG, que aprovou o projeto em que se insere este estudo (parecer nº 369.878).

4.1.2 ESTÍMULOS

O conjunto de vogais sintetizadas para Estudo I (seção 3.1.2) foi também empregado no Estudo II.

4.1.3 PROCEDIMENTOS

Assim como no Estudo I, os participantes executaram, em uma primeira sessão, duas tarefas de classificação de vogais idênticas às descritas no Estudo I (seção 3.1.3.1) – os procedimentos, materiais e local foram também os mesmos. Os PEs foram obtidos em uma segunda seção, realizada em um dia diferente. Os estímulos usados durante a aquisição dos PEs foram selecionados a partir dos resultados das tarefas de classificação.

4.1.3.1 Protocolo para a obtenção dos PEs

Para cada participante, três sons foram selecionados, um dos quais identificado como um exemplar da categoria vocálica /i/ e os demais como exemplares da categoria /e/. Esta seleção foi realizada de forma que os três sons formassem uma série sobre o *continuum* vocálico (seção 3.1.2) em passos fixos de 0,78 (F₁); 0,36 (F₂); 0,18 (F₃) Bark. Os três sons serão aqui designados como:

i *e*₁ *e*₂

Os valores que expressam o tamanho do passo, ou a distância entre sons consecutivos no espaço F₁/F₂/F₃, são duas vezes maiores que os determinados para a seleção do conjunto de seis sons no Estudo I (seção 3.1.3.2), mas correspondem exatamente à distância entre as duas vogais que compunham os pares de sons

diferentes naquele estudo (i_1-i_3 ; e_2-i_3 ; i_2-e_1 ; e_1-e_3). Portanto, a distância entre os sons denominados e_1 e e_2 no Estudo II corresponde à distância entre e_1 e e_3 no Estudo I.

Foram geradas sequências repetitivas de estímulos compostas, cada uma, por 850 apresentações (binaurais) de um som, o estímulo padrão, entremeadas por 150 apresentações (binaurais) de um som diferente, o estímulo desviante. A ordem das apresentações foi aleatorizada de modo que pelo menos três estímulos padrão ocorressem antes de cada desviante. O intervalo de tempo entre os inícios de dois estímulos consecutivos foi fixo em 750 ms. Para cada participante foram geradas quatro sequências, duas compostas pelos dois sons da categoria /e/ e duas compostas pelos sons i e e_1 (Tabela 4.1). Na sequência $e_2(e_1)$, o som e_2 é o estímulo desviante e e_1 o padrão; na sequência $e_1(e_2)$, o inverso; na sequência $i(e_1)$, i é o desviante e e_1 é o padrão; na sequência $e_1(i)$, o inverso. Temos, deste modo, entre estes pares “desviante/padrão”, dois pares intra-categoria e dois pares inter-categorias. Para cada um destes tipos de par, há um par em que o desviante é uma vogal mais fechada que o estímulo padrão (sequências $e_1(e_2)$ e $i(e_1)$) e um par em que se dá o inverso. O primeiro caso será aqui designado como “desvio por fechamento”; o segundo como “desvio por abertura”. Note que os três sons ocorrem como estímulos padrão e como desviantes, mas apenas e_1 ocorre como desviante intra-categoria e como desviante inter-categorias. Portanto, as respostas a este som serão usadas no teste da hipótese de que a MMN será mais pronunciada na condição em que os estímulos padrão e desviante não pertencem à mesma categoria.

Tabela 4.1 - Pares de estímulos desviante e padrão nas quatro sequências apresentadas no experimento.

	<i>intra-categoria</i>		<i>inter-categorias</i>	
	desviante	padrão	desviante	padrão
desvio por fechamento	e_1	(e_2)	i	(e_1)
desvio por abertura	e_2	(e_1)	e_1	(i)

As quatro sequências foram apresentadas durante o registro do EEG, com pausas de cerca de dois minutos a cada 500 eventos sonoros. No que se refere à ordem de apresentação das sequências, sendo impossível contrabalancear as 24 possibilidades de ordenamento entre os 16 participantes, foram estabelecidos quatro

ordenamentos formando um quadrado latino (cada elemento ocorre uma vez em cada coluna e uma vez em cada linha; vide Tabela 4.2) com as seguintes características: a) sequências intra-categoria e inter-categorias se alternam; b) em dois ordenamentos (1 e 3), há “desvio por fechamento” nas duas primeiras sequências e “desvio por abertura” nas duas últimas. Um deles (ordenamento 1) se inicia com uma sequência intra-categoria; o outro (ordenamento 3), por uma sequência inter-categorias. Nos dois ordenamentos restantes (4 e 2), ocorre o inverso. Este esquema impede que efeitos associados aos fatores relevantes se confundam ou interajam com efeitos de ordem de apresentação.

Tabela 4.2 - As quatro ordens de apresentação das quatro sequências de estímulos.

Ordenamento 1.	$e_1(e_2)$	$i(e_1)$	$e_2(e_1)$	$e_1(i)$
Ordenamento 2.	$e_2(e_1)$	$e_1(i)$	$e_1(e_2)$	$i(e_1)$
Ordenamento 3.	$i(e_1)$	$e_1(e_2)$	$e_1(i)$	$e_2(e_1)$
Ordenamento 4.	$e_1(i)$	$e_2(e_1)$	$i(e_1)$	$e_1(e_2)$

4.1.3.2 Registro eletroencefalográfico e aquisição dos PEs

Os procedimentos e materiais para o registro do EEG são idênticos aos empregados no Estudo I e descritos na seção 3.1.3.3. O EEG de cada participante foi segmentado em 4000 trechos (1000 eventos \times 4 sequências) de 700ms (de 100 ms antes a 600 ms depois do início do estímulo). Após a exclusão de trechos que contivessem diferenças em amplitude maiores que 400 μ V entre quaisquer pontos amostrais, foram aplicadas correção de artefatos oculares (GRATTON; COLES; DONCHIN, 1983; MILLER; GRATTON; YEE, 1988) e reamostragem para 250 Hz.

Assim como no Estudo I, o eletrodo de referência para o registro do EEG foi posicionado na ponta do nariz (Nz). Em estudos da MMN, é comum o uso da média dos mastoides (ou dos auriculares) como referência. Isto pode proporcionar melhoras na relação sinal-ruído, uma vez que a MMN, em geral, apresenta inversão de polaridade nos mastoides – com referência em Nz (NÄÄTÄNEN *et al.*, 2007; SCHRÖGER, 1998). Sendo assim, os trechos foram referenciados *off-line* à média de TP9 e TP10. Contudo, com fins de comparação com o Estudo I, os dados obtidos com a referência original (Nz) foram também analisados. Para ambos os casos, foram aplicados filtro passa banda (0,1 a 20 Hz), “correção pela linha de base” (-100

a 0 ms) e a exclusão de trechos contendo amplitudes superiores a 50 μ V ou inferiores a -50 μ V. Foram mantidos, em média, 95% dos trechos referenciados em TP9/TP10 e 90% dos trechos referenciados em Nz.

Para cada sequência, foram calculadas a média coerente dos trechos correspondentes aos estímulos desviantes e a média coerente dos trechos correspondentes aos estímulos padrão que fossem imediatamente precedentes a um desviante. Deste modo, obtém-se números comparáveis de trechos promediados nas duas condições (os números não são idênticos devido à exclusão de trechos contaminados).

4.1.3.3 Análise dos PEs

Para a análise estatística das respostas obtidas com referência em TP9/TP10, medidas de amplitude média em duas janelas de tempo foram efetuadas em Fz, a derivação da linha média em que a MMN apresentou as maiores amplitudes. Esta derivação é usualmente empregada para medidas da MMN (DUNCAN *et al.*, 2009; SCHRÖGER, 1998). As janelas de tempo para a quantificação das amplitudes foram definidas com base nas médias dos PEs dos participantes (*Grand Averages*). A primeira janela temporal, composta por 11 pontos amostrais entre 92 e 132 ms pós estímulo, foi definida a partir das latências de pico de N1; a segunda, composta por 15 pontos amostrais entre 160 e 216 ms, a partir das latências de pico da MMN nas “ondas de diferença” em que a resposta ao estímulo-padrão é subtraída da resposta ao desviante. Estas mesmas janelas de tempo foram empregadas na quantificação das respostas referenciadas em Nz. Neste caso, as amplitudes foram medias nas derivações Fz, Cz, Pz, TP9 e TP10. Assim como no Estudo I, as respostas obtidas em TP9/TP10 e as respostas obtidas nas derivações da linha média foram analisadas separadamente.

Foi testada a hipótese de que a MMN apresentaria maiores amplitudes se os estímulos padrão e desviante fossem identificados como exemplares de categorias diferentes. As comparações de interesse foram efetuadas por meio de ANOVAs para medidas repetidas com correção de *Greenhouse-Geisser* para violações do pressuposto de esfericidade. As duas janelas temporais foram testadas separadamente. Na análise dos dados referenciados em TP9/TP10, as ANOVAs incluíram os fatores TIPO DE ESTÍMULO (desviante \times padrão) e TIPO DE PAR (intra-categoria \times inter-categorias). Casos de interação significativa entre fatores

foram explorados por meio de ANOVAs adicionais para cada um dos níveis de um dos fatores envolvidos. Os valores p foram ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplas comparações.

Foram considerados como detecções da MMN efeitos significativos do fator TIPO DE ESTÍMULO em que a resposta ao desviante é mais negativa que a resposta ao estímulo padrão. A interação TIPO DE ESTÍMULO \times TIPO DE PAR indica que a magnitude da MMN (se presente) difere entre os pares intra-categoria e inter-categorias. Apenas as respostas a e_1 foram incluídas nesta análise, pois este é o único som que ocorre em ambos os níveis de ambos os fatores – ou seja como padrão e como desviante em ambos os tipos de par. Desta forma, como o mesmo som, e apenas ele, ocorre nas quatro condições, não há possibilidade de confusão entre os efeitos de interesse e possíveis modulações das respostas decorrentes de variações acústicas entre estímulos. Deste modo, foram comparadas as respostas a e_1 em quatro condições: desviante e padrão intra-categoria (sequências $e_2(e_1)$ e $e_1(e_2)$); desviante e padrão inter-categorias (sequências $e_1(i)$ e $i(e_1)$). Os dados referenciados em Nz foram analisados da mesma forma, exceto pela inclusão do fator DERIVAÇÃO.

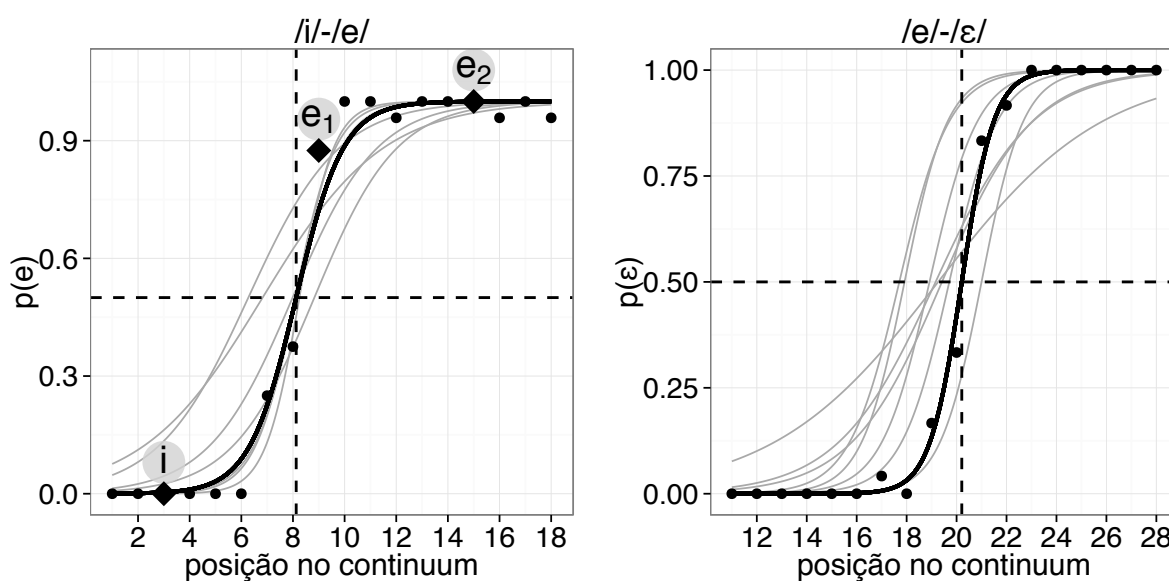
Na sequência em que e_1 é apresentado como desviante intra-categoria, o estímulo padrão é uma vogal mais aberta, qual seja, e_2 , o que estabelece um “desvio por fechamento”. Na condição de desviante *inter-categoria*, e_1 ocorre com o estímulo padrão i , estabelecendo um “desvio por abertura”. Embora a diferença (em *Bark*) entre padrão e desviante seja a mesma em todas as sequências, a associação sistemática entre o tipo de par e a direção do desvio torna importante uma verificação de possíveis efeitos relacionados à última. Em uma análise adicional das medidas das respostas aos três sons, foram executadas ANOVAs com os fatores TIPO DE ESTÍMULO e SOM para cada tipo de par (com ajuste de Bonferroni). Note que cada tipo de par inclui duas sequências com os mesmos dois sons – sendo invertidos os papéis de desviante e padrão e, conseqüentemente, a direção do desvio. O objetivo é verificar a presença ou ausência de interações TIPO DE ESTÍMULO \times SOM ou, mais especificamente, se a MMN difere entre as duas direções de desvio de maneira tal que possa oferecer uma explicação alternativa a interações TIPO DE ESTÍMULO \times TIPO DE PAR encontradas na análise principal.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 TAREFAS DE CLASSIFICAÇÃO

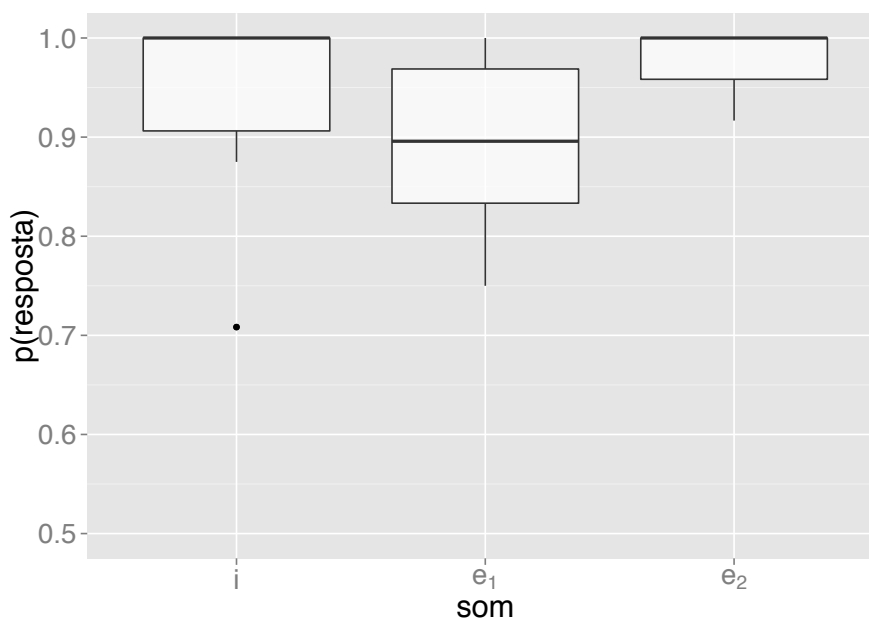
A Figura 4.1 mostra as proporções de resposta e as curvas de regressão logística para um dos participantes, sendo destacados os sons selecionados para a aquisição dos PEs. O limite entre as categorias /i/ e /e/ se situou, em média, entre os pontos 7 e 8 do *continuum* ($7,71 \pm 0,22$; média \pm EPM); o limite entre /e/ e /ɛ/, entre os pontos 19 e 20 ($19,31 \pm 0,24$). Na Figura 4.2, *boxplots* representam as variações entre participantes das proporções de respostas /i/ ao som *i*, e de respostas /e/ aos sons *e*₁ e *e*₂.

Figura 4.1 - Curvas de regressão logística (linhas pretas) ajustadas aos dados de classificação de um dos participantes (círculos/losangos).



O ponto em que as linhas tracejadas se cruzam indica o limite entre as categorias. *Esquerda*: proporções de respostas “e” na tarefa de classificação “i-e”. *Direita*: proporções de respostas “ε” na tarefa de classificação “e-ε”. *Losangos*: sons selecionados para a aquisição dos PEs; *linhas cinza*: curvas de regressão para os demais participantes.

Figura 4.2 - Boxplots das proporções de respostas /i/ ao som *i* e respostas /e/ aos sons e_1 e e_2 .

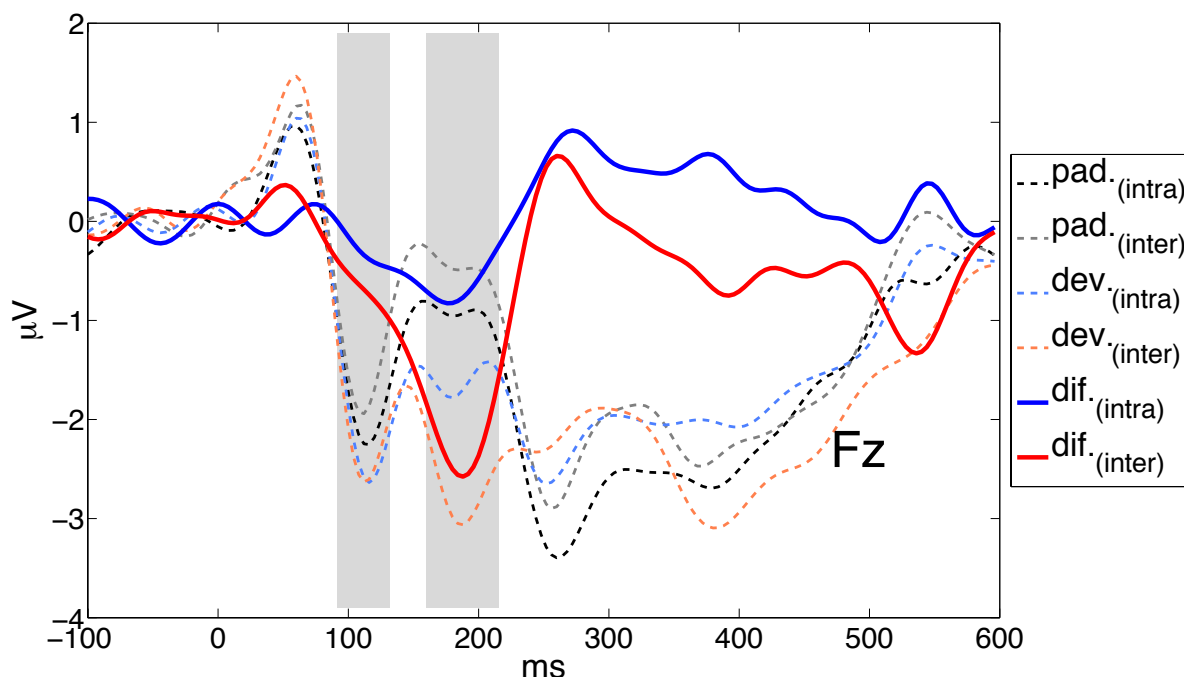


4.2.2 RESPOSTAS EM FZ COM REFERÊNCIA EM TP9/TP10

Os PEs em resposta a e_1 como estímulo padrão e como desviante são mostrados na Figura 4.3. Para a visualização da MMN, são também apresentadas ondas de diferença obtidas por meio de uma operação em que, para cada tipo de par (intra- ou inter-categorias), a resposta a e_1 na condição de estímulo padrão foi subtraída da resposta a e_1 na condição de desviante. As topografias das ondas de diferença em torno do pico da MMN são apresentadas na Figura 4.6.

Na primeira janela temporal (92 a 132 ms), um efeito do fator TIPO DE ESTÍMULO evidencia amplitudes mais negativas nas respostas aos desviantes em comparação aos estímulos padrão ($F_{(1,15)} = 11,14$; $p = 0,005$; $\eta_p^2 = 0,43$). Embora a diferença entre desviante e padrão seja numericamente superior no par inter-categorias (como se nota nas figuras 4.3 e 4.4), não foi observada interação significativa entre TIPO DE ESTÍMULO e TIPO DE PAR ($F_{(1,15)} < 1$).

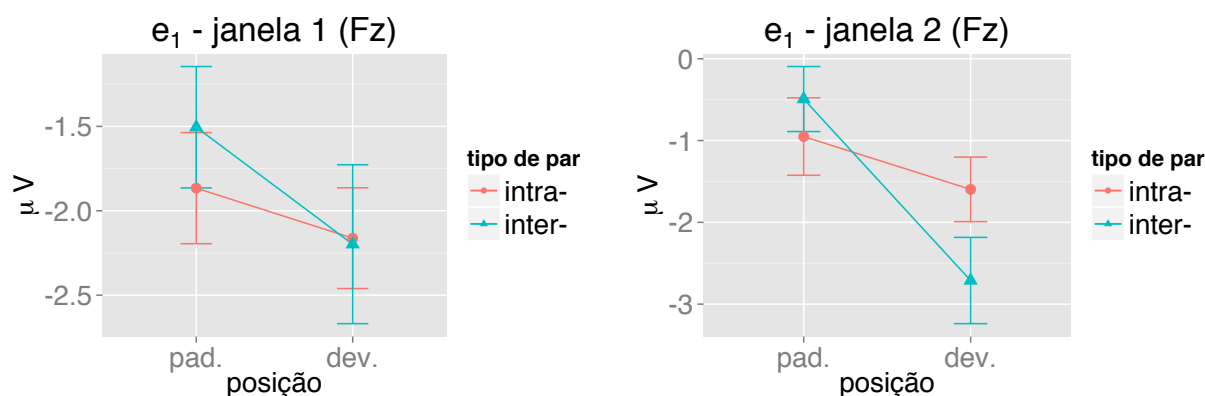
Figura 4.3 - Respostas a e_1 em Fz com referência em TP9/TP10.



Linhas tracejadas: PEs em resposta a e_1 como estímulo padrão e como desviante nos pares intra- e inter-categorias. *Linhas contínuas:* ondas de diferença (dev. - pad.) nos pares intra- e inter-categorias. (*Grand Averages*; N = 16).

Na segunda janela temporal (160 a 216 ms), além de um efeito significativo de TIPO DE ESTÍMULO ($F_{(1,15)} = 29,06$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,66$), foi verificada uma interação significativa entre TIPO DE ESTÍMULO e TIPO DE PAR ($F_{(1,15)} = 12,15$; $p = 0,003$; $\eta_p^2 = 0,45$). Observa-se, nas figuras 4.3 e 4.4, que a MMN (ou seja, a diferença entre o desviante e o padrão), é mais pronunciada no par inter-categorias que no par intra-categoria. Analisando separadamente os dois tipos de par, o efeito do TIPO DE ESTÍMULO atinge significância estatística apenas no par *inter-categoria* ($F_{(1,15)} = 29,36$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,66$), sendo marginalmente significativo no par intra-categoria ($F_{(1,15)} = 5,53$; $p = 0,065$; $\eta_p^2 = 0,27$). Os resultados referentes à segunda janela de tempo (160 a 216 ms) indicam, portanto, que, para um mesmo som vocálico na função de estímulo desviante, a MMN é mais pronunciada na sequência em que desviante e padrão são identificados como exemplares de categorias diferentes, em comparação à sequência em que ambos são exemplares de uma mesma categoria.

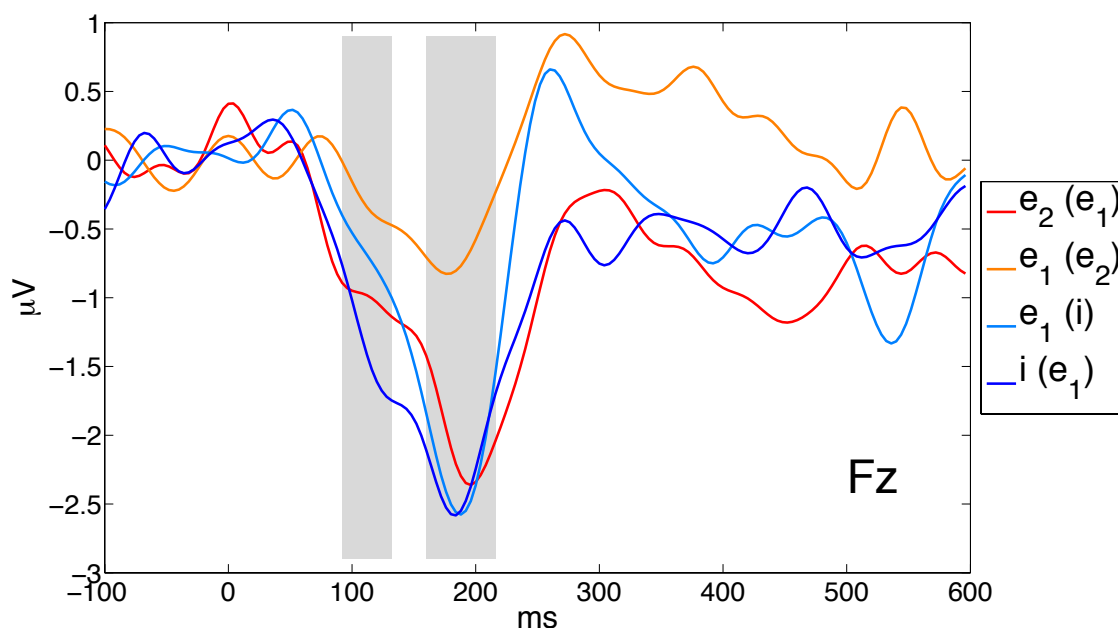
Figura 4.4 – Comparações entre respostas a e_1 como estímulo padrão e como estímulo desviante em pares intra- e inter-categorias.



À esquerda, amplitudes médias na primeira janela temporal (92 a 132 ms); à direita, amplitudes médias na segunda janela (160 a 216 ms).

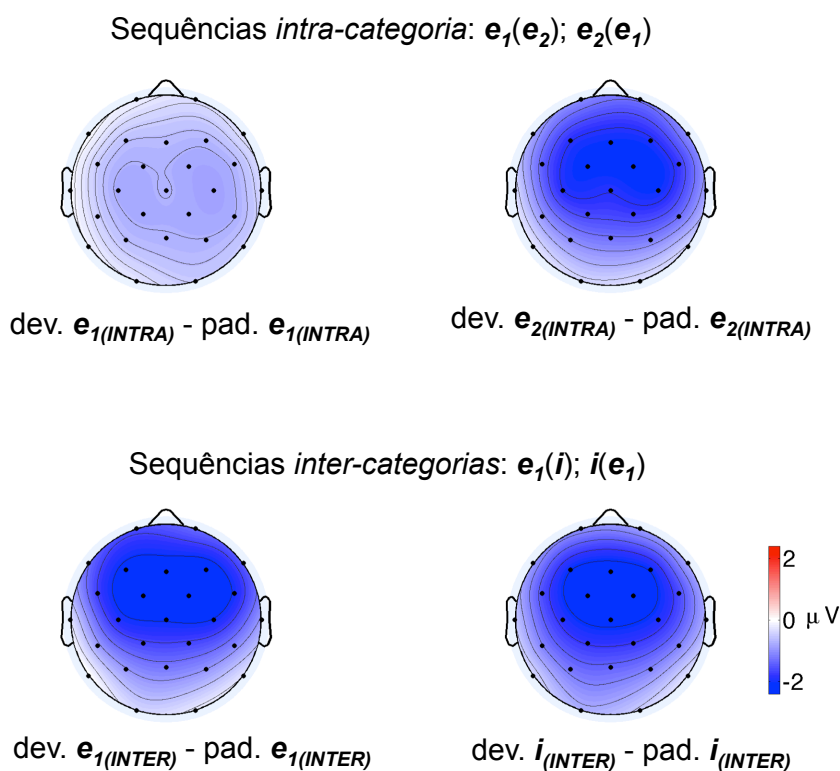
A respeito da análise de possíveis influências da direção do desvio sobre a MMN, ondas de diferença para cada um dos sons são mostradas na Figura 4.5. Estas foram calculadas por meio da subtração entre um som desviante e o mesmo som na condição de estímulo padrão. No caso do som e_1 , que tem função de desviante (e de padrão) em uma sequência intra-categoria e em uma sequência inter-categorias, a subtração se deu entre respostas a estímulos do mesmo tipo de par – veja a Figura 4.6, em que as respectivas topografias (entre 160 e 216 ms) são apresentadas. O objetivo desta análise adicional é verificar se diferenças na MMN atribuídas a efeitos de categoria seriam consistentes com uma explicação alternativa envolvendo a direção do desvio. Portanto, foi considerada apenas a janela temporal em que uma interação TIPO DE ESTÍMULO × TIPO DE PAR significativa foi detectada na análise principal – ou seja, a segunda janela (160 a 216 ms).

Figura 4.5 - Ondas de diferença em Fz com referência em TP9/TP10 para os quatro sons.



A legenda indica a sequência em que o estímulo desviante ocorreu (o estímulo padrão é indicado entre parênteses). As ondas de diferença resultam da subtração entre as respostas ao mesmo som como desviante e como padrão. (*Grand Averages*; N = 16).

Figura 4.6 - Topografias da MMN nos quatro pares “desviante-padrão” com referência em TP9/TP10.



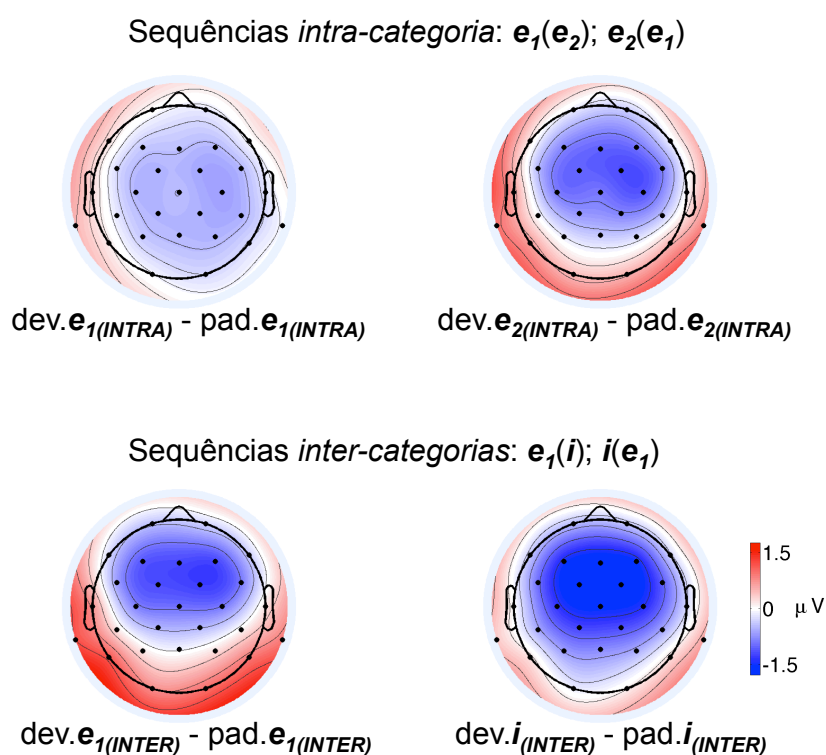
Medidas das amplitudes médias entre 160 e 216 ms (após o estímulo) nas ondas de diferença apresentadas na Figura 4.5. (*Grand Averages*; N = 16).

Uma interação significativa entre os fatores SOM e TIPO DE ESTÍMULO foi observada no caso das sequências intra-categoria $e_1(e_2)$ e $e_2(e_1)$ ($F_{(1,15)} = 10,56$; $p = 0,011$; $\eta_p^2 = 0,41$), mas não no caso das sequências inter-categorias $i(e_1)$ e $e_1(i)$ ($F < 1$). A interação significativa indica que a amplitude da MMN é maior para o desviante e_2 na sequência $e_2(e_1)$ que para o desviante e_1 na sequência $e_1(e_2)$ (Figura 4.5). Contudo, esta assimetria não ocorre entre as sequências $i(e_1)$ e $e_1(i)$ e, portanto, não deve ser atribuída à direção do desvio.

4.2.3 RESPOSTAS COM REFERÊNCIA EM NZ

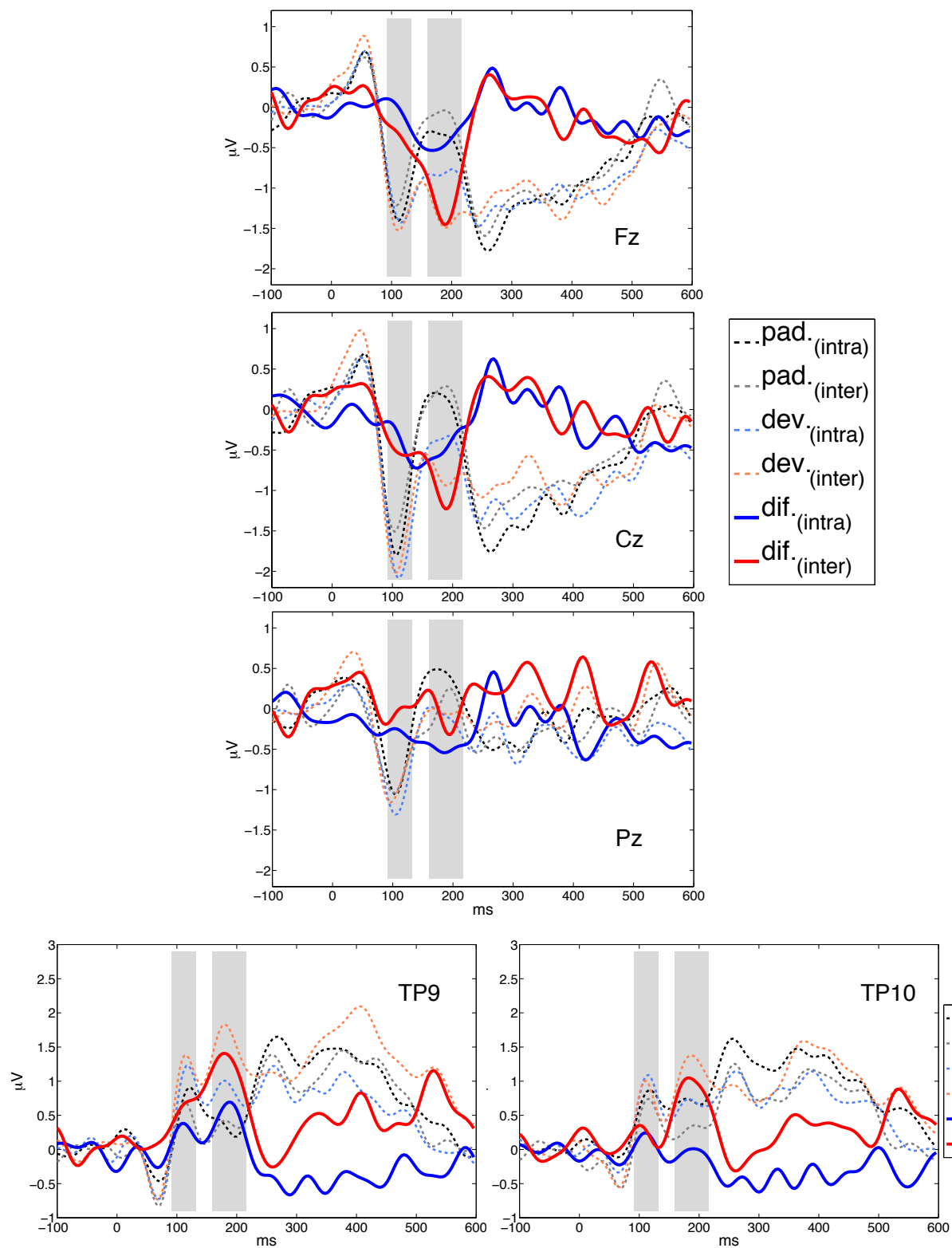
As respostas a e_1 obtidas na linha média e TP9/TP10 a partir dos sinais referenciados em Nz são apresentadas na Figura 4.8, juntamente com as ondas de diferença. Não foram observados efeitos ou interações envolvendo o fator TIPO DE ESTÍMULO na primeira janela temporal (92 a 132 ms). Na segunda janela (160 a 216 ms), a detecção da MMN depende dos fatores TIPO DE PAR e DERIVAÇÃO. As topografias da MMN nesta janela são mostradas na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Topografias da MMN nos quatro pares “desviante-padrão” com referência em Nz.



Medidas das amplitudes médias entre 160 e 216 ms (após o estímulo) nas ondas de diferença. (*Grand Averages*; $N = 16$).

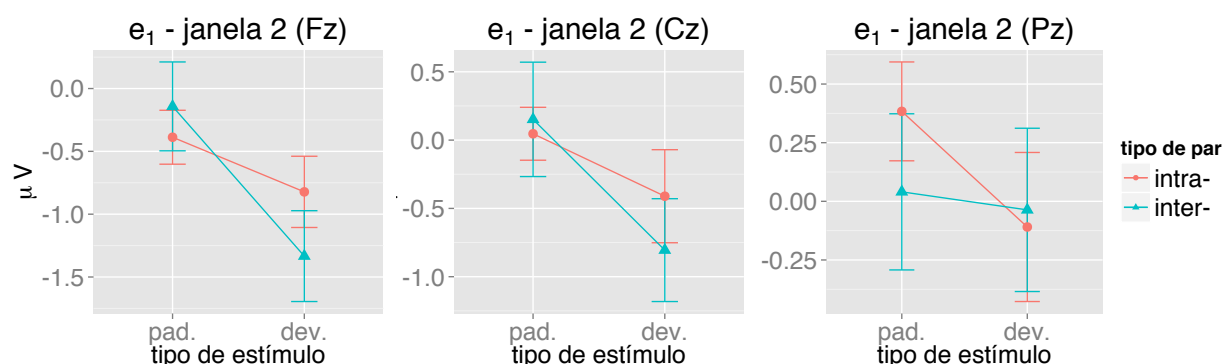
Figura 4.8 - Respostas a e_1 com referência em Nz.



Linhas tracejadas: PEs em resposta a e_1 como estímulo padrão e como desviante nos pares intra- e inter-categorias. *Linhas contínuas*: ondas de diferença (dev. - pad.) nos pares intra- e inter-categorias. (*Grand Averages*; N = 16).

Na análise das respostas a e_1 nas derivações da linha média, foi observada uma interação de terceira ordem TIPO DE ESTÍMULO \times DERIVAÇÃO \times TIPO DE PAR ($F_{(2,30)} = 9,54$; $p = 0,004$; $\varepsilon = 0,651$; $\eta_p^2 = 0,39$) – veja as figuras 4.8 e 4.9. A análise do par inter-categorias, tomado separadamente, resulta em uma interação significativa entre TIPO DE ESTÍMULO e DERIVAÇÃO ($F_{(2,30)} = 9,54$; $p = 0,004$; $\varepsilon = 0,651$; $\eta_p^2 = 0,39$), o que não ocorre na análise do par intra-categoria ($F < 1$). Essa interação, no caso do par inter-categorias, se deve a variações na magnitude da MMN (definida como a diferença entre os estímulos desviante e padrão) entre as derivações da linha média. Os resultados das ANOVAs realizadas separadamente para Fz, Cz e Pz (com os devidos ajustes), considerando apenas o par inter-categorias, revelam uma MMN significativa em Fz ($F_{(1,15)} = 14,38$; $p = 0,005$; $\eta_p^2 = 0,49$), uma aproximação à significância em Cz ($F_{(1,15)} = 7,00$; $p = 0,055$; $\eta_p^2 = 0,32$) e ausência de efeito em Pz ($F < 1$). Não foram encontrados efeitos significativos ou interação envolvendo o fator TIPO DE ESTÍMULO no par intra-categoria.

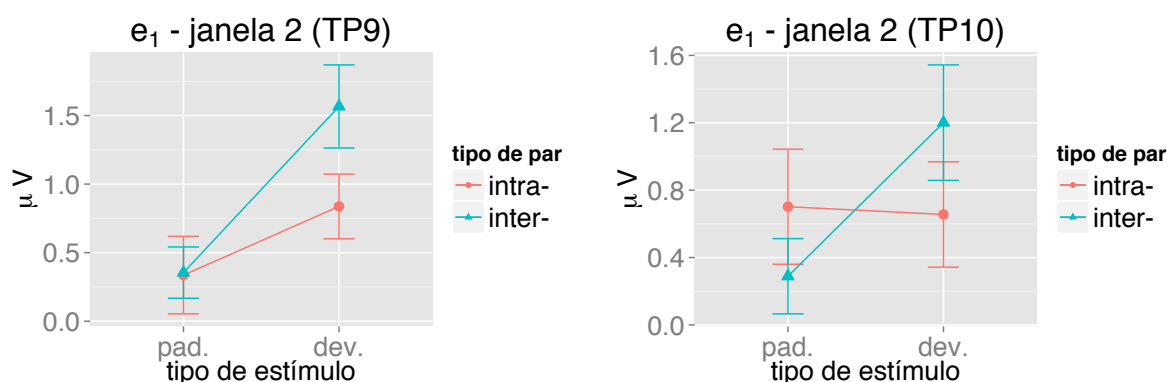
Figura 4.9 - Interação TIPO DE ESTÍMULO \times TIPO DE PAR em Fz, Cz e Pz.



Amplitudes médias das respostas a e_1 entre 160 e 216 ms.

Também nas derivações TP9 e TP10, foi verificada a interação TIPO DE ESTÍMULO \times TIPO DE PAR ($F_{(1,15)} = 6,63$; $p = 0,021$; $\eta_p^2 = 0,31$). Apenas para o par inter-categorias foi detectado efeito de TIPO DE ESTÍMULO ($F_{(1,15)} = 22,36$; $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,60$). Convém salientar que, em razão da inversão de polaridade em TP9/TP10, a MMN é, neste caso, identificada como uma resposta mais positiva ao estímulo desviante em comparação ao estímulo padrão (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Interação TIPO DE ESTÍMULO × TIPO DE PAR em TP9 e TP10. Amplitudes médias das respostas a e_1 entre 160 e 216 ms.



Amplitudes médias das respostas a e_1 entre 160 e 216 ms.

Assim como no caso dos sinais referenciados em TP9/TP10, ANOVAs adicionais, com os fatores TIPO DE ESTÍMULO × SOM × CANAL, foram executadas sobre as amplitudes das respostas a todos os sons na segunda janela temporal – separadamente para as sequências intra-categoria, $e_1(e_2)$ e $e_2(e_1)$, e inter-categorias, $i(e_1)$ e $e_1(i)$, com correção de Bonferroni. O objetivo é verificar a presença de interações envolvendo os fatores TIPO DE ESTÍMULO × SOM, o que não se observa em nenhum dos casos. Em TP9/TP10, a interação TIPO DE ESTÍMULO × SOM se aproxima da significância nas sequências intra-categoria ($F_{(1,15)} = 6,06$; $p = 0,053$; $\eta_p^2 = 0,29$), assim como a interação TIPO DE ESTÍMULO × SOM × DERIVAÇÃO nas sequências inter-categorias ($F_{(1,15)} = 5,44$; $p = 0,067$; $\eta_p^2 = 0,27$). Ainda que não tenham alcançado significância, um exame qualitativo destas interações é importante, já que poderiam colocar em questão a interpretação dos resultados da análise principal. É possível verificar na Figura 4.7, maiores magnitudes positivas em TP9/TP10 nas sequências com desvio por abertura – $e_2(e_1)$ e $e_1(i)$. Já em Cz e Fz, maiores magnitudes se associam ao desvio por fechamento nas sequências inter-categorias e ao desvio por abertura nas sequências intra-categoria. Deste modo, a interpretação segundo a qual a MMN reflete a categorização das vogais é apoiada de maneira mais segura pelas medidas realizadas na linha média.

4.3 DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo se somam a achados anteriores como evidências de que a MMN em resposta a vogais reflete o modo como estas são categorizadas pelos falantes (CHEOUR *et al.*, 1998; KIRMSE *et al.*, 2008; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1997; NENONEN *et al.*, 2005; SHESTAKOVA *et al.*, 2002; WINKLER; KUJALA; *et al.*, 1999; WINKLER; LEHTOKOSKI; *et al.*, 1999). O efeito de negatividade de incongruência se manifesta já em torno da latência de pico de N1, como amplitudes mais negativas nas respostas ao estímulo desviante que ao estímulo padrão na janela temporal entre 92 e 132 ms pós-estímulo (embora o efeito seja significativo apenas para os sinais referenciados em TP9/TP10). Apenas na janela de tempo em torno do pico da MMN (160 a 216 ms) é verificada uma associação sistemática entre esta resposta e a categorização das vogais. Em respostas a um mesmo som, e_1 , as amplitudes médias entre 160 e 216 ms são significativamente mais negativas se esse som ocorre como desviante na sequência inter-categorias $e_1(i)$ do que como padrão na sequência inter-categorias $i(e_1)$. Quanto ao par “desviante-padrão” nas sequências intra-categoria, o desviante e_1 também eliciou amplitudes mais negativas se comparado a e_1 como estímulo padrão, mas estas diferenças foram menores e não atingiram significância estatística.

A descrição acima é válida tanto para os sinais referenciados *off-line* na média de TP9 e TP10 como para os dados obtidos com a referência original em Nz. Neste último caso, foram comparadas respostas nas derivações da linha média (Fz, Cz e Pz) e em TP9 e TP10. Confirmando as expectativas, a MMN se apresenta como uma negatividade fronto-central com inversão de polaridade em TP9 e TP10.

Com base apenas nas respostas a e_1 , a interpretação dos resultados como evidências de efeitos de categorização supõe que, sendo fixa a magnitude da diferença entre os sons usados como desviante e padrão, a direção desta diferença (no espaço $F_1/F_2/F_3$) pode ser ignorada. O desviante e_1 é uma vogal mais fechada que o estímulo padrão na sequência $e_1(e_2)$, e mais aberta na sequência $e_1(i)$. Em estudos interlinguísticos em que são observados efeitos de categorização específicos às línguas (WINKLER; KUJALA; *et al.*, 1999; WINKLER; LEHTOKOSKI; *et al.*, 1999), questões análogas não comprometem as conclusões. Já no caso do presente estudo, o problema deve ser abordado por outras vias. Sendo assim, as respostas às três vogais, quais sejam, e_1 , e_2 e i , foram examinadas a fim de se

verificar se os resultados poderiam ser explicados, alternativamente, pela direção do desvio.

De maneira geral, os resultados não corroboram a hipótese de que a direção do desvio tenha um efeito sistemático sobre a MMN. Na derivação Fz com referência em TP9/TP10, uma MMN mais acentuada para o desviante da sequência $e_2(e_1)$ comparado ao desviante da sequência $e_1(e_2)$ gerou uma interação significativa entre os fatores SOM e TIPO DE ESTÍMULO, mas não há indícios de uma assimetria análoga entre as sequências $e_1(i)$ e $i(e_1)$. Nas derivações da linha média referenciadas em Nz, não foram encontradas interações significativas relacionadas a diferenças entre as duas direções de desvio. Já em TP9 e TP10, embora apenas tendências marginais a interações envolvendo os fatores TIPO DE ESTÍMULO e SOM tenham sido observadas, as respostas são sugestivas de uma associação entre maiores amplitudes da MMN e o desvio por abertura. Portanto, ao passo que as respostas registradas na linha média não comprometem a interpretação segundo a qual representações de categorias vocálicas se manifestam na amplitude da MMN, os sinais em TP9 e TP10 devem ser considerados com mais cautela.

De volta à assimetria observada nos sinais referenciados em TP9/TP10 (obtidos em Fz) entre as respostas aos desviantes das sequências $e_2(e_1)$ e $e_1(e_2)$, trata-se de um resultado secundário digno de atenção. Enquanto não foi encontrado efeito significativo correspondente à MMN em resposta ao desviante e_1 na sequência intra-categoria $e_1(e_2)$, uma MMN comparável à observada nos pares inter-categorias foi detectada para o desviante e_2 na sequência $e_2(e_1)$. Uma possibilidade é a de que a maior amplitude da resposta ao desviante e_2 se deva a uma diferença na qualidade de e_1 e e_2 como exemplares da categoria /e/. Ainda que consistentemente identificado como um exemplar dessa categoria, e_1 é mais próximo ao limite entre /i/ e /e/ e poderia ser considerado como relativamente mais ambíguo ou menos prototípico. Resultados apresentados por Näätänen *et al.* (1997) conferem algum suporte a esta interpretação. Esses autores encontraram, em resposta a uma vogal não prototípica para falantes do finlandês, menores amplitudes da MMN em comparação a uma vogal prototípica acusticamente mais próxima ao estímulo padrão – o que não ocorreu com falantes do Estoniano, para os quais ambas as vogais eram prototípicas. Embora e_1 não possa ser considerada como uma vogal não-prototípica, sua maior proximidade à categoria /i/ a tornaria um exemplar da categoria /e/ menos representativo que e_2 , como de fato sugerem os

resultados da tarefa de classificação (seção 4.2.1; Figura 4.2). Ademais, de acordo com o modelo tradicional da geração da MMN (NÄÄTÄNEN, 1990; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; WINKLER, 1999), o traço de memória sensorial gerado pela repetição de e_2 como estímulo padrão pode ser mais representativo da categoria /e/ que o traço gerado pela repetição do padrão e_1 . Assim, o desviante e_1 em uma sequência de padrões e_2 não se destacaria, sendo tratado apenas como mais uma realização da categoria /e/. Invertidos os papéis de desviante e padrão, o desviante e_2 se destacaria entre as repetições do exemplar mais periférico e_1 , gerando o efeito de MMN intra-categoria aqui observado.

Considerados em conjunto, os resultados dos estudos I e II não oferecem apoio a modelos segundo os quais a MMN resultaria unicamente da adaptação específica ao estímulo em geradores da resposta N1 ao estímulo padrão (JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2004; MAY; TIITINEN, 2010) e são consistentes com modelos que incluem geradores da MMN que não contribuem com N1 (NÄÄTÄNEN, 1990; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; WINKLER, 1999; OPITZ; SCHRÖGER; VON CRAMON, 2005). Verifica-se, em primeiro lugar, que a adaptação de N1 em resposta ao segundo som (S_2) de um par não é específica ao estímulo, seja o par composto por sons de uma mesma categoria ou por sons de categorias distintas. Em segundo lugar, com estímulos selecionados a partir do mesmo *continuum* sonoro entre /e/ e /i/, foi obtida a MMN, sendo esta sujeita a efeitos atribuíveis à organização categórica das vogais. Adicionalmente, embora a MMN tenha sido detectada na janela temporal correspondente ao pico de N1, efeitos significativos relacionados à categorização foram observados apenas em uma segunda janela temporal, estabelecida com base nas latências de pico da MMN e que se sobrepõe ao curso temporal típico de P2.

5 DISCUSSÃO GERAL

Os resultados apresentados neste trabalho constituem contribuições a respeito do emprego dos PEs de longa latência em investigações acerca da percepção dos sons da fala (ou da percepção auditiva de modo geral) e, em particular, da questão da geração da MMN, sua susceptibilidade a efeitos de categorização e sua relação com N1. Para além das respostas fornecidas através dos testes das hipóteses propostas, diversas questões decorrem das evidências encontradas.

Em condições de escuta passiva, foram observados, por um lado, efeitos de adaptação de N1 e P2 que se mostram (sobretudo em N1) inespecíficos ao estímulo e, por outro, uma MMN associada à distinção entre duas categorias vocálicas. Os resultados indicam, portanto, que processos neurais geradores da MMN envolvidos no processamento de informações referentes a categorias vocálicas não se manifestam nos padrões de adaptação do complexo N1-P2. Em resposta a uma das vogais apresentadas como S_2 no Estudo I, foi observada uma tendência marginal em P2 ao que aqui se denomina “adaptação específica à categoria” – um caso particular de adaptação específica ao estímulo em que a atenuação é menos pronunciada em pares de sons de categorias diferentes. Todavia, cumpre ressaltar que, ainda que esta tendência seja uma manifestação de um efeito real, este ocorreria no sentido inverso ao efeito correspondente à MMN – amplitudes mais negativas em repostas a estímulos desviantes.

Como se disse, alguns autores (JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2004; MAY; TIITINEN, 2004, 2010) sugerem que a MMN resulta de modulações na amplitude e na latência da atividade de geradores de N1: comparada à resposta ao estímulo padrão, a resposta ao desviante envolveria unidades neurais relativamente mais responsivas, devido à adaptação específica ao estímulo, mas com uma latência aumentada, em razão da ação de mecanismos de inibição lateral. Esta proposta contrasta com o modelo predominante (NÄÄTÄNEN, 1990; NÄÄTÄNEN; JACOBSEN; WINKLER, 2005; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; WINKLER, 1999), que sustenta que a MMN e o N1 são manifestações de processos distintos de análise dos estímulos auditivos. No Estudo II, embora as deflexões negativas correspondentes a N1 sejam mais atenuadas nas respostas ao estímulo padrão que nas respostas ao estímulo desviante, não são observadas latências maiores na

últimas. Porém, isto não implica necessariamente em uma separação entre a MMN e N1. Sendo este componente gerado em múltiplas fontes, seria possível, a princípio, que apenas parte dos geradores de N1 sofresse efeitos de atraso devido à inibição lateral na resposta ao desviante. Isto destaca a importância dos resultados do Estudo I como evidências de que a MMN não pode ser explicada pelos mecanismos de adaptação de N1 atuantes nas condições estabelecidas pelo delineamento experimental empregado. Isto é, o efeito de “atenuação de curto prazo” sobre N1, que ocorre entre o primeiro e o segundo sons de um par ou de uma série (BUDD *et al.*, 1998; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; ROSBURG, 2004; ROSBURG *et al.*, 2004, 2006; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011), não apresenta especificidade ao estímulo, seja em pares intra-categoria ou em pares inter-categorias e, portanto, não contribui como causa da negatividade característica de respostas a estímulos desviantes, identificada como MMN.

Confrontados com os resultados do Estudo I, relatos de efeitos de atenuação específica ao estímulo sobre N1 em sequências longas de tons simples alternantes (HSU; HÄMÄLÄINEN; WASZAK, 2014; NÄÄTÄNEN *et al.*, 1988; YAGCIOGLU; UNGAN, 2008) ou aleatoriamente variáveis (HERRMANN; HENRY; OBLESER, 2013; HERRMANN; SCHLICHTING; OBLESER, 2014)²⁰ poderiam ser atribuídos a efeitos de atenuação com cursos temporais bem mais lentos, como a “habituação de longo prazo” (BRATTICO; TERVANIEMI; PICTON, 2003; WOODS; ELMASIAN, 1986). Neste ponto, são relevantes resultados indicativos de uma estabilização da amplitude de N1 após uma atenuação entre o primeiro e o segundo sons de uma série (BUDD *et al.*, 1998; GRAU; FUENTEMILLA; MARCO-PALLARÉS, 2007; ROSBURG, 2004; ROSBURG *et al.*, 2004, 2006; ROSBURG; ZIMMERER; HUONKER, 2010; ZHANG, FAWEN *et al.*, 2011). Entre estes, destacam-se os apresentados por Zhang *et al.* (2011), que empregaram séries de 10 sons (as mais numerosas entre os estudos supracitados), com intervalos de 700 ms entre estímulos, e não encontraram diferenças significativas entre as respostas ao segundo e ao décimo sons. Isto sugere que, dada uma sequência de estímulos sonoros, a atenuação mais rápida que ocorre entre o primeiro e o segundo sons é

²⁰ Convém notar, como assinalado na seção 3.3, que os referidos estudos empregam como estímulos tons simples, que não são plenamente comparáveis a sons complexos como as vogais.

independente de efeitos de habituação de longo prazo que se dão ao longo de sequências de estímulos ou intervalos de tempo muito mais extensos. Se efeitos de atenuação por habituação de longo prazo sobre os estímulos padrão em uma tarefa *oddball* se relacionam à MMN, esta é uma questão que deverá ser abordada em estudos vindouros.

A ausência de efeitos de adaptação específica ao estímulo não deve ser considerada como evidência de que as populações neuronais subjacentes a N1 e P2 respondem de maneira inespecífica às vogais apresentadas. Em primeiro lugar, a atenuação observada nos PEs não implica em que todos os geradores se encontrem em um estado de menor responsividade. Pode ocorrer, por exemplo, que uma parte dos geradores responda diferentemente a diferentes estímulos, mas não seja susceptível aos efeitos de adaptação que agem sobre outros geradores. Ademais, efeitos concomitantes, como os de inibição lateral (PANTEV *et al.*, 2004), poderiam causar atenuação da atividade em unidades neurais que não se encontram sob efeitos de adaptação. Outro ponto a ser observado é o de que o conhecimento limitado sobre os mecanismos subjacentes aos PEs impõem sérias restrições às inferências baseadas nos mesmos sobre o processamento de informações no córtex cerebral. Considera-se, por exemplo, que além de uma superposição linear de atividade ao EEG de fundo (visão clássica), podem contribuir para as respostas evocadas processos não-lineares de reajuste de fase das oscilações de EEG (DAVID; HARRISON; FRISTON, 2005). Com base em modelos matemáticos, Telenkzuk, Nikulin e Curio (2010) argumentam que pode não ser possível a distinção entre essas duas contribuições em medidas não-invasivas de respostas evocadas em registros de EEG/MEG.

Variações em amplitude associadas a diferenças entre as vogais apresentadas como S_1 (o primeiro estímulo do par) no Estudo I foram verificadas em componentes do complexo N1-P2. Isto sugere que ao menos parte das unidades neurais geradoras produzem atividade específica ao estímulo. As amplitudes de $N1_{c1}$ (o subcomponente supratemporal de N1 identificado como uma deflexão positiva em TP9/TP10) e P2 variaram sistematicamente, mas de maneiras diversas, com as seis vogais. No caso do primeiro, sendo agrupadas as vogais em suas respectivas categorias, maiores amplitudes foram observadas para as vogais /i/ comparadas às vogais /e/. Já as amplitudes de P2 parecem aumentar com o grau de abertura da vogal, mas o efeito foi significativo apenas entre as vogais /i/. Pondera-

se, na seção 3.3, que, tomado isoladamente, o efeito observado sobre N1_{c1} não deve ser considerado como evidência fidedigna de que processos subjacentes a N1 contenham informações sobre distinções entre categorias vocálicas, assim como não o são os resultados de Scharinger, Idsardi *et al.* (2011) sobre a localização do N1m em resposta a vogais. Deste modo, novos experimentos que possam proporcionar respostas satisfatórias a esta questão devem ser elaborados.

Uma análise de componentes principais (PCA) dos PEs obtidos no Estudo I produziu resultados convergentes com os obtidos por procedimentos mais tradicionais de análise aqui adotados. Os resultados da decomposição do complexo N1-P2 pela PCA têmporo-espacial, e dos critérios preestabelecidos de seleção de CPs, são condizentes com a literatura pertinente. Na etapa temporal da PCA, foram encontrados CPs separados correspondentes a N1 e P2; na etapa espacial, o CP associado a N1 foi decomposto em dois CPs têmporo-espaciais cujas topografias estão de acordo com descrições de dois subcomponentes conhecidos de N1: o subcomponente 1, gerado no córtex auditivo supratemporal e caracterizado por uma distribuição topográfica fronto-central e inversão de polaridade em derivações na região dos mastoides; o subcomponente 3, caracterizada por uma topografia difusa, máxima no vértice e mais posterior em comparação à do subcomponente 1 (NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987). Adicionalmente, foram obtidos dois CPs têmporo-espaciais associados a P2, uma resposta que provavelmente resulta da combinação entre dois ou mais subcomponentes – ao menos um dos quais gerado no plano supratemporal (CROWLEY; COLRAIN, 2004).

Os efeitos das manipulações experimentais efetuadas sobre os CPs obtidos são muito semelhantes aos efeitos observados nas medidas tradicionais das amplitudes médias das respostas correspondentes. Particularmente interessantes são as observações de que o CP associado, por sua topografia, ao subcomponente 1 de N1 varia em magnitude com a vogal apresentada como S₁, o que não ocorre com o CP associado ao subcomponente 3. Em consonância com este padrão, considera-se que a atividade neural manifesta no subcomponente 1 esteja envolvida com o processamento de informação sensorial referente a atributos dos estímulos no córtex auditivo supratemporal, ao passo que o subcomponente 3 refletiria funções, desempenhadas em outras áreas, de detecção de transientes e direcionamento da atenção (LANGE, 2012, 2013; NÄÄTÄNEN; KUJALA; WINKLER, 2011; NÄÄTÄNEN; PICTON, 1987; NÄÄTÄNEN; WINKLER, 1999; SANMIGUEL;

TODD; SCHRÖGER, 2013). Vale notar, nos resultados do Estudo I, que o subcomponente de N1 em que se encontra algum grau de especificidade ao estímulo, manifesta em modulações associadas às diferenças entre as vogais em S_1 , é justamente aquele em que o efeito de adaptação se mostra mais fraco. Os resultados da PCA sugerem ainda que os dois CPs que contribuem para P2 são funcionalmente distintos, um dos quais possivelmente relacionado ao grau de ambiguidade de um som no que diz respeito ao seu pertencimento a uma ou outra categoria. Estes resultados requerem replicação e estabelecem ocasião para novos estudos do complexo N1-P2 em que um número maior de derivações viabilize procedimentos de localização das fontes dos CPs obtidos na PCA têmporo-espacial.

6 CONCLUSÃO

Embora diferentes subcomponentes do complexo N1-P2 se mostrem sujeitos a efeitos de adaptação, não há evidência de adaptação específica ao estímulo. Deste modo, em contraste com o efeito de negatividade de incongruência (MMN), a adaptação de N1 e P2 – definida como a atenuação decorrente da resposta a um estímulo precedente – não reflete processos de discriminação ou categorização de vogais em condições passivas de estimulação. Contudo, foram encontradas evidências de que respostas de populações neurais subjacentes a N1 e P2 apresentam especificidade ao estímulo, ainda que esta não se manifeste nos padrões de adaptação.

A ausência de adaptação específica ao estímulo é particularmente evidente em N1 e, diante do que se verifica a respeito da MMN, indica que a atenuação de N1 e a MMN não são consequências de um mesmo processo de adaptação. Os resultados são consistentes com modelos segundo os quais há geradores da MMN não envolvidos na geração de N1. Um efeito associado à distinção entre as categorias vocálicas /i/ e /e/, juntamente com resultados de estudos anteriores, indica que a MMN reflete operações de processamento de informação no córtex envolvendo representações dessas categorias, que são provavelmente adquiridas com a experiência linguística e armazenadas na memória de longo prazo. Considerando as respostas evocadas, o paradigma *oddball* para a aquisição da MMN permanece, portanto, como o método de escolha para a investigação dos processos perceptivos envolvidos nas distinções entre sons da fala em condições de escuta passiva.

Os resultados apresentados neste trabalho levantam questões interessantes a serem examinadas em novos estudos. Em primeiro lugar, é de interesse que os efeitos lentos de atenuação verificados em estudos da habituação de longo prazo sejam também investigados em relação à especificidade ao estímulo e à categoria. Seriam também de grande relevância estudos que, usando protocolos experimentais análogos ao elaborado para o Estudo I, permitissem verificar se os efeitos de adaptação sobre N1 e P2 permanecem ou não inespecíficos ao estímulo em condições em que o participante dirige a atenção à estimulação auditiva ou mesmo a um aspecto em particular dos estímulos, como a qualidade vocálica.

REFERÊNCIAS

- AALTONEN, Olli *et al.* Event-related brain potentials and the perception of a phonetic continuum. *Biological Psychology*, v. 24, n. 3, p. 197–207, jun. 1987.
- ABOLAFIA, Juan M. *et al.* Cortical auditory adaptation in the awake rat and the role of potassium currents. *Cerebral Cortex*, v. 21, n. 5, p. 977–990, maio 2011.
- AHVENINEN, Jyrki *et al.* Task-modulated “what” and “where” pathways in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 39, p. 14608–14613, set. 2006.
- ALTMANN, Christian F. *et al.* Temporal Dynamics of Adaptation to Natural Sounds in the Human Auditory Cortex. *Cerebral Cortex*, v. 18, n. 6, p. 1350–1360, jun. 2008.
- ATCHERSON, Dr. Samuel R. *et al.* Long-Term Stability of N1 Sources Using Low-Resolution Electromagnetic Tomography. *Brain Topography*, v. 19, n. 1-2, p. 11–20, dez. 2006.
- AULANKO, Reijo *et al.* Phonetic invariance in the human auditory cortex. *Neuroreport*, v. 4, n. 12, p. 1356–1358, set. 1993.
- BAUMANN, Simon; PETKOV, Christopher I.; GRIFFITHS, Timothy D. A unified framework for the organization of the primate auditory cortex. *Frontiers in Systems Neuroscience*, v. 7, abr. 2013.
- BELL, Anthony J.; SEJNOWSKI, Terrence J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation*, v. 7, n. 6, p. 1129–1159, 1995.
- BIDELMAN, Gavin M.; MORENO, Sylvain; ALAIN, Claude. Tracing the emergence of categorical speech perception in the human auditory system. *NeuroImage*, v. 79, p. 201–212, out. 2013.
- BOERSMA, Paul; ESCUDERO, Paola; HAYES, Rachel. Learning Abstract Phonological from Auditory Phonetic Categories: An Integrated Model for the Acquisition of Language-Specific Sound Categories. In: 15TH INTERNATIONAL CONGRESS OF PHONETIC SCIENCES, ago. 2003, Barcelona. *Anais...* Barcelona: [s.n.], ago. 2003. p. 1013–1016.
- BOERSMA, Paul; WEENINK, David. *Praat: doing phonetics by computer*. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.praat.org>>. Acesso em: 5 dez. 2012.
- BOUTROS, Nash N. *et al.* Mapping repetition suppression of the N100 evoked response to the human cerebral cortex. *Biological psychiatry*, v. 69, n. 9, p. 883–889, maio 2011.
- BRANDMEYER, Alex; DESAIN, Peter W M; MCQUEEN, James M. Effects of native language on perceptual sensitivity to phonetic cues. *Neuroreport*, v. 23, n. 11, p. 653–657, ago. 2012.

BRATTICO, Elvira; TERVANIEMI, Mari; PICTON, Terence W. Effects of brief discrimination-training on the auditory N1 wave. *Neuroreport*, v. 14, n. 18, p. 2489–2492, dez. 2003.

BRUGGE, John F. *et al.* Functional localization of auditory cortical fields of human: Click-train stimulation. *Hearing Research*, v. 238, n. 1–2, p. 12–24, abr. 2008.

BUDD, T. W. *et al.* Decrement of the N1 auditory event-related potential with stimulus repetition: habituation vs. refractoriness. *International Journal of Psychophysiology*, v. 31, n. 1, p. 51–68, dez. 1998.

BUTLER, Robert A. The influence of spatial separation of sound sources on the auditory evoked response. *Neuropsychologia*, v. 10, n. 2, p. 219–225, jul. 1972.

CASSEDAY, John H.; FREMOUW, Thane; COVEY, Ellen. The Inferior Colliculus: A Hub for the Central Auditory System. In: OERTEL, DONATA; FAY, RICHARD R.; POPPER, ARTHUR N. (Org.). *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*. Springer Handbook of Auditory Research. [S.l.]: Springer New York, 2002. p. 238–318.

CHECHIK, Gal *et al.* Reduction of Information Redundancy in the Ascending Auditory Pathway. *Neuron*, v. 51, n. 3, p. 359–368, mar. 2006.

CHEOUR, Marie *et al.* Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience*, v. 1, n. 5, p. 351–353, set. 1998.

COSTA, Sandra da *et al.* Human Primary Auditory Cortex Follows the Shape of Heschl's Gyrus. *The Journal of Neuroscience*, v. 31, n. 40, p. 14067–14075, out. 2011.

CROWLEY, Kate E; COLRAIN, Ian M. A review of the evidence for P2 being an independent component process: age, sleep and modality. *Clinical Neurophysiology*, v. 115, n. 4, p. 732–744, abr. 2004.

DAVID, Olivier; HARRISON, Lee; FRISTON, Karl J. Modelling event-related responses in the brain. *NeuroImage*, v. 25, n. 3, p. 756–770, abr. 2005.

DAVIS, Hallowell *et al.* The slow response of the human cortex to auditory stimuli: Recovery process. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 21, n. 2, p. 105–113, ago. 1966.

DEGUCHI, Chizuru *et al.* Pre-attentive and attentive processing of French vowels. *Brain Research*, v. 1366, p. 149–161, 17 dez. 2010.

DEHAENE-LAMBERTZ, Ghislaine *et al.* Neural correlates of switching from auditory to speech perception. *NeuroImage*, v. 24, n. 1, p. 21–33, jan. 2005.

DEHAENE-LAMBERTZ, Ghislaine. Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *Neuroreport*, v. 8, n. 4, p. 919–924, mar. 1997.

DELATTRE, Pierre *et al.* An experimental study of the acoustic determinants of vowel color; observations on one- and two-formant vowels synthesized from spectrographic patterns. *Word*, v. 8, p. 195–210, 1952.

DELORME, Arnaud; MAKEIG, Scott. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 134, n. 1, p. 9–21, mar. 2004.

DEOUELL, Leon Y. The frontal generator of the mismatch negativity revisited. *Journal of Psychophysiology*, v. 21, n. 3/4, p. 188–203, 2007.

DIEHL, Randy L. Acoustic and auditory phonetics: the adaptive design of speech sound systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, v. 363, n. 1493, p. 965–978, mar. 2008.

DIEN, Joseph. Applying Principal Components Analysis to Event-Related Potentials: A Tutorial. *Developmental Neuropsychology*, v. 37, n. 6, p. 497–517, ago. 2012.

DIEN, Joseph. Evaluating two-step PCA of ERP data with Geomin, Infomax, Oblimin, Promax, and Varimax rotations. *Psychophysiology*, v. 47, n. 1, p. 170–183, jan. 2010a.

DIEN, Joseph. Progressing towards a consensus on PCA of ERPs. *Clinical Neurophysiology*, v. 117, n. 3, p. 699–702, mar. 2006.

DIEN, Joseph. The ERP PCA Toolkit: an open source program for advanced statistical analysis of event-related potential data. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 187, n. 1, p. 138–145, mar. 2010b.

DIEN, Joseph; BEAL, Daniel J; BERG, Patrick. Optimizing principal components analysis of event-related potentials: Matrix type, factor loading weighting, extraction, and rotations. *Clinical Neurophysiology*, v. 116, n. 8, p. 1808–1825, ago. 2005.

DIEN, Joseph; FRISHKOFF, Cwen A. Principal Components Analysis of ERP Data. In: HANDY, TODD C. (Ed.). *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. p. 189–208.

DIEN, Joseph; KHOE, Wayne; MANGUN, George R. Evaluation of PCA and ICA of simulated ERPs: Promax vs. infomax rotations. *Human Brain Mapping*, v. 28, n. 8, p. 742–763, ago. 2007.

DRESHER, B. Elan. The Phoneme. In: OOSTENDORP, MARC VAN *et al.* (Org.). *The Blackwell Companion to Phonology*. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2011. v. 1. p. 241–266.

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, n. 11, p. 1883–1908, 2009.

EGGERMONT, Jos J. Between sound and perception: reviewing the search for a neural code. *Hearing Research*, v. 157, n. 1-2, p. 1–42, jul. 2001.

EGGERMONT, Jos J; PONTON, Curtis W. The neurophysiology of auditory perception: from single units to evoked potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, v. 7, n. 2, p. 71–99, abr. 2002.

ESCUDEIRO, Paola *et al.* A cross-dialect acoustic description of vowels: Brazilian and European Portuguese. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 126, n. 3, p. 1379–1393, set. 2009.

EULITZ, Carsten *et al.* Magnetic and electric brain activity evoked by the processing of tone and vowel stimuli. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, v. 15, n. 4, p. 2748–2755, abr. 1995.

EULITZ, Carsten; OBLESER, Jonas; LAHIRI, Aditi. Intra-subject replication of brain magnetic activity during the processing of speech sounds. *Cognitive Brain Research*, v. 19, n. 1, p. 82–91, mar. 2004.

FASTL, Hugo; ZWICKER, Eberhard. *Psychoacoustics: Facts and Models*. 3. ed. Berlin: Springer, 2007.

FELDMAN, Naomi H.; GRIFFITHS, Thomas L.; MORGAN, James L. The influence of categories on perception: Explaining the perceptual magnet effect as optimal statistical inference. *Psychological Review*, v. 116, n. 4, p. 752–782, 2009.

FORMISANO, Elia *et al.* Mirror-Symmetric Tonotopic Maps in Human Primary Auditory Cortex. *Neuron*, v. 40, n. 4, p. 859–869, nov. 2003.

FUJIOKA, Takako *et al.* Tonotopic representation of missing fundamental complex sounds in the human auditory cortex. *European Journal of Neuroscience*, v. 18, n. 2, p. 432–440, 2003.

FUJISAKI, Hiroya. On the modes and mechanisms of speech perception: analysis and interpretation of categorical effects in discrimination. In: LINDBLOM, BJÖRN; ÖHMAN, SVEN EG (Org.). *Frontiers of speech communication research*. [S.l.: s.n.], 1979. p. 177–189.

GABRIEL, D. *et al.* Effect of stimulus frequency and stimulation site on the N1m response of the human auditory cortex. *Hearing Research*, v. 197, n. 1–2, p. 55–64, nov. 2004.

GARAGNANI, Max; PULVERMÜLLER, Friedemann. From sounds to words: a neurocomputational model of adaptation, inhibition and memory processes in auditory change detection. *NeuroImage*, v. 54, n. 1, p. 170–181, 1 jan. 2011.

GERRITS, Ellen; SCHOUTEN, M E H. Categorical perception depends on the discrimination task. *Perception & Psychophysics*, v. 66, n. 3, p. 363–376, abr. 2004.

GIARD, Marie-Hélène *et al.* Dissociation of temporal and frontal components in the human auditory N1 wave: a scalp current density and dipole model analysis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 92, n. 3, p. 238–252, maio 1994.

GIARD, Marie-Hélène *et al.* Scalp current density mapping in the analysis of mismatch negativity paradigms. *Brain Topography*, v. 27, n. 4, p. 428–437, jul. 2014.

GODEY, B *et al.* Neuromagnetic source localization of auditory evoked fields and intracerebral evoked potentials: a comparison of data in the same patients. *Clinical Neurophysiology*, v. 112, n. 10, p. 1850–1859, out. 2001.

GRATTON, Gabriele; COLES, Michael G. H; DONCHIN, Emanuel. A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 55, n. 4, p. 468–484, abr. 1983.

GRAU, C.; FUENTEMILLA, LI.; MARCO-PALLARÉS, J. Functional neural dynamics underlying auditory event-related N1 and N1 suppression response. *NeuroImage*, v. 36, n. 3, p. 522–531, jul. 2007.

GRIMM, Sabine; SCHRÖGER, Erich. Pre-attentive and attentive processing of temporal and frequency characteristics within long sounds. *Cognitive Brain Research*, v. 25, n. 3, p. 711–721, dez. 2005.

HACKETT, Troy A. Anatomical Organization of the Auditory Cortex. *Journal of the American Academy of Audiology*, v. 19, n. 10, p. 774–779, nov. 2008.

HACKETT, Troy A. *et al.* Feedforward and feedback projections of caudal belt and parabelt areas of auditory cortex: refining the hierarchical model. *Frontiers in Neuroscience*, v. 8, abr. 2014.

HACKETT, Troy A. Information flow in the auditory cortical network. *Hearing research*, v. 271, n. 1-2, p. 133–146, jan. 2011.

HARI, Riitta *et al.* Interstimulus interval dependence of the auditory vertex response and its magnetic counterpart: Implications for their neural generation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 54, n. 5, p. 561–569, nov. 1982.

HARI, Riitta; PARKKONEN, Lauri; NANGINI, Cathy. The brain in time: insights from neuromagnetic recordings. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1191, n. 1, p. 89–109, mar. 2010.

HENDRICKSON, Alan E.; WHITE, Paul Owen. Promax: A Quick Method for Rotation to Oblique Simple Structure. *British Journal of Statistical Psychology*, v. 17, n. 1, p. 65–70, 1964.

HERRMANN, Björn; HENRY, Molly J.; OBLESER, Jonas. Frequency-specific adaptation in human auditory cortex depends on the spectral variance in the acoustic stimulation. *Journal of Neurophysiology*, v. 109, n. 8, p. 2086–2096, 15 abr. 2013.

HERRMANN, Björn; SCHLICHTING, Nadine; OBLESER, Jonas. Dynamic Range Adaptation to Spectral Stimulus Statistics in Human Auditory Cortex. *The Journal of Neuroscience*, v. 34, n. 1, p. 327–331, jan. 2014.

HICKOK, Gregory; POEPEL, David. The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, v. 8, n. 5, p. 393–402, maio 2007.

HILLENBRAND, James *et al.* Acoustic characteristics of American English vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 97, n. 5, p. 3099–3111, maio 1995.

HILL, Penelope R; MCARTHUR, Genevieve M; BISHOP, Dorothy V M. Phonological categorization of vowels: a mismatch negativity study. *Neuroreport*, v. 15, n. 14, p. 2195–2199, out. 2004.

HILLYARD, Steven A *et al.* Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, v. 182, n. 4108, p. 177–180, out. 1973.

HOWARD, M A *et al.* Auditory cortex on the human posterior superior temporal gyrus. *The Journal of Comparative Neurology*, v. 416, n. 1, p. 79–92, jan. 2000.

HSU, Yi-Fang; HÄMÄLÄINEN, Jarmo A.; WASZAK, Florian. Repetition suppression comprises both attention-independent and attention-dependent processes. *NeuroImage*, v. 98, p. 168–175, set. 2014.

HYVÄRINEN, Aapo; KARHUNEN, Juha; OJA, Erkki. *Independent Component Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 2001.

HYVÄRINEN, Aapo; OJA, Erkki. Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural networks*, v. 13, n. 4-5, p. 411–430, 2000.

IYER, Darshan; DÍAZ, Javier; ZOURIDAKIS, George. Consistency of the auditory evoked response: The presence of aberrant responses and their effect on N100 localization. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 208, n. 2, p. 173–180, jul. 2012.

JÄÄSKELÄINEN, Iiro P *et al.* Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 101, n. 17, p. 6809–6814, abr. 2004.

JACOBSEN, Thomas *et al.* Familiarity affects the processing of task-irrelevant auditory deviance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 17, n. 11, p. 1704–1713, nov. 2005.

JACOBSEN, Thomas; SCHRÖGER, Erich. Input to verbal working memory: Preattentive construction of the central speech representation. *Experimental Psychology*, v. 51, n. 4, p. 231–239, 2004.

JACOBSEN, Thomas; SCHRÖGER, Erich; ALTER, Kai. Pre-attentive perception of vowel phonemes from variable speech stimuli. *Psychophysiology*, v. 41, n. 4, p. 654–659, jul. 2004.

JACOBSEN, Thomas; SCHRÖGER, Erich; SUSSMAN, Elyse. Pre-attentive categorization of vowel formant structure in complex tones. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 20, n. 3, p. 473–479, ago. 2004.

JENKINS, Julian; IDSARDI, William J.; POEPEL, David. The Analysis of Simple and Complex Auditory Signals in Human Auditory Cortex: Magnetoencephalographic Evidence From M100 Modulation. *Ear and Hearing*, v. 31, n. 4, p. 515–526, ago. 2010.

JOANISSE, Marc F; ROBERTSON, Erin K; NEWMAN, Randy Lynn. Mismatch negativity reflects sensory and phonetic speech processing. *Neuroreport*, v. 18, n. 9, p. 901–905, jun. 2007.

JOHNSON, Keith. Speaker Normalization in Speech Perception. In: PISONI, DAVID B.; REMEZ, ROBERT E. (Org.). . *The Handbook of Speech Perception*. Malden: Blackwell Publishing Ltd, 2005. p. 363–389.

KAAS, Jon H.; HACKETT, Troy. A. Subdivisions of auditory cortex and processing streams in primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 97, n. 22, p. 11793–11799, out. 2000.

KAISER, Henry F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, v. 23, n. 3, p. 187–200, set. 1958.

KAYSER, Jürgen; TENKE, Craig E. Consensus on PCA for ERP data, and sensibility of unrestricted solutions. *Clinical Neurophysiology*, v. 117, n. 3, p. 703–707, mar. 2006.

KAYSER, Jürgen; TENKE, Craig E. Optimizing PCA methodology for ERP component identification and measurement: theoretical rationale and empirical evaluation. *Clinical Neurophysiology*, v. 114, n. 12, p. 2307–2325, dez. 2003.

KAZANINA, Nina; PHILLIPS, Colin; IDSARDI, William. The influence of meaning on the perception of speech sounds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 103, n. 30, p. 11381–11386, jul. 2006.

KING, Andrew J; NELKEN, Israel. Unraveling the principles of auditory cortical processing: can we learn from the visual system? *Nature Neuroscience*, v. 12, n. 6, p. 698–701, jun. 2009.

KIRMSE, Ursula *et al.* Modulation of the mismatch negativity (MMN) to vowel duration changes in native speakers of Finnish and German as a result of language experience. *International Journal of Psychophysiology*, v. 67, n. 2, p. 131–143, fev. 2008.

KLATT, Dennis H.; KLATT, Laura C. Analysis, synthesis, and perception of voice quality variations among female and male talkers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 87, n. 2, p. 820–857, 1990.

KUHL, Patricia K. Human adults and human infants show a “perceptual magnet effect” for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & Psychophysics*, v. 50, n. 2, p. 93–107, ago. 1991.

KUHL, Patricia K *et al.* Infants show a facilitation effect for native language phonetic perception between 6 and 12 months. *Developmental Science*, v. 9, n. 2, p. F13–F21, mar. 2006.

KUHL, Patricia K *et al.* Phonetic learning as a pathway to language: new data and native language magnet theory expanded (NLM-e). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, v. 363, n. 1493, p. 979–1000, mar. 2008.

LADEFOGED, Peter; MADDIESON, Ian. *The sounds of the world's languages*. Oxford: Blackwell Publishers, 1999.

LANGE, Kathrin. The N1 effect of temporal attention is independent of sound location and intensity: Implications for possible mechanisms of temporal attention. *Psychophysiology*, v. 49, n. 11, p. 1636–1648, nov. 2012.

LANGE, Kathrin. The reduced N1 to self-generated tones: An effect of temporal predictability? *Psychophysiology*, v. 48, n. 8, p. 1088–1095, 2011.

LANGE, Kathrin. The ups and downs of temporal orienting: a review of auditory temporal orienting studies and a model associating the heterogeneous findings on the auditory N1 with opposite effects of attention and prediction. *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 7, p. 1–14, 2013.

LANGNER, G *et al.* Frequency and periodicity are represented in orthogonal maps in the human auditory cortex: evidence from magnetoencephalography. *Journal of Comparative Physiology. A, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, v. 181, n. 6, p. 665–676, dez. 1997.

LANTING, Cornelis P. *et al.* Mechanisms of adaptation in human auditory cortex. *Journal of Neurophysiology*, v. 110, n. 4, p. 973–983, ago. 2013.

LAPPE, Claudia; STEINSTRÄTER, Olaf; PANTEV, Christo. A beamformer analysis of MEG data reveals frontal generators of the musically elicited mismatch negativity. *PLoS ONE*, v. 8, n. 4, e61296, abr. 2013.

LAUFER, Ilan *et al.* Sensory and cognitive mechanisms of change detection in the context of speech. *Brain Structure & Function*, v. 212, n. 5, p. 427–442, fev. 2008.

LAUFER, Ilan; NEGISHI, Michiro; CONSTABLE, R Todd. Comparator and non-comparator mechanisms of change detection in the context of speech – an ERP study. *NeuroImage*, v. 44, n. 2, p. 546–562, jan. 2009.

LEE, Charles C.; SHERMAN, S. Murray. On the classification of pathways in the auditory midbrain, thalamus, and cortex. *Hearing Research*, v. 276, n. 1-2, p. 79–87, jun. 2011.

LIBERMAN, Alvin M. *et al.* The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, v. 54, n. 5, p. 358–368, 1957.

LIÉGEOIS-CHAUVEL, C. *et al.* Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 92, n. 3, p. 204–214, maio 1994.

LIÉGEOIS-CHAUVEL, C.; MUSOLINO, A.; CHAUVEL, P. Localization of the Primary Auditory Area in Man. *Brain*, v. 114A, n. 1, p. 139–153, fev. 1991.

LINDEN, David E. J. The P300: Where in the Brain Is It Produced and What Does It Tell Us? *The Neuroscientist*, v. 11, n. 6, p. 563–576, dez. 2005.

LIPSKI, Silvia C; ESCUDERO, Paola; BENDERS, Titia. Language experience modulates weighting of acoustic cues for vowel perception: an event-related potential study. *Psychophysiology*, v. 49, n. 5, p. 638–650, maio 2012.

LIPSKI, Silvia C; MATHIAK, Klaus. A magnetoencephalographic study on auditory processing of native and nonnative fricative contrasts in Polish and German listeners. *Neuroscience Letters*, v. 415, n. 1, p. 90–95, 19 mar. 2007.

LIU, Ran; HOLT, Lori L. Neural changes associated with nonspeech auditory category learning parallel those of speech category acquisition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 23, n. 3, p. 683–698, mar. 2011.

LÜTKENHÖNER, Bernd; KRUMBHOLZ, K; SEITHER-PREISLER, A. Studies of tonotopy based on wave N100 of the auditory evoked field are problematic. *NeuroImage*, v. 19, n. 3, p. 935–949, jul. 2003.

LÜTKENHÖNER, Bernd; POEPEL, David. From Tones to Speech: Magnetoencephalographic Studies. In: WINER, JEFFERY A.; SCHREINER, CHRISTOPH E. (Org.). *The Auditory Cortex*. New York: Springer US, 2011. p. 597–615.

LÜTKENHÖNER, Bernd; STEINSTRÄTER, O. High-precision neuromagnetic study of the functional organization of the human auditory cortex. *Audiology & Neuro-Otology*, v. 3, n. 2-3, p. 191–213, jun. 1998.

LU, Z. -L; WILLIAMSON, S. J; KAUFMAN, L. Behavioral lifetime of human auditory sensory memory predicted by physiological measures. *Science*, dez. 1992.

MAISTE, Anita C *et al.* Event-related potentials and the categorical perception of speech sounds. *Ear and Hearing*, v. 16, n. 1, p. 68–90, fev. 1995.

MAKEIG, Scott *et al.* Blind separation of auditory event-related brain responses into independent components. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 94, n. 20, p. 10979–10984, set. 1997.

MÄKELÄ, Anna Mari; ALKU, Paavo; TIITINEN, Hannu. The auditory N1m reveals the left-hemispheric representation of vowel identity in humans. *Neuroscience Letters*, v. 353, n. 2, p. 111–114, dez. 2003.

MALMIERCA, Manuel S. The inferior colliculus: A center for convergence of ascending and descending auditory information. *Neuroembryology and Aging*, v. 3, n. 5, p. 215–229, 2004.

MARCO-PALLARÉS, J.; GRAU, C.; RUFFINI, G. Combined ICA-LORETA analysis of mismatch negativity. *NeuroImage*, v. 25, n. 2, p. 471–477, abr. 2005.

MASSARO, Dominic W. Categorical partition: A fuzzy-logical model of categorization behavior. *Categorical perception: The groundwork of cognition*. New York: Cambridge University Press, 1987. p. 254–283.

MAY, Patrick J C *et al.* Frequency change detection in human auditory cortex. *Journal of Computational Neuroscience*, v. 6, n. 2, p. 99–120, abr. 1999.

MAY, Patrick J C; TIITINEN, Hannu. Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained. *Psychophysiology*, v. 47, n. 1, p. 66–122, jan. 2010.

MAY, Patrick J C; TIITINEN, Hannu. The MMN is a derivative of the auditory N100 response. *Neurology & Clinical Neurophysiology*, v. 30, p. 2004–2020, nov. 2004.

MCEVOY, Linda; LEVÄNEN, Sari; LOVELESS, Norman. Temporal characteristics of auditory sensory memory: Neuromagnetic evidence. *Psychophysiology*, v. 34, n. 3, p. 308–316, 1997.

MCLACHLAN, Neil; WILSON, Sarah. The central role of recognition in auditory perception: A neurobiological model. *Psychological Review*, v. 117, n. 1, p. 175–196, 2010.

MILLER, Gregory A.; GRATTON, Gabriele; YEE, Cindy M. Generalized Implementation of an Eye Movement Correction Procedure. *Psychophysiology*, v. 25, n. 2, p. 241–243, mar. 1988.

MOEREL, Michelle; DE MARTINO, Federico; FORMISANO, Elia. An anatomical and functional topography of human auditory cortical areas. *Frontiers in Neuroscience*, v. 8, jul. 2014.

MOLFESE, Dennis L.; ERWIN, Roland J. Intrahemispheric differentiation of vowels: Principal component analysis of auditory evoked responses to computer-synthesized vowel sounds. *Brain and Language*, v. 13, n. 2, p. 333–344, jul. 1981.

MOLFESE, Dennis L; SCHMIDT, Albert. An auditory evoked potential study of consonant perception in different vowel environments. *Brain and Language*, v. 18, n. 1, p. 57–70, jan. 1983.

MØLLER, Aage R. *Hearing: anatomy, physiology, and disorders of the auditory system*. 2. ed. Burlington: Academic Press, 2006.

NÄÄTÄNEN, Risto *et al.* Frequency and location specificity of the human vertex N1 wave. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 69, n. 6, p. 523–531, jun. 1988.

NÄÄTÄNEN, Risto *et al.* Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, v. 385, n. 6615, p. 432–434, jan. 1997.

NÄÄTÄNEN, Risto *et al.* The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical Neurophysiology*, v. 118, n. 12, p. 2544–2590, dez. 2007.

NÄÄTÄNEN, Risto. The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the mismatch negativity (MMN) and its magnetic equivalent (MMNm). *Psychophysiology*, v. 38, n. 1, p. 1–21, jan. 2001.

NÄÄTÄNEN, Risto. The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences*, v. 13, n. 2, p. 201–288, jun. 1990.

NÄÄTÄNEN, Risto; JACOBSEN, Thomas; WINKLER, István. Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): a review of the evidence. *Psychophysiology*, v. 42, n. 1, p. 25–32, jan. 2005.

NÄÄTÄNEN, Risto; KUJALA, Teija; WINKLER, István. Auditory processing that leads to conscious perception: a unique window to central auditory processing opened by the mismatch negativity and related responses. *Psychophysiology*, v. 48, n. 1, p. 4–22, jan. 2011.

NÄÄTÄNEN, Risto; PICTON, Terence. The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, v. 24, n. 4, p. 375–425, jul. 1987.

NÄÄTÄNEN, Risto; WINKLER, István. The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin*, v. 125, n. 6, p. 826–859, nov. 1999.

NELKEN, Israel *et al.* Primary auditory cortex of cats: feature detection or something else? *Biological Cybernetics*, v. 89, n. 5, p. 397–406, nov. 2003.

NELKEN, Israel. Processing of complex sounds in the auditory system. *Current Opinion in Neurobiology*, v. 18, n. 4, p. 413–417, ago. 2008.

NENONEN, Sari *et al.* Linguistic relevance of duration within the native language determines the accuracy of speech-sound duration processing. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 16, n. 3, p. 492–495, maio 2003.

NENONEN, Sari *et al.* Speech-sound duration processing in a second language is specific to phonetic categories. *Brain and Language*, v. 92, n. 1, p. 26–32, jan. 2005.

NOURSKI, Kirill V. *et al.* Functional organization of human auditory cortex: Investigation of response latencies through direct recordings. *NeuroImage*, v. 101, p. 598–609, nov. 2014.

OBLESER, Jonas *et al.* Cortical representation of vowels reflects acoustic dissimilarity determined by formant frequencies. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 15, n. 3, p. 207–213, fev. 2003.

OBLESER, Jonas; ELBERT, Thomas; EULITZ, Carsten. Attentional influences on functional mapping of speech sounds in human auditory cortex. *BMC Neuroscience*, v. 5, n. 1, p. 1–9, jul. 2004.

OBLESER, Jonas; LAHIRI, Aditi; EULITZ, Carsten. Auditory-evoked magnetic field codes place of articulation in timing and topography around 100 milliseconds post syllable onset. *NeuroImage*, v. 20, n. 3, p. 1839–1847, nov. 2003.

OBLESER, Jonas; LAHIRI, Aditi; EULITZ, Carsten. Magnetic Brain Response Mirrors Extraction of Phonological Features from Spoken Vowels. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 16, n. 1, p. 31–39, jan. 2004.

OBLESER, Jonas; SCOTT, Sophie K.; EULITZ, Carsten. Now you hear it, now you don't: transient traces of consonants and their nonspeech analogues in the human brain. *Cerebral Cortex*, v. 16, n. 8, p. 1069–1076, ago. 2006.

OHL, Frank W.; SCHEICH, Henning. Orderly cortical representation of vowels based on formant interaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 94, n. 17, p. 9440–9444, ago. 1997.

OLDFIELD, R. C. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, v. 9, n. 1, p. 97–113, mar. 1971.

OPITZ, Bertram; SCHRÖGER, Erich; VON CRAMON, D. Yes. Sensory and cognitive mechanisms for preattentive change detection in auditory cortex. *The European Journal of Neuroscience*, v. 21, n. 2, p. 531–535, jan. 2005.

PANTEV, Christo *et al.* Lateral inhibition and habituation of the human auditory cortex. *European Journal of Neuroscience*, v. 19, n. 8, p. 2337–2344, abr. 2004.

PANTEV, Christo *et al.* Specific tonotopic organizations of different areas of the human auditory cortex revealed by simultaneous magnetic and electric recordings. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 94, n. 1, p. 26–40, jan. 1995.

PANTEV, Christo *et al.* Tonotopic organization of the auditory cortex: pitch versus frequency representation. *Science*, v. 246, n. 4929, p. 486–488, out. 1989.

PANTEV, Christo *et al.* Tonotopic organization of the human auditory cortex revealed by transient auditory evoked magnetic fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 69, n. 2, p. 160–170, fev. 1988.

PELTOLA, Maija S *et al.* Native and foreign vowel discrimination as indexed by the mismatch negativity (MMN) response. *Neuroscience Letters*, v. 352, n. 1, p. 25–28, nov. 2003.

PETERSON, Gordon E.; BARNEY, Harold L. Control Methods Used in a Study of the Vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 24, n. 2, p. 175–184, mar. 1952.

PHILLIPS, Colin *et al.* Auditory Cortex Accesses Phonological Categories: An MEG Mismatch Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 12, n. 6, p. 1038–1055, nov. 2000.

PHILLIPS, Colin. Levels of representation in the electrophysiology of speech perception. *Cognitive Science*, v. 25, n. 5, p. 711–731, set. 2001.

PICTON, Terence W. *et al.* Intracerebral sources of human auditory-evoked potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, v. 4, n. 2, p. 64–79, abr. 1999.

PICTON, Terence W.; LINS, Otavio G.; SCHERG, Michael. The recording and analysis of event-related potentials. In: JOHNSON JR., R.; BARON, J. C. (Org.). *Handbook of neuropsychology*. Handbook of neuropsychology. Amsterdam: Elsevier, 1995. v. 10. p. 3–73.

PISONI, David B. Auditory and phonetic memory codes in the discrimination of consonants and vowels. *Perception & Psychophysics*, v. 13, n. 2, p. 253–260, 1973.

PISONI, David B.; TASH, Jeffrey. Reaction times to comparisons within and across phonetic categories. *Perception & Psychophysics*, v. 15, n. 2, p. 285–290, 1974.

POLICH, John. Updating p300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, v. 118, n. 10, p. 2128–2148, 2007.

RAPHAEL, Lawrence J. Acoustic Cues to the Perception of Segmental Phonemes. In: PISONI, DAVID B.; REMEZ, ROBERT E. (Org.). . *The Handbook of Speech Perception*. Malden: Blackwell Publishing Ltd, 2005. p. 182–206.

RAUBER, Andréia Schurt. An acoustic description of Brazilian Portuguese oral vowels. *Diacrítica, Ciências da Linguagem*, v. 22, n. 1, p. 229–238, 2008.

RAUSCHECKER, Josef P. An expanded role for the dorsal auditory pathway in sensorimotor control and integration. *Hearing Research*, v. 271, n. 1-2, p. 16–25, jan. 2011.

RAUSCHECKER, Josef P; SCOTT, Sophie K. Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nature Neuroscience*, v. 12, n. 6, p. 718–724, jun. 2009.

RAUSCHECKER, Josef P.; TIAN, Biao. Mechanisms and streams for processing of “what” and “where” in auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 97, n. 22, p. 11800–11806, out. 2000.

REPP, Bruno H. Categorical perception: Issues, methods, findings. In: LASS, NORMAN J. (Org.). . *Speech and Language: Advances in Basic Research and Practice*. [S.l: s.n.], 1984. v. 10. p. 243–355.

RIF, Josi *et al.* Auditory attention affects two different areas in the human supratemporal cortex. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 79, n. 6, p. 464–472, dez. 1991.

RITTER, Walter; VAUGHAN JR., Herbert G.; COSTA, Louis D. Orienting and habituation to auditory stimuli: A study of short terms changes in average evoked responses. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 25, n. 6, p. 550–556, dez. 1968.

ROBERTS, Timothy P L *et al.* Latency of the auditory evoked neuromagnetic field components: stimulus dependence and insights toward perception. *Journal of Clinical Neurophysiology*, v. 17, n. 2, p. 114–129, mar. 2000.

ROBERTS, Timothy P L; FLAGG, Elissa J; GAGE, Nicole M. Vowel categorization induces departure of M100 latency from acoustic prediction. *Neuroreport*, v. 15, n. 10, p. 1679–1682, jul. 2004.

ROBERTS, Timothy P L; POEPEL, David. Latency of auditory evoked M100 as a function of tone frequency. *Neuroreport*, v. 7, n. 6, p. 1138–1140, abr. 1996.

ROMANI, G L; WILLIAMSON, S J; KAUFMAN, L. Tonotopic organization of the human auditory cortex. *Science*, v. 216, n. 4552, p. 1339–1340, jun. 1982.

ROSBURG, Timm. Effects of tone repetition on auditory evoked neuromagnetic fields. *Clinical Neurophysiology*, v. 115, n. 4, p. 898–905, abr. 2004.

ROSBURG, Timm *et al.* Habituation of auditory evoked potentials in intracranial and extracranial recordings. *Psychophysiology*, v. 43, n. 2, p. 137–144, mar. 2006.

ROSBURG, Timm *et al.* Subdural recordings of the mismatch negativity (MMN) in patients with focal epilepsy. *Brain*, v. 128, p. 819–828, abr. 2005.

ROSBURG, Timm *et al.* Short-term habituation of the intracranially recorded auditory evoked potentials P50 and N100. *Neuroscience Letters*, v. 372, n. 3, p. 245–249, dez. 2004.

ROSBURG, Timm; ZIMMERER, Karen; HUONKER, Ralph. Short-term habituation of auditory evoked potential and neuromagnetic field components in dependence of the interstimulus interval. *Experimental Brain Research*, v. 205, n. 4, p. 559–570, set. 2010.

ROTHER-NEVES, Rui. Notas sobre o método na Neurolinguística. In: MENDES, ELIANA AMARANTE DE MENDONÇA; OLIVEIRA, PAULO MOTTA; BENN-IBLER, VERONIKA (Org.). *O novo milênio: interfaces linguísticas e literárias*. Belo Horizonte, MG: Faculdade de Letras da UFMG, 2001. p. 189–195.

SABLE, Jeffrey J. *et al.* Latent inhibition mediates N1 attenuation to repeating sounds. *Psychophysiology*, v. 41, n. 4, p. 636–642, jul. 2004.

SAMS, Mikko *et al.* The human auditory sensory memory trace persists about 10 sec: Neuromagnetic evidence. *J. Cognitive Neuroscience*, v. 5, n. 3, p. 363–370, jul. 1993. Acesso em: 6 fev. 2013.

SANMIGUEL, Iria; TODD, Juanita; SCHRÖGER, Erich. Sensory suppression effects to self-initiated sounds reflect the attenuation of the unspecific N1 component of the auditory ERP. *Psychophysiology*, v. 50, n. 4, p. 334–343, abr. 2013.

SAVELA, Janne *et al.* The mismatch negativity and reaction time as indices of the perceptual distance between the corresponding vowels of two related languages. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 16, n. 2, p. 250–256, abr. 2003.

SCHARINGER, Mathias *et al.* Neuromagnetic evidence for a featural distinction of English consonants: sensor- and source-space data. *Brain and Language*, v. 116, n. 2, p. 71–82, fev. 2011.

SCHARINGER, Mathias; IDSARDI, William J; POE, Samantha. A comprehensive three-dimensional cortical map of vowel space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 23, n. 12, p. 3972–3982, dez. 2011.

SCHERG, M; VON CRAMON, D. Two bilateral sources of the late AEP as identified by a spatio-temporal dipole model. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 62, n. 1, p. 32–44, jan. 1985.

SCHOUTEN, Bert; GERRITS, Ellen; VAN HESSEN, Arjan. The end of categorical perception as we know it. *Speech Communication*, v. 41, n. 1, p. 71–80, ago. 2003.

SCHOUTEN, M E; VAN HESSEN, Arjan J. Modeling phoneme perception. I: Categorical perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92, n. 4, p. 1841–1855, out. 1992.

SCHRÖGER, Erich. Measurement and interpretation of the mismatch negativity. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, v. 30, n. 1, p. 131–145, 1998.

SHAFER, Valerie L; SCHWARTZ, Richard G; KURTZBERG, Diane. Language-specific memory traces of consonants in the brain. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 18, n. 3, p. 242–254, fev. 2004.

SHARMA, A *et al.* Acoustic versus phonetic representation of speech as reflected by the mismatch negativity event-related potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 88, n. 1, p. 64–71, fev. 1993.

SHARMA, A; DORMAN, M F. Cortical auditory evoked potential correlates of categorical perception of voice-onset time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 106, n. 2, p. 1078–1083, ago. 1999.

SHARMA, A; DORMAN, M F. Neurophysiologic correlates of cross-language phonetic perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 107, n. 5 Pt 1, p. 2697–2703, maio 2000.

SHESTAKOVA, Anna *et al.* Abstract phoneme representations in the left temporal cortex: magnetic mismatch negativity study. *Neuroreport*, v. 13, n. 14, p. 1813–1816, out. 2002.

SHESTAKOVA, Anna *et al.* Orderly cortical representation of vowel categories presented by multiple exemplars. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, v. 21, n. 3, p. 342–350, nov. 2004.

SILVA, Daniel Márcio Rodrigues; ROTHE-NEVES, Rui. An experimental study of the perception of the contrast between the back mid vowels of Brazilian Portuguese. *DELTA: Documentação de Estudos em Lingüística Teórica e Aplicada*, v. 25, n. 2, p. 319–345, jan. 2009.

SILVA, Daniel Márcio Rodrigues; ROTHE-NEVES, Rui. Respostas evocadas de incongruência a categorias na percepção da fala. *Letras de Hoje—Estudos e debates em linguística, literatura e língua portuguesa*, v. 49, n. 1, p. 66–75, mar. 2014.

SINAI, A. *et al.* Intracranial mapping of auditory perception: Event-related responses and electrocortical stimulation. *Clinical Neurophysiology*, v. 120, n. 1, p. 140–149, jan. 2009.

SNYDER, Elaine; HILLYARD, Steven A. Long-latency evoked potentials to irrelevant, deviant stimuli. *Behavioral Biology*, v. 16, n. 3, p. 319–331, mar. 1976.

SOLTANI, Maryam; KNIGHT, Robert T. Neural Origins of the P300. *Critical Reviews in Neurobiology*, v. 14, n. 3-4, p. 199–224, 2000.

SQUIRES, Nancy K; SQUIRES, Kenneth C; HILLYARD, Steven A. Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 38, n. 4, p. 387–401, abr. 1975.

STEINSCHNEIDER, Mitchell; LIÉGEOIS-CHAUVEL, Catherine; BRUGGE, John F. Auditory Evoked Potentials and Their Utility in the Assessment of Complex Sound Processing. In: WINER, JEFFERY A.; SCHREINER, CHRISTOPH E. (Org.). *The Auditory Cortex*. New York: Springer US, 2011. p. 535–559.

STEVENS, Kenneth N. *Acoustic phonetics*. Cambridge: MIT Press, 1998.

STUDDERT-KENNEDY, Michael *et al.* Motor theory of speech perception: A reply to Lane's critical review. *Psychological Review*, v. 77, n. 3, p. 234–249, 1970.

STUFFLEBEAM, Steven *et al.* Peri-threshold encoding of stimulus frequency and intensity in the M100 latency. *Neuroreport*, v. 9, n. 1, p. 91–94, 5 jan. 1998.

SWINK, Shannon; STUART, Andrew. Auditory Long Latency Responses to Tonal and Speech Stimuli. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, v. 55, n. 2, p. 447–459, abr. 2012.

SYRDAL, Ann K.; GOPAL, H. S. A perceptual model of vowel recognition based on the auditory representation of American English vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 79, n. 4, p. 1086–1100, abr. 1986.

TAMPAS, Joanna W; HARKRIDER, Ashley W; HEDRICK, Mark S. Neurophysiological indices of speech and nonspeech stimulus processing. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, v. 48, n. 5, p. 1147–1164, out. 2005.

TAVABI, Kambiz *et al.* Auditory evoked fields differentially encode speech features: an MEG investigation of the P50m and N100m time courses during syllable processing. *European Journal of Neuroscience*, v. 25, n. 10, p. 3155–3162, maio 2007

TELENCZUK, Bartosz; NIKULIN, Vadim V.; CURIO, Gabriel. Role of Neuronal Synchrony in the Generation of Evoked EEG/MEG Responses. *Journal of Neurophysiology*, v. 104, n. 6, p. 3557–3567, 1 dez. 2010.

TERVANIEMI, Mari *et al.* Selective tuning of cortical sound-feature processing by language experience. *The European Journal of Neuroscience*, v. 23, n. 9, p. 2538–2541, maio 2006.

TERVANIEMI, Mari; WINKLER, István; NÄÄTÄNEN, Risto. Pre-attentive categorization of sounds by timbre as revealed by event-related potentials. *Neuroreport*, v. 8, n. 11, p. 2571–2574, jul. 1997.

TIAN, Xing; POEPEL, David. The Effect of Imagination on Stimulation: The Functional Specificity of Efference Copies in Speech Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, v. 25, n. 7, p. 1020–1036, mar. 2013.

TIITINEN, Hannu *et al.* Disentangling the effects of phonation and articulation: Hemispheric asymmetries in the auditory N1m response of the human brain. *BMC Neuroscience*, v. 6, n. 1, p. 1–9, dez. 2005.

TIITINEN, Hannu *et al.* Electromagnetic recordings reveal latency differences in speech and tone processing in humans. *Cognitive Brain Research*, v. 8, n. 3, p. 355–363, out. 1999.

TRAUNMÜLLER, Hartmut. Analytical expressions for the tonotopic sensory scale. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 88, n. 1, p. 97–100, 1990.

TRISTÃO, Rosana Maria; FEITOSA, Maria Angela Guimarães. Speech perception in infants in their first year of life. *Estudos de Psicologia (Natal)*, v. 8, n. 3, p. 459–467, dez. 2003.

ULANOVSKY, Nachum *et al.* Multiple Time Scales of Adaptation in Auditory Cortex Neurons. *The Journal of Neuroscience*, v. 24, n. 46, p. 10440–10453, 2004.

ULANOVSKY, Nachum; LAS, Liora; NELKEN, Israel. Processing of low-probability sounds by cortical neurons. *Nature Neuroscience*, v. 6, n. 4, p. 391–398, 2003.

VAN HESSEN, Arjan J; SCHOUTEN, M E. Categorical perception as a function of stimulus quality. *Phonetica*, v. 56, n. 1-2, p. 56–72, jun. 1999.

VAN HESSEN, Arjan J; SCHOUTEN, M E. Modeling phoneme perception. II: A model of stop consonant discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 92, n. 4, p. 1856–1868, out. 1992.

VERKINDT, C. *et al.* Two auditory components in the 130-230 ms range disclosed by their stimulus frequency dependence. *Neuroreport*, v. 5, n. 10, p. 1189–1192, jun. 1994.

WEENINK, David. The KlattGrid speech synthesizer. In: INTERSPEECH 2009, 6 set. 2009, Brighton, UK. *Anais...* Brighton, UK: International Speech Communication Association, set. 2009. p. 2059–2062.

WEHR, Michael; ZADOR, Anthony M. Synaptic Mechanisms of Forward Suppression in Rat Auditory Cortex. *Neuron*, v. 47, n. 3, p. 437–445, ago. 2005.

WERKER, Janet F; TEES, Richard C. Speech perception as a window for understanding plasticity and commitment in language systems of the brain. *Developmental Psychobiology*, v. 46, n. 3, p. 233–251, abr. 2005.

WINKLER, István; KUJALA, Teija; *et al.* Brain responses reveal the learning of foreign language phonemes. *Psychophysiology*, v. 36, n. 5, p. 638–642, set. 1999.

WINKLER, István; LEHTOKOSKI, Anne; *et al.* Pre-attentive detection of vowel contrasts utilizes both phonetic and auditory memory representations. *Cognitive Brain Research*, v. 7, n. 3, p. 357–369, jan. 1999.

WOLDORFF, Marty G *et al.* Modulation of early sensory processing in human auditory cortex during auditory selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 90, n. 18, p. 8722–8726, set. 1993.

WOLPAW, Jonathan R.; PENRY, J. Kiffin. A temporal component of the auditory evoked response. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, v. 39, n. 6, p. 609–620, 1975.

WOLPAW, Jonathan R.; PENRY, J. Kiffin. Hemispheric differences in the auditory evoked response. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, v. 43, n. 1, p. 99–102, 1977.

WOODS, David L. The component structure of the N1 wave of the human auditory evoked potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. Supplement*, v. 44, p. 102–109, 1995.

WOODS, David L.; ALAIN, Claude. Functional imaging of human auditory cortex. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, v. 17, n. 5, p. 407–411, out. 2009.

WOODS, David L.; ALHO, Kimmo; ALGAZI, A. Brain potential signs of feature processing during auditory selective attention. *Neuroreport*, v. 2, n. 4, p. 189–192, abr. 1991.

WOODS, David L.; ELMASIAN, Robert. The habituation of event-related potentials to speech sounds and tones. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, v. 65, n. 6, p. 447–459, nov. 1986.

YAGCIOGLU, Suha; UNGAN, Pekcan. Refractoriness, habituation, and mismatch effects in the auditory event-related potential to alternating stimuli. *Neuroreport*, v. 19, n. 1, p. 49–53, jan. 2008.

YAMASHIRO, Koya *et al.* Change-related responses in the human auditory cortex: an MEG study. *Psychophysiology*, v. 48, n. 1, p. 23–30, jan. 2011.

YOUNG, Eric D. Neural representation of spectral and temporal information in speech. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1493, p. 923–945, mar. 2008.

YVERT, Blaise *et al.* Localization of human supratemporal auditory areas from intracerebral auditory evoked potentials using distributed source models. *NeuroImage*, v. 28, n. 1, p. 140–153, out. 2005.

ZEVIN, Jason D *et al.* Native language experience influences the topography of the mismatch negativity to speech. *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 4, p. 212, 2010.

ZHANG, Fawen *et al.* The adaptive pattern of the auditory N1 peak revealed by standardized low-resolution brain electromagnetic tomography. *Brain Research*, v. 1400, p. 42–52, jul. 2011.

ZHANG, Yang *et al.* Effects of language experience: neural commitment to language-specific auditory patterns. *NeuroImage*, v. 26, n. 3, p. 703–720, jul. 2005.

ZOURIDAKIS, George; SIMOS, Panagiotis G.; PAPANICOLAOU, Andrew C. Multiple Bilaterally Asymmetric Cortical Sources Account for the Auditory N1m Component. *Brain Topography*, v. 10, n. 3, p. 183–189, dez. 1998.