

Caroline Di Bernardi Luft

**APRENDENDO COM *FEEDBACK*:
UM ESTUDO SOBRE COMO O CÉREBRO UTILIZA
INFORMAÇÃO PARA APRENDER**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Psicologia da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Psicologia
Orientador: Prof. Dr. Emílio Takase

Florianópolis
2012

L949a Luft, Caroline Di Bernardi

Aprendendo com feedback [tese] : um estudo sobre como o cérebro utiliza informação para aprender / Caroline Di Bernardi Luft ; orientador, Emilio Takase. - Florianópolis, SC, 2012.

209 p.: grafs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Psicologia.

Inclui referências

1. Psicologia. 2. Aprendizagem. 3. Realimentação (Psicologia). 4. Capacidade motora. 5. Cognição. I. Takase, Emilio. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Psicologia. III. Título.

CDU 159.9

Caroline Di Bernardi Luft

***Aprendendo com feedback: um estudo sobre como o cérebro utiliza
informação para aprender***

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Psicologia, Programa de Pós-Graduação em Psicologia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de março de 2012.



Dra. Maria Aparecida Crepaldi
(Coordenadora - PPGP/UFSC)



Dr. Emilio Takase

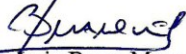
(PPGP - UFSC - Orientador)



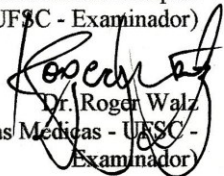
Dr. Joydeep Bhattacharya
(Goldsmiths, University of London – Psychology Department -
Examinador)



Dr. Adriano Bretanha Lopes Tort
(Instituto do Cerebro - UFRN - Examinador)



Dr. Jefferson Luiz Brum Marques
(Instituto de engenharia Biomédica - UFSC - Examinador)



Dr. Roger Walz
(Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas - UFSC -
Examinador)

Dedico este trabalho aos que se
aventurarem a lê-lo.

AGRADECIMENTOS

“A felicidade aparece para aqueles que reconhecem a importância das pessoas que passam em nossas vidas”

Clarice Lispector

Eu sempre acreditei que ninguém consegue fazer nada muito bom, sem ter boas pessoas com quem contar. Se eu consegui acabar essa tese foi apenas porque eu tive essas boas pessoas por perto em diferentes momentos da minha vida. Seria uma tarefa impossível reconhecer neste texto todas as pessoas as quais eu sou grata, por isso, agradeço nesta ocasião apenas àqueles que participaram diretamente dessa etapa chamada tese.

Demonstro aqui, a minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Emílio Takase, que foi uma pessoa fundamental na minha vida acadêmica. Desde o nosso primeiro contato, após a graduação, nós temos mantido a parceria e eu sou realmente grata por todo o apoio que recebi e pela confiança que ele sempre depositou em mim.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Joydeep Bhattacharya, que desde o início do meu período de doutorado sanduíche, em Londres, foi muito paciente, mesmo quando eu não tinha a mínima ideia do que eu estava fazendo. Eu não tenho palavras para expressar a minha gratidão por tudo o que tenho aprendido com ele e também por compartilhar seu escritório comigo sem reclamar da minha bagunça. Eu me sinto verdadeiramente privilegiada por ter tido a oportunidade de conviver com o Prof. Joydeep.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro durante o doutorado, especialmente pela bolsa PDEE que me permitiu realizar os experimentos desta tese (processo 1428-10-1). Agradeço também à *Goldsmiths College, University of London*, por ter me acolhido durante o período sanduíche.

Agradeço também aos membros da banca: Prof. Dr. Adriano Bretanha Lopes Tort, Prof. Dr. Jefferson Luiz Brum Marques, Prof. Dr. Roger Walz, Prof. Dr. Mauro Luís Vieira e ao Prof. Dr. Rogério Ferreira Guerra, pela gentileza de ter aceitado o convite e avaliar esta tese. Ainda, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Guido Nolte pela sua grande e gentil ajuda nas análises de conectividade.

Durante a minha estada na Goldsmiths, eu encontrei pessoas maravilhosas às quais eu não poderia deixar de agradecer: Dra. Jose van Velzen, Dra. Rhiannon Jones, Dra. Elisa Carrus, Robert Davis, Dra. Victoria Williamsom, Dan Braddy, Christos Ioannou e Segilola

Jolaosho. Um agradecimento especial ao Dr. Job Lindsen por ter sido não somente um Pós-doc sempre disponível para me ajudar, mas também por ter sido um dos melhores amigos que eu já encontrei. Sou muito grata pelas nossas conversas com muito café ou cerveja (às vezes), pelas nossas discussões acadêmicas, pelas ajudas com análise de EEG em Matlab e tudo mais.

Fora da Universidade, eu gostaria de expressar a minha gratidão aos meus amigos que fizeram da minha estada em Londres uma experiência muito prazerosa: Renate Nicolaisen, Sunniva Molvaer, Shirin Shabestari, Aryan Bhattacharya e Arvin Bhattacharya.

No Brasil, eu também tenho muitas pessoas a agradecer. Na Universidade Federal de Santa Catarina, gostaria de expressar minha gratidão à Helena Del Fiaco, uma pessoa muito especial que sempre foi extremamente prestativa e paciente com todos os estudantes do PPGP, incluindo à mim. Aos professores do PPGP com quem eu tive um contato mais próximo durante o curso: Prof. Dra. Maria Aparecida Crepaldi, Prof. Dra. Kátia Maheirie, Prof. Dr. Roberto Moraes Cruz e Prof. Dr. Mauro Luis Vieira.

Aos meus queridos amigos da SinaPsi: July Silveira Gomes, Daniel Priori e Luciano Bertol Teixeira. Aos meus super entusiasmados amigos Mariana Lopez e Pedro Paulo G. Sbissa, Marta Elisa Bringhenti e Thais Helena Lippel que foram sempre grandes apoiadores mesmo quando eu estava completamente fora de contato.

Aos meus amigos antigos, Prof. Dr. Fernando Luis Cardoso, que sempre me motivou para a vida acadêmica e Luciana Lacerda Burigo Trindade, que é uma amiga que tenho para a vida toda; eu amei quando ela e o seu marido, me amigo Rodrigo Bordin Trindade, foram para Londres me visitar; eles participaram do meu experimento durante a sua lua de mel e eu sei que apenas amigos de verdade fariam isso. À Luma Jochims por ter sido extremamente paciente comigo nesses últimos anos, e especialmente nos últimos meses quando eu estava muito estressada e exausta. Muito obrigada por ter gastado seu tempo me ajudando com tudo, incluindo o tratamento de algumas figuras da tese.

Mas nada disso seria possível sem a ajuda da minha família. Gostaria de agradecer à minha irmã, Cristiane Di Bernardi Luft, por todo o amor e apoio, mas especialmente pela alegria de trazer o Henrique para as nossas vidas. Um agradecimento especial também ao meu cunhado Rossano Rodrigues de Lima, por ter entrado na nossa família tornando-a maior e mais alegre. À minha mãe, Sandra Di Bernardi Luft, que é a pessoa que mais me ama no mundo e que eu sempre poderei contar. Obrigada pela paciência nos últimos meses e por

ser tão tolerante com a minha bagunça de papéis espalhados pela sala. Arrumarei o mais cedo possível! Ao meu pai, Claudio Edegar Luft, que não está mais aqui, mas deixou o seu legado: meus dentes tortos, e minha alegria infinita pela vida!

*Sempre faço o que não consigo fazer para aprender
o que não sei.*

Pablo Picasso

RESUMO

Para aprender, é necessário extrair e integrar informações de diferentes fontes. A informação que resulta das próprias ações do ser humano é chamada de *feedback*, que pode ser definido como o resultado da ação que são capturadas pelos sentidos. Na presente tese, o objetivo foi analisar como diferentes características do *feedback* são processadas no cérebro, incluindo a resolução do *feedback* (contínuo vs. categórico), a magnitude do *feedback* (erros grandes vs. pequenos), a categoria do *feedback* (correto vs. incorreto) e o *timing* do *feedback* (imediate vs. atrasado). Para investigar como o cérebro processa tais atributos, utilizou-se o eletroencefalograma (EEG). Quatro estudos foram conduzidos para responder a quatro questões centrais: 1) Quais as diferenças no processamento de *feedback* indicando erros pequenos e grandes? 2) Como os correlatos neurais do *feedback* categórico indicando acerto e erro estão associados à aprendizagem? Quais as diferenças nos substratos neurais da aprendizagem utilizando *feedback* graduado e categórico? Quais as diferenças nos correlatos neurais do processamento de *feedback* imediato vs. atrasado e como que os mesmos interagem com os níveis de ativação? Os correlatos neurais foram analisados utilizando diferentes técnicas, incluindo: potenciais relacionados ao evento (ERPs), representações de tempo-frequência (TFRs), conectividade (sincronização entre áreas) e origens de oscilações neurais utilizando abordagem *beamformer*. Nem todas as técnicas foram utilizadas em todos os estudos, mas aplicadas de acordo com os objetivos secundários de cada pesquisa. Em todos os experimentos, a aprendizagem foi investigada utilizando uma tarefa de produção temporal, que é aprendida implicitamente. Foi verificado que o processamento de erros pequenos provoca maior ativação das áreas motoras do que erros grandes, e também que essa ativação está relacionada com o quanto bem os participantes consolidam o seu desempenho. Observou-se o aumento de oscilações na frequência teta nas áreas médias frontais em resposta ao *feedback* categórico incorreto sendo esta maior nos indivíduos com melhor aprendizagem. Verificou-se, também, que o processamento de *feedback* categórico é mediado por substratos neurais relacionados ao sistema de recompensa, especialmente a porção dorsal direita do córtex cingulado anterior. Os padrões de conectividade encontrados indicam que após o *feedback*, aumentou o fluxo de informação das áreas motoras às áreas médias frontais e que posteriormente as áreas médias se conectam às áreas pré-frontais, provavelmente refletindo a atualização das expectativas com

base no *feedback*. O nível de ativação ou *arousal* parece aumentar as diferenças em um componente específico do ERP, sugerindo que as respostas cerebrais ao *feedback* atrasado foram maiores quando a ativação estava alta. Em conjunto, os resultados indicam que embora os sinais associados com o processamento de informação categórica ou de recompensas seja um correlato relevante para como o cérebro sinaliza a presença de erros, a ativação das áreas motoras contralaterais bem como a comunicação dessas com as áreas médias frontais são mais cruciais para a consolidação da habilidade motora aprendida.

Palavras-chave: Aprendizagem. *Feedback*. Habilidade motora. Processos cognitivos.

ABSTRACT

Learning involves gathering and integrating information from different sources. The information about the result of our own actions is called feedback, which is understood as the outcome of the action. In the present thesis, we aimed to analyse how different features of the feedback are processed in the brain, including the quality of the feedback (graded vs. categorical), the magnitude of the feedback (large vs. small errors), the category of the feedback (correct vs. incorrect) and the timing of the feedback (immediate vs. delayed). To get insight on how these distinct features are processed, we employed a neuroimaging technique called electroencephalogram (EEG). Four studies were conducted to address four main questions: 1) What are the differences in the processing of small and large error feedback? 2) How the neural correlates of incorrect and correct categorical feedback relates to learning? 3) What are the differences in the neural substrates for learning from graded and categorical feedback? 4) What are the differences in the neural correlates of delayed and immediate feedback processing and how it interacts with arousal? We analysed the various neural correlates of feedback processing with the following: event-related potentials (ERPs), time-frequency representations (TFRs), connectivity (inter-site phase synchronization) and oscillatory sources using the beamformer approach. Not all these techniques were used in all studies, but we used them for different secondary objectives of each experiment. Learning was investigated with a time production task, which can be learned implicitly. We found that categorical feedback is associated to the activations of a system related to reward processing; the small error feedback seems to elicit larger brain activations over the motor areas than large error feedback, which is correlated with how well the participants consolidated the skill; incorrect feedback was associated with larger theta power activations over the mid-frontal areas and this response was larger for high-learners; arousal seems to increase the differences in the a specific feedback processing ERP component, suggesting that responses to delayed feedback were larger when arousal was higher. In addition, we found specific results in the connectivity between mid-frontal and left central areas. Finally, the source of the difference between categorical and graded feedback was found to be in the right anterior cingulate cortex, which is an area associated with reward-based learning (larger activity for categorical feedback). The findings are discussed in the basis of how we learn differently from error and reward information. Altogether, the results suggest that even though

the signals associated with the processing of categorical information or rewards are relevant for signaling that an error has been made, the activation of contralateral motor areas and the respective communication between them and mid-frontal areas are more fundamental to the skill consolidation.

Keywords: Learning. Feedback Reinforcement. Motor skills. Cognitive processing.

LISTA DE FIGURAS

Figuras do Estudo 1

Figura 1; Desempenho na tarefa de produção temporal.....	81
Figura 2. Cluster dos ERPs erros grandes vs. pequenos	83
Figura 3. Correlações entre ERPs e desempenho.	85
Figura 4. <i>Clusters</i> das oscilações: erros grandes vs. pequenos	87
Figura 5. Curso temporal dos <i>clusters</i>	89
Figura 6. LI após o <i>feedback</i> e correlações com o desempenho.	91
Figura 7. Resultados na frequência gama	93
Figura 8. Resultados da conectividade na frequência beta.....	95

Figuras do Estudo 2

Figura 1. Desempenho na tarefa.....	119
Figura 2. Resultados dos ERPs.....	121
Figura 3. Resultados das TFRs.....	123
Figura 4. Correlações das oscilações com o desempenho.....	126
Figura 5. Conectividade PSI nos bons aprendizes 1.....	128
Figura 6. Conectividade PSI nos bons aprendizes 2.....	129
Figura 7. Conectividade PSI nos maus aprendizes 1.....	130
Figura 8. Conectividade PSI nos maus aprendizes 2.....	131
Figura 9. Conexões direcionadas (PSI): de e para FCz.....	133

Figuras do Estudo 3

Figura 1. Desempenho na tarefa.....	159
Figura 2. ERPs em resposta ao <i>feedback</i> graduado vs. categórico.....	161
Figura 3. TFRs em resposta ao <i>feedback</i> graduado vs. categórico.....	163
Figura 4. Origens cerebrais de teta após <i>feedback</i> graduado e categórico.....	166

Figuras do Estudo 4

Figura 1. Visão esquemática do paradigma experimental.....	179
Figura 2. Desempenho na tarefa e respostas eletrodérmicas ao <i>feedback</i>	184
Figura 3. Diferenças nos ERPs: <i>feedback</i> imediato vs. atrasado.....	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEG – Eletroencefalograma

fMRI – Ressonância magnética funcional

MEG – Magnetoencefalograma

PET – Tomografia por emissão de positrons

TMS – Estimulação magnética transcraniana

tDCS – Estimulação transcraniana por corrente direta

ERP – *Event related potential* - potencial relacionado ao evento

TFR – *Time-frequency representation* - representação de tempo-frequência

FRN – *Feedback related negativity* - negatividade relacionada ao *feedback*

ERN – *Error related negativity* – negatividade relacionada ao erro

SPN – *Stimulus preceding negativity* – negatividade precedente ao estímulo

ACC – *Anterior cingulate cortex* – córtex cingulado anterior

dACC – Dorsal anterior cingulate cortex – porção dorsal do ACC

WPLI - *Weighted Phase Lag Index* – índice ponderado do atraso de fase

RPE – Erro de predição de recompensa

VS – Versus

EP – Erro padrão

DP – Desvio-padrão

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	25
2 APRENDENDO COM FEEDBACK: UMA BREVE REVISÃO DE LITERATURA.....	31
2.1 <i>FEEDBACK</i> E APRENDIZAGEM.....	32
2.2 TAREFAS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE FEEDBACK.....	37
2.3 A DOPAMINA E A APRENDIZAGEM POR REFORÇO.....	49
2.4 ERROS, ERROS DE PREDIÇÃO E O FRN.....	51
2.4.1 Magnitude do <i>feedback</i> e o FRN.....	52
2.4.2 Expectativa do <i>feedback</i> e o FRN.....	54
2.4.3 A aprendizagem e o FRN.....	57
2.5 CORRELATOS OSCILATÓRIOS DO PROCESSAMENTO DE <i>FEEDBACK</i>	59
3 ESTUDO 1: MUITO PERTO OU MUITO LONGE? DIFERENÇAS ENTRE <i>FEEDBACK</i> COM ERROS PEQUENOS E GRANDES E INTERAÇÕES COM A APRENDIZAGEM.....	65
1 INTRODUÇÃO.....	66
3.2 MÉTODO.....	69
3.2.1 Participantes.....	69
3.2.2 Tarefa experimental.....	70
3.2.3 Registro e análise do EEG.....	73
3.2.4 Análise Estatística.....	76
3.3 RESULTADOS.....	79
3.3.2 Análise dos ERPs.....	82
3.3.3 Análise de tempo-frequência.....	86
3.4 Análise de Conectividade.....	94
3.4 DISCUSSÃO.....	97
3.4.1 <i>Feedback</i> de erro grande vs. pequeno: diferenças nos ERPs, TFRs e conectividade.....	97

3.4.2 Bons vs. Maus aprendizes: diferenças nos ERPs, oscilações e conectividade.....	101
3.4.3 Correlações com o desempenho com e sem <i>feedback</i>.....	103
3.5 CONCLUSÃO.....	105
4 ESTUDO 2: CORRETO OU INCORRETO? DINÂMICA OSCILATÓRIA E DE CONECTIVIDADE UTILIZANDO <i>FEEDBACK</i> CATEGÓRICO.....	107
4.1 INTRODUÇÃO.....	108
4.2 MÉTODO.....	112
4.2.1 Participantes.....	112
4.2.2 Tarefa experimental.....	112
4.2.3 Registro de EEG e análise.....	113
4.2.3 Análise estatística.....	117
4.3 RESULTADOS.....	117
4.3.1 Desempenho na tarefa.....	118
4.3.2 Resultados dos ERPs.....	120
4.3.3 Decomposições de tempo-frequência.....	122
4.4 DISCUSSÃO.....	136
4.4.1 Diferenças nos ERPs e desempenho de bons e maus aprendizes.....	136
4.4.2 Sincronização de teta e dessincronização de beta em resposta ao <i>feedback</i>	138
4.4.2 Conectividade de teta para o processamento de <i>feedback</i>	141
4.5 CONCLUSÃO.....	143
5 ESTUDO 3 – DIFERENÇAS NEUROFISIOLÓGICAS ENTRE O PROCESSAMENTO DE <i>FEEDBACK</i> GRADUADO E CATEGÓRICO PARA A APRENDIZAGEM.....	145
5.1 INTRODUÇÃO.....	146
5.2 MÉTODO.....	151
5.2.1 Participantes.....	151
5.2.2 Tarefa Experimental.....	151
5.2.3 Registro de EEG e análises.....	153

5.2.4	Análise estatística.....	156
5.3	RESULTADOS.....	158
5.3.1	Desempenho na tarefa.....	158
5.3.2	Potenciais Relacionados ao Evento.....	160
5.3.3	Decomposições de Tempo-frequência.....	161
5.3.4	Localização da origem cerebral das oscilações em teta.....	164
5.4	DISCUSSÃO.....	167
5.5	CONCLUSÃO.....	171
6	ESTUDO 4: É O MESMO INTERVALO? PROCESSAMENTO DE <i>FEEDBACK</i> ATRASADO VS. IMEDIATO E SUAS INTERAÇÕES COM A ATIVAÇÃO.....	173
6.1	INTRODUÇÃO.....	174
6.2	MÉTODO.....	177
6.2.1	Participantes.....	177
6.2.3	Atividade eletrodérmica (EDA).....	179
6.2.4	Registro de EEG.....	180
6.2.5	Análise Estatística.....	180
6.3	RESULTADOS.....	182
6.3.1	Resultados comportamentais.....	182
6.3.2	Resultados da Atividade Eletrodérmica.....	182
6.3.3	Resultados dos ERPs.....	185
6.4	DISCUSSÃO.....	187
6.5	CONCLUSÃO.....	189
7	DISCUSSÃO GERAL E COMENTÁRIOS FINAIS.....	191
7.1	O FRN E A ENERGIA RELATIVA DE TETA SÃO SENSÍVEIS A ASPECTOS DISTINTOS DO <i>FEEDBACK</i>	191
7.2	DESSINCRONIZAÇÃO DE BETA NAS ÁREAS MOTORAS CONTRALATERAIS.....	193
7.3	CONECTIVIDADE ENTRE ÁREAS CEREBRAIS DISTINTAS NAS FREQUÊNCIAS BETA E TETA ESTÃO RELACIONADAS À APRENDIZAGEM COM DIFERENTES TIPOS DE <i>FEEDBACK</i>	195

7.4 APRENDER COM <i>FEEDBACK</i> ATRASADO INTERAGE COM O NÍVEL DE ATIVAÇÃO.....	196
7.5 COMENTÁRIO FINAL.....	197
REFERÊNCIAS.....	199

1 INTRODUÇÃO

Não há dúvida de que a aprendizagem tem um papel fundamental na vida do ser humano. Desde coisas simples, como aprender a utilizar um controle remoto, até conceitos complexos, como álgebra linear, não somente se adquire e acumula conhecimento como também este conhecimento é superado a cada dia, o que permite ao indivíduo inovar, melhorar e aprimorar mesmo as coisas que já consegue fazer relativamente bem. Para que isto aconteça, é necessário monitorar constantemente os resultados das ações, buscando corrigir erros e reforçar acertos para constantemente aprimorar o desempenho. Nesta tese, o tema central é como o cérebro processa a informação, o *feedback*, para aprender.

O *feedback* pode ser definido como o resultado de uma ação ou escolha que é capturado pelos sentidos do agente que realizou a ação. Por exemplo, se uma bola for chutada ao gol, pode-se ver o quão bom foi o chute logo após a execução e saber imediatamente se foi possível ou não pontuar. Utilizando essa informação, o *feedback*, são construídos mapas de representação interna entre as ações e os resultados que servirão como guia para a próxima ação. Na vida real, diferentes fontes de *feedback* são combinadas para atingir determinados objetivos. No exemplo anterior, diferentes modalidades de *feedback* estão presentes: *feedback* sensorial, representado pela diferença entre a trajetória esperada da bola e a obtida; e a informação de recompensa que refere-se à avaliação sobre se foi obtido ou não sucesso com o chute, ou seja, se foi ou não foi gol. Estas duas categorias de *feedback* trabalham juntas para a aprendizagem, mas o papel de cada uma ainda é pouco compreendido (Wolpert, Diedrichsen, & Flanagan, 2011).

A aprendizagem com *feedback* de erro ou *feedback* sensorial tem sido amplamente investigada na área de aprendizagem motora (Izawa & Shadmehr, 2011; Wolpert, et al., 2011; Wolpert & Flanagan, 2010), mas pouco pesquisada na área de neuroimagem ou de neurociência cognitiva. Por outro lado, estudos sobre aprendizagem guiada por *feedback* na neurociência cognitiva têm focado principalmente na aprendizagem baseada em recompensas (Cohen, 2008), com base no modelo computacional de aprendizagem por reforço ou, como foi originalmente chamado em inglês, *reinforcement learning* (Sutton & Barto, 1998). Este foco, em aprendizagem por reforço, foi estimulado pela publicação de um estudo importante (Holroyd & Coles, 2002) conectando o sistema mesoencefálico dopaminérgico à

negatividade relacionada ao erro (ERN)¹ e ao erro de predição de recompensa (RPE). No referido estudo, os autores sugerem que toda a vez há uma diferença entre a recompensa esperada e a obtida, ou seja, quando existe um RPE, o sistema dopaminérgico mesoencefálico apresenta uma redução fásica de dopamina que é projetada ao córtex cingulado anterior (ACC) resultando, então, no ERN. Conceituado como uma deflexão negativa no ERP que inicia aproximadamente 50 ms após a ocorrência de um erro (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993), o ERN tem uma topografia média-frontal, sendo que estudos com localização de origem cerebral (*source localization*) indicam que a porção dorsal do ACC é o gerador mais provável desta negatividade (Luu, Tucker, Derryberry, Reed, & Poulsen, 2003; Miltner et al., 2003).

O pico do ERN é após a resposta, portanto, esse componente não reflete o uso de informação externa como é o *feedback*. No entanto, em 1997, um estudo (Miltner, Braun, & Coles, 1997) encontrou um componente de ERP funcionalmente similar ao ERN, mas que ocorria após a apresentação de *feedback* de erro, ou seja, após uma informação externa que indicava que a tentativa havia sido incorreta, numa tarefa de produção temporal. Esse componente, posteriormente nomeado como a negatividade relacionada ao *feedback* – *the feedback related negativity* (FRN) – é uma deflexão negativa no ERP que inicia aproximadamente 145 ms após a apresentação de *feedback* indicando um erro com uma topografia média-frontal, como o ERN (Miltner, et al., 1997). Estudos com localização de origem indicam que a porção dorsal do ACC é o mais provável gerador desse componente (Balconi & Scioli, 2011; Christie & Tata, 2009; Miltner, et al., 1997). O FRN ocorre toda vez em que um RPE é detectado (Chase, Swainson, Durham, Benham, & Cools, 2011; Holroyd & Coles, 2002; Holroyd & Krigolson, 2007; Holroyd, Krigolson, Baker, Lee, & Gibson, 2009), RPE este que pode ser de diferentes magnitudes (Bellebaum & Daum, 2008; Donamayor, Marco-Pallares, Heldmann, Schoenfeld, & Munte, 2011). No entanto, um estudo sugeriu que o FRN reflete um erro de predição, e não necessariamente um erro de predição de recompensa, uma vez que o mesmo foi também observado após a apresentação de *feedback* positivo, porém, inesperado (Oliveira, McDonald, & Goodman, 2007). Pesquisas que investigaram se o FRN está ou não associado ao subsequente ajuste

¹ Para compreender o que são componentes de potenciais relacionados ao evento (ERPs), sugere-se uma revisão sobre o tema nos livros introdutórios (Handy, 2005; Luck, 2005).

de *performance* apresentaram resultados controversos, pois alguns verificaram que o FRN está associado com tal correção ou bom aprendizado (Cohen & Ranganath, 2007; van der Helden, Boksem, & Blom, 2010) enquanto outros não encontraram tal associação (Chase, et al., 2011; van de Vijver, Ridderinkhof, & Cohen, 2011).

Devido ao FRN ser um ERP, ele perde parte das informações sobre as respostas cerebrais ou é insensível a eventos neurais que não estejam em fase e ocorram exatamente no mesmo momento após a apresentação do *feedback*². Dessa forma, estudos recentes estão focando nos correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* (Cavanagh, Figueroa, Cohen, & Frank, 2011; Cavanagh, Frank, Klein, & Allen, 2010; Cavanagh, Zambrano-Vazquez, & Allen, 2012; Christie & Tata, 2009; Cohen, Elger, & Ranganath, 2007; Marco-Pallares et al., 2008; Marco-Pallares et al., 2009; van de Vijver, et al., 2011), especialmente nas oscilações na frequência teta (4-8 Hz) relacionadas com a atividade do sistema de monitoração de desempenho (Cohen, Wilmes, & Vijver, 2011). Observou-se que as oscilações em teta são sensíveis a vários aspectos do processamento de *feedback*, tais como novidade, punição, incerteza e erro (Cavanagh, et al., 2012). Por outro lado, as oscilações na frequência beta (13-30 Hz) aumentam mais em resposta ao *feedback* positivo (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares et al., 2008; van de Vijver, et al., 2011). Além disso, pesquisas recentes (Cavanagh, et al., 2010; Cohen, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011) investigaram como as diferentes áreas cerebrais se comunicam após *feedback* correto e incorreto, demonstrando que a conectividade entre certas regiões em conjunto com as decomposições de tempo-frequência tem o potencial de promover novos *insights* sobre como são processadas as diferentes características do *feedback* e sobre como o mesmo é utilizado para aprender.

Todos os estudos mencionados previamente investigaram a aprendizagem com uma perspectiva baseada em aprendizagem por reforço ao invés daquela baseada em erro com *feedback* sensorial de alta

² Isto ocorre porque um ERP é, em princípio, uma média do sinal de várias tentativas. Por se tratar de uma média, feita para cada ponto no tempo, eventos que não ocorrem simultaneamente tendem a se anularem na média. Por exemplo, se no ponto de tempo 1 a amplitude é 10uV, na tentativa 1, mas 2uV na tentativa 2, a média será de 6uV naquele ponto de tempo. Assim, se os eventos ocorrerem em tempos levelmente diferentes, a média distorcerá a amplitude do ERP, que não apresentará pico definido. Para uma descrição detalhada desse problema, ler Herrmann (2005).

qualidade. Questões sobre se o FRN e as oscilações em teta refletem um RPE ou se são sensíveis à magnitude da recompensa são recorrentes em tais estudos. No entanto, no campo da aprendizagem baseada em erro, poucas investigações foram dedicadas à análise da atividade cerebral para o processamento de informação de erro. Na presente tese são primeiramente investigadas as diferenças no processamento de *feedback* informando erros grandes e pequenos na forma de uma quantidade exata, graduada. Essa forma de *feedback* se aproxima do *feedback* sensorial que é utilizado em estudos de aprendizagem motora. No segundo estudo foram comparados os correlatos neurais do processamento de *feedback* categórico (correto vs. incorreto) a fim de replicar pesquisas prévias e expandir a parte de análise de conectividade. No terceiro estudo, foram comparados os correlatos neurais para o processamento de *feedback* graduado (alta resolução), com *feedback* categórico. No quarto estudo foi analisada outra característica: o atraso no *feedback*, bem como as suas interações com o nível de ativação.

Nesta tese são lançadas quatro questões principais: 1) Quais são as diferenças nos correlatos neurais do processamento de *feedback* indicando erros pequenos e erros grandes e como estes estão relacionados com a aprendizagem? 2) Como os correlatos do processamento de *feedback* categórico de acerto e erro estão relacionados à aprendizagem? 3) Quais as diferenças nos substratos neurais para processamento de *feedback* graduado (de erro) e categórico? 4) Quais são as diferenças nos correlatos neurais do processamento de *feedback* imediato e atrasado e como essas diferenças interagem com os níveis de ativação (alta vs. baixa)? Cada uma destas questões foi formulada no contexto de cada estudo com um conjunto de outras questões ou objetivos de investigação auxiliares. Considerando que a aprendizagem é um aspecto importante desta tese, o desempenho foi analisado em todos os estudos com ênfase especial em como os participantes consolidaram a habilidade.

Um aspecto chave presente na tese é a diferença entre os dois processos de aprendizagem investigados: 1) a aprendizagem baseada em erro; 2) a aprendizagem baseada em recompensa ou aprendizagem por reforço. Tais processos estão descritos no capítulo 2, bem como são discutidos em maior profundidade no estudo 3 (capítulo 5). Todos os estudos desta tese utilizaram uma tarefa conhecida como **tarefa de produção temporal**, com modificações específicas para cada estudo. É importante ressaltar que o processo de aprendizagem envolvido nesse tipo de paradigma é implícito, ou seja, não é verbalizável e necessita a melhora incremental por meio da prática repetida da mesma. Nesta

tarefa, o participante é instruído a apertar um botão assim que ele achar que um determinado intervalo de tempo, 1,7 segundos nessa tese, passou. Após cada resposta, o participante recebe *feedback* sobre o seu desempenho e a nova tentativa inicia (com uma cruz de fixação localizada no centro da tela). A diferença entre a tarefa do estudo 1 em relação ao estudo 2 é apenas o *feedback*: no estudo 1 o *feedback* é numérico ou graduado e indica a exata diferença, em milissegundos, entre a estimativa do participante e o alvo (1700 ms), enquanto que no estudo 2, o *feedback* é categórico, indicando apenas se o intervalo estimado está “correto”, “muito curto” ou “muito longo”. No estudo 4 o tempo do *feedback* foi manipulado: em dois blocos de 75 tentativas cada, o *feedback* foi apresentado um segundo após a resposta (imediate), enquanto que em outros dois blocos, o *feedback* foi apresentado 3.5 segundos após a resposta (atrasado). Além disso, cada bloco foi precedido por uma indução de humor visando aumentar ou diminuir os níveis de ativação. Em todos esses estudos, os participantes realizaram a tarefa com monitoramento dos sinais eletroencefalográficos (EEG), de forma sincronizada com a tarefa experimental.

Nesta tese, três experimentos com EEG foram conduzidos: 1) Produção temporal com *feedback* numérico ou de erro exato (estudo 1); 2) Produção temporal com *feedback* categórico (estudo 2); 3) Produção temporal com *feedback* imediato e atrasado precedido por estimulação de alta e baixa ativação. O estudo 3 foi uma comparação entre os resultados dos experimentos 1 e 2. Todos esses experimentos foram conduzidos no laboratório de EEG da Goldsmiths, University of London. Dessa forma, as tarefas foram todas realizadas no idioma inglês, falado por todos os participantes.

Cada capítulo da tese pode ser lido independentemente, como um artigo. Esta opção foi escolhida para evitar que o leitor busque no texto definições, termos e conceitos explicados previamente. No entanto, essa abordagem tem como problema inerente a inevitável repetição de termos e abreviações, presentes no texto. Optou-se também por manter as siglas originais em inglês. Essa decisão foi tomada pelo fato de que os termos utilizados nesta tese são consolidados internacionalmente na ciência com tais siglas. Dessa forma, os termos principais são todos descritos com as suas siglas originais de forma que os respectivos nomes em inglês constam na lista de abreviaturas, visando facilitar a busca de artigos na área por leitores interessados.³

³ Essa tese foi originalmente redigida em inglês e posteriormente traduzida para o português. A versão avaliada pelos examinadores também foi em inglês, uma

vez que um dos membros da banca não dominava o português. A tradução para o português foi feita pela própria autora da tese e por isso, não é uma tradução literal. Alguns parágrafos foram reestruturados para manter o significado e deixar o texto mais fluído. A versão original em inglês pode ser disponibilizada mediante contato por e-mail com a autora (caroluf21@yahoo.com.br).

2 APRENDENDO COM FEEDBACK: UMA BREVE REVISÃO DE LITERATURA

O papel do *feedback* na aprendizagem tem sido extensivamente investigado desde os primeiros estudos com condicionamento clássico e operante em animais. O processamento de *feedback* em humanos tem também sido o objetivo de um vasto número de estudos utilizando uma variedade de técnicas de neuroimagem. Uma busca na PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) utilizando os termos “EEG AND *feedback* AND *learning*” resultou em 571 artigos encontrados (Janeiro de 2012). Dessa forma, uma revisão de literatura abrangente sobre o tópico seria um objetivo inviável em um único capítulo de tese. O principal objetivo deste capítulo é apresentar uma visão geral do estado da arte na área de processamento de *feedback* e como ele está relacionado com a aprendizagem.

A primeira sessão deste capítulo é dedicada à descrição da relação entre aprendizagem e processamento de *feedback*. O foco principal é introduzir dois processos: 1) a aprendizagem por reforço, que é amplamente citada nas publicações de neuroimagem desde que foi proposta como o mecanismo envolvido na geração do FRN (Holroyd & Coles, 2002); 2) a aprendizagem baseada em erro, que é proposta como um dos principais mecanismos para aprendizagem sensoriomotora (Wolpert, et al., 2011). Adicionalmente, são introduzidos os conceitos de ERN e FRN e relacionados aos processos de aprendizagem descritos previamente e também à ideia de um sistema de monitoramento de desempenho.

Na segunda sessão desse capítulo os paradigmas (tarefas experimentais) utilizados nos estudos de processamento de *feedback* são analisados. Não foram incluídos estudos com ERN, uma vez que o foco principal desta sessão é discutir como o processamento de *feedback* (e não do erro em si) é investigado nesses estudos. A terceira sessão desse capítulo é dedicada aos correlatos neurais do processamento de *feedback*, incluindo resultados de pesquisas que analisaram ERPs, oscilações e conectividade.

2.1 FEEDBACK E APRENDIZAGEM

Na vida real o indivíduo nem sempre conhece as consequências das suas ações; algumas dessas consequências não são totalmente previsíveis e, por isso, precisam ser aprendidas. Aprender torna o ser humano melhor em realizar tais predições. Fazendo, interagindo com o ambiente, se adquire conhecimento das associações entre ações e consequências, bem como se aprende a agir para atingir determinados objetivos ou recompensas com base nesse conhecimento (Sutton & Barto, 1998).

Os resultados das nossas ações servem como professores, sendo comumente classificados como *feedback*, conceituado como a informação sobre a consequência da nossa ação que nos é enviada de volta. *Feedback* pode ser também apresentado no formato de recompensa. Por exemplo, em um experimento, toda vez que um indivíduo escolhe “A” depois de um “C”, ganha um centavo, mas não se ele escolher o mesmo “A” depois de um “B”. Nesse caso, a recompensa (um centavo) sinaliza o resultado imediato da sua ação e pode ser considerado como *feedback*. Recompensas são informação suficiente para aprender associações de estímulo-recompensa ou ação-recompensa, mas podem ser menos efetivas para outros tipos de aprendizagem, como a aprendizagem motora (Wolpert, et al., 2011).

Na aprendizagem motora, o *feedback* sensorial é necessário: informação acurada extraída pelos sentidos do indivíduo é usada para progressivamente reduzir o erro de um dado movimento. O processo de aprender por meio da informação de erro é chamado aprendizagem baseada em erro (*error-based learning*), enquanto que o processo que utiliza recompensas ou então informação categórica, tal como o sucesso ou insucesso de uma tentativa, é frequentemente referido como aprendizagem baseada em recompensa (*reward-based learning*) (Wolpert, et al., 2011). Embora sejam processos diferentes, ambos podem acontecer ao mesmo tempo em diversas situações de aprendizagem, especialmente motora. Por exemplo, imagine que você está aprendendo o *topspin* no tênis. Após bater na bola, você pode ver se obteve ou não sucesso. Em uma situação de pesquisa no modelo de aprendizagem baseada em recompensa, a única informação disponível como *feedback* seria se a tentativa teve ou não sucesso (caiu ou não dentro da quadra do oponente). Por outro lado, em uma situação de aprendizagem baseada em erro, a informação exata seria obtida pela visão: o indivíduo pode ver exatamente onde a bola caiu, se foi à direita, na frente ou na parte de trás da quadra e estimar a quantidade de erro do

seu golpe, comparando o resultado da ação com o que foi planejado ou predito. Essa estimativa de erro fornece a ele a direção do ajuste a ser feito na próxima tentativa, que é utilizado pelo sistema para calcular o gradiente de erro e atualizar as próprias predições.

De acordo com Wolpert, Diedrichsen, & Flanagan (2011), a natureza da informação utilizada para aprender, independente da modalidade sensorial, é o que caracteriza o processo de aprendizagem. Na aprendizagem baseada em erros, o resultado do movimento realizado é comparado com o predito ou desejado, de forma que estimando o gradiente de erro, o sistema sabe não somente que não atingiu o objetivo, mas também a maneira ou o quanto o mesmo se desviou do pretendido. Desta forma, esse tipo de aprendizagem requer *feedback* com alta resolução que informe não apenas que um erro foi cometido, mas também, a maneira específica que o mesmo ocorreu, ou seja, o *feedback* contém a informação completa indicando a quantidade de erro presente na tentativa. Por meio da prática, os seres humanos conseguem desenvolver mapas sensoriomotores que os permitem identificar a causa mais provável de um erro para progressivamente o reduzir.

Devido a menor quantidade de informação presente no *feedback*, a aprendizagem exclusivamente por reforço é mais lenta do que aquela baseada em erros (Wolpert, et al., 2011). Um estudo recente (Izawa & Shadmehr, 2011) demonstrou que é possível aprender uma tarefa motora utilizando sinais de reforço na forma de informação categórica incompleta, como por exemplo, correto e incorreto, mas que os processos de aprendizagem são de naturezas distintas. Aprender com base em *feedback* categórico ou de reforço⁴ foi mais lento do que utilizando o *feedback* visual com a informação precisa do erro. Ao utilizar essa informação mais precisa, os sujeitos aprenderam e atualizaram as predições em relação às consequências dos seus comandos motores, generalizando estes para os comandos motores vizinhos. Este processo de generalização não foi observado quando somente o *feedback* categórico foi utilizado.

⁴ Nesta tese, o termo aprendizagem por reforço é utilizado para designar o processo de aprender, utilizando informações categóricas, como nos modelos computacionais do *reinforcement learning* no qual a aprendizagem ocorre por meio de informação incompleta indicando apenas se o objetivo foi ou não atingido. Dessa forma, quando o termo *feedback* de reforço é utilizado, ele não significa que o *feedback* é reforçador, mas sim, que ele contém informação categórica incompleta que permite ao sujeito identificar se atingiu ou não o objetivo de uma determinada tentativa.

Entretanto, em situações nas quais um objetivo é atingido por meio de uma sequência de vários passos, a aprendizagem por reforço pode ser mais adequada. Em situações onde a recompensa de longo prazo tem de ser maximizada à custa da minimização do ganho inicial, como em algumas decisões econômicas, a aprendizagem por reforço é mais adequada do que a baseada em erro.

A teoria da aprendizagem por reforço advém do campo da aprendizagem de máquina⁵ (Sutton & Barto, 1998). A diferença entre as abordagens anteriores e a de aprendizagem por reforço é que o agente (máquina) não é instruído ou programado em relação às ações específicas a tomar, mas aprende pelo método de tentativa e erro. O princípio é que o agente “quer” alguma coisa, e essa coisa é a recompensa. Nesse modelo, o agente aprende fazendo: ele aprende quais ações tomar a fim de maximizar a sua recompensa. As duas principais características da aprendizagem por reforço são: 1) o sistema aprende fazendo; e 2) o sistema é capaz de aprender por meio de recompensas atrasadas, ou com uma determinada sequência de ações.

Um problema crucial para resolver na aprendizagem por reforço é a atribuição de crédito (*credit assignment*), que consiste em como atribuir crédito ou culpa às ações que levaram à recompensa ou punição posteriores. Aprender essas associações aumenta a capacidade do agente de atingir um determinado objetivo: ser capaz de prever acuradamente as consequências de uma ação melhora a capacidade de fazer planos e ações para obtenção de um objetivo. Existem quatro sub-elementos principais de um sistema de aprendizagem por reforço: 1) uma **diretriz** (*policy*): uma maneira de se comportar em um dado momento, que corresponde às associações estímulo-recompensa; 2) uma **função de recompensa** (*reward-function*): indica a desejabilidade intrínseca de um certo estado, ou seja, determina o que são eventos bons e ruins. Constitui a base para mudar uma diretriz; 3) uma **função de valor** (*value function*): especifica a desejabilidade de um certo estado de longo prazo, o que significa o quanto de recompensa que o agente espera acumular ao longo de um determinado tempo. Enquanto a função de recompensa determina o que é imediatamente bom ou ruim, a função de

⁵ Subcampo da inteligência artificial dedicado ao estudo e desenvolvimento de algoritmos que permitem aos computadores aprender ou aperfeiçoar seu desempenho em diferentes tarefas.

valor determina a deseabilidade das recompensas de longo prazo⁶; 4) um **modelo do ambiente**: um conjunto de previsões estado-ação que imita o comportamento do ambiente. Modelos podem ser utilizados para planejar, pois eles permitem prever situações futuras mesmo antes delas serem experienciadas. Esta última característica permite ao sistema fazer novas previsões, planejar com antecedência, a fim de evitar cometer novos erros ao invés de aprender com eles. É uma evolução das ideias de aprendizagem por reforço, considerando que planejar é o oposto de uma abordagem baseada puramente em tentativa e erro.

Mesmo que o modelo de aprendizagem por reforço tenha sido originado e avançado na área de aprendizagem de máquina, os seus princípios contribuíram para a compreensão da aprendizagem humana no campo de neurociência cognitiva. Em 2002, foi publicado um estudo influente (Holroyd & Coles, 2002) explorando a relação entre aprendizagem por reforço, o sistema dopaminérgico mesoencefálico e um componente de ERP chamado negatividade relacionada ao erro (ERN). Nesse estudo, os autores sugeriram a existência de um sistema de processamento de erro, que se ativa em resposta a um erro de previsão de recompensa (RPE) definido como a diferença entre o resultado esperado e obtido de uma determinada ação. É sugerido que toda a vez em que um RPE é detectado, o sistema dopaminérgico mesoencefálico envia sinais (fásica redução na liberação de dopamina) ao Córtex Cingulado Anterior (ACC), gerando um ERN, que pode ser lido no escalpo por meio do EEG.

O ERN é uma deflexão negativa nos ERPs com uma topografia média-frontal que inicia aproximadamente 50 ms após uma resposta errada, usualmente em tarefas de tempo de reação (Falkenstein, et al., 1991; Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990; Gehring, et al., 1993). O ERN também é chamado de negatividade do erro (Ne) (Falkenstein, et al., 1991). Estudos de localização de origem indicaram que o ACC é a fonte mais provável do ERN (Holroyd, Dien, & Coles, 1998; Luu, et al., 2003; Miltner, et al., 2003). Presume-se que esse componente de ERP reflete a disparidade entre o resultado esperado e o obtido de uma ação em relação a um determinado objetivo. Foi verificado que o ERN é sensível ao objetivo da tarefa: ele aumentou quando a acurácia foi enfatizada nas instruções e reduziu quando a

⁶ Algumas vezes, é preciso sacrificar a função de recompensa devido à função de valor. Por exemplo, se o objetivo de longo prazo é perder peso (função de valor), a ingestão de doces (função de recompensa) terá que ser reduzida.

velocidade foi ressaltada como o principal objetivo (Gehring, et al., 1993).

O ERN é acoplado com a resposta: ele inicia após a resposta errada ser executada. Dessa forma, a comparação entre o resultado esperado e obtido é principalmente sensorial, interna: o ERN inicia antes do *feedback* externo ser apresentado. No entanto, existem situações onde o *feedback* externo é necessário para o monitoramento da *performance* e aprendizado. Por exemplo, se você está aprendendo a jogar dardos, você apenas saberá se cometeu um erro após ver onde o acertou. Nesse tipo de situação, na qual erros são apenas identificáveis por meio de *feedback* externo, outra deflexão negativa no ERP com similar topografia média-frontal foi observada: a negatividade relacionada ao *feedback* (FRN) (Miltner, et al., 1997). O FRN é uma deflexão negativa no ERP que inicia aproximadamente 145 ms após *feedback* indicando erro, com o seu pico entre 230-330 ms⁷. É fechado com o *feedback* e também é considerado como um indicador da atividade no ACC ou do sistema cognitivo para monitoramento da *performance* (Balconi & Scioli, 2011; Holroyd & Coles, 2002; Luu, et al., 2003; Miltner, et al., 1997). Alguns autores referem-se ao FRN como *feedback*-ERN devido às suas similaridades na topografia e no pressuposto gerador, o ACC (Hajcak, Holroyd, Moser, & Simons, 2005).

O FRN é normalmente investigado utilizando paradigmas nos quais as consequências das ações não são facilmente previsíveis ou devem ser aprendidas por tentativa e erro. A grande maioria dos estudos

⁷ Para entender melhor o conceito de um componente de ERP, observe a figura 2 do estudo 2 na página 121, que apresenta os resultados do FRN e P300 (dois componentes de ERP) em dois grupos distintos. Observe que a deflexão negativa na primeira figura aparece nas linhas vermelhas e verdes, mas não na azul. Essa deflexão é o FRN, somente presente quando o *feedback* apresentado indica um erro (naquele caso, “muito curto” e “muito longo”). Devido à linha azul da figura ser a média dos ERPs para as tentativas corretas, essa deflexão não ocorre. Na segunda parte da figura, a distribuição topográfica ou a topografia desses componentes pode ser observada. A topografia é a imagem em duas dimensões da atividade lida em todos os canais do EEG, serve para ver os locais de maior ou menor ativação. Na figura, pode-se observar a topografia típica de um FRN na parte “c”, para os dois grupos. A topografia mostra claramente que a diferença entre incorreto (as duas categorias) e correto, na janela de tempo indicado na figura, é mais negativa na zona média-frontal (mais azul nos topomapas – figuras em forma de cabeça 2D).

sobre os correlatos neurofisiológicos do processamento de *feedback*, focaram no FRN, limitando a pesquisa às atividades evocadas ou, então, ao que ocorre **em fase** (ERPs), sem olhar para a atividade induzida ou para os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* (Cohen, et al., 2011). Alguns estudos recentes analisando os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* permitiram *insights* significativos na compreensão do sistema de monitoramento de *performance* (Cavanagh, Cohen, & Allen, 2009; Cavanagh, et al., 2011; Cavanagh, et al., 2010; Cavanagh, et al., 2012; Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2007; Cohen, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011). A sincronização local e entre áreas têm sido consideradas importantes na compreensão de como as áreas médias frontais comunicam e implementam correções comportamentais com base no *feedback* (Cohen, et al., 2011). Dessa forma, os estudos publicados sobre os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* são também revisados neste capítulo.

2.2 TAREFAS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DO PROCESSAMENTO DE FEEDBACK

O estudo de como o *feedback* é processado depende em grande parte de como os experimentos são desenhados. Diferentes tarefas experimentais, aqui também denominadas como paradigmas, são empregadas para responder à perguntas específicas. Para investigar como o *feedback* é processado no cérebro, é importante que a o mesmo contenha uma informação não disponível anteriormente. Por exemplo, em estudos com o ERN (acoplado à resposta), o erro é detectado antes da apresentação do *feedback*, enquanto que o FRN acontece depois do *feedback*, quando o mesmo é inesperado. Dessa forma, tarefas ou manipulações experimentais diferentes são necessárias para estudar esses dois distintos componentes de ERP. Nesta sessão, são explorados os paradigmas utilizados em tarefas preocupadas com a investigação dos processos cognitivos associados ao processamento do *feedback*, e não da resposta em si.

Considerando a vasta literatura no tópico, principalmente sobre o FRN, não foi possível revisar todos os artigos, mas foi feito um esforço para incluir os artigos mais relevantes para a presente tese. A busca mencionada no início do capítulo foi refinada utilizando as palavras: *feedback AND EEG AND learning NOT biofeedback*. Essa pesquisa resultou em 352 resultados (Janeiro, 2012). No entanto, estudos importantes não foram encontrados nessa pesquisa, incluindo o primeiro

artigo descrevendo o FRN (Miltner, et al., 1997). Outras combinações foram buscadas, mas os resultados foram insatisfatórios. Dessa forma, foram incluídos artigos que já haviam sido revisados no projeto e outras publicações novas mais relevantes, a fim de triangular os principais artigos e autores com as referências citadas.

No primeiro experimento descrevendo o FRN (Miltner, et al., 1997), uma tarefa de produção temporal foi utilizada. Nesse paradigma, os participantes têm que pressionar um botão exatamente um segundo após um aviso sonoro. A tentativa é considerada correta se a mesma cair dentro de uma janela de tempo pré-definida de acordo com cada estudo. Por exemplo, no estudo de Miltner, Braun, & Coles (1997), a tentativa era considerada correta se caísse na janela de tempo entre 900 e 1100 ms, sendo esta janela alterada após cada resposta, ficando mais fácil após um erro (aumentando 10 ms) e mais difícil após um acerto (diminuindo 10 ms). Esse paradigma foi introduzido anteriormente (Damen & Brunia, 1987) para estudar a *negatividade precedente ao estímulo* (*stimulus preceding negativity – SPN*), que é um componente negativo lento presente antes da apresentação do *feedback*. Foi sugerido que esse componente reflete a atividade neural do sistema de monitoramento de *performance* destinada a receber ou direcionar a atenção ao *feedback* a ser recebido. Esse paradigma utilizava estimativas ou produções de tempo mais longas (20 segundos), tendo sido modificado ao longo dos anos. A tarefa de produção temporal tem sido utilizada em muitos estudos *designados* para investigar o FRN, com algumas modificações eventuais (Gruendler, Ullsperger, & Huster, 2011; Hirsh & Inzlicht, 2008; Holroyd & Krigolson, 2007; van de Vijver, et al., 2011).

O fator chave para estudar o processamento do *feedback* é que o mesmo tem que prover informação útil que não está disponível em outras fontes. Em tarefas como a de tempo de reação simples ou de escolha e tarefas *GO/NOGO*, o *feedback* não é muito informativo, pois é possível detectar erros sem informação externa, o que diminui o valor da mesma para a aprendizagem. Por outro lado, em tarefas como de produção temporal, é difícil identificar erros antes do *feedback*, o que faz dele uma informação importante que não está disponível em outras fontes. Se o FRN reflete a detecção de um erro de predição (Holroyd, et al., 2009), ele precisa ser provocado por *feedback* contendo informação que não estava prevista.

O *feedback* é, dessa forma, mais relevante para a aprendizagem quando as associações entre ações e resultados não estão dadas. À medida que a aprendizagem avança e as associações se tornam

conhecidas, o FRN reduz, enquanto que o ERN aumenta (Bellebaum & Daum, 2008). Por exemplo, quando você está aprendendo a chutar pênaltis, você só saberá se cometeu um erro ao ver onde a bola chutada foi e se entrou ou não no gol. No entanto, após aprender, você saberá que cometeu um erro logo após o chute, antes de ver para onde a bola foi.

Dessa forma, os paradigmas utilizados para investigar o processamento de *feedback* devem considerar os diferentes aspectos que influenciam a maneira como o mesmo é utilizado para a aprendizagem. Além da tarefa de produção temporal, outros paradigmas têm sido utilizados para investigar o processamento de *feedback*. Paradigmas onde punições e recompensas são recebidas após cada decisão, como tarefas de aposta (*gambling tasks*) também são adequados para provocar o FRN, que pode ser observado após o *feedback* negativo, nesse caso, após a punição.

Considerando que a descrição detalhada das tarefas de cada estudo está fora do alcance dessa revisão, os paradigmas foram classificados de acordo com algumas características importantes que estão associadas à aprendizagem:

- 1) **Tarefa:** esta é uma primeira classificação geral do paradigma, como foi nomeado no artigo;
- 2) **Processo de aprendizagem:** nesta categoria, o paradigma foi classificado de acordo com o principal objeto de aprendizagem. Por exemplo, produção temporal pode ser aprendida por meio de processos implícitos, o que significa que a aprendizagem é procedural; não se pode aprender essa tarefa somente descobrindo um conjunto de regras. Para esta classificação, foram utilizados os conceitos de aprendizagem de categorias (Ashby, Alfonso-Reese, Turken, & Waldron, 1998) que divide o processo de aprendizagem em procedural/implícito e explícito, verbal ou baseado em regras. Essa classificação considera o objetivo de cada tarefa de aprendizagem, que pode ou não ser verbalizável. Mesmo que tenha sido proposto inicialmente para aprendizagem de categorias, a mesma classificação pode ser utilizada para processos de aprendizagem em geral: tarefas motoras são implícitas, apenas aprendidas por meio da prática, enquanto que tarefas baseadas em processos explícitos como teste de hipóteses são aprendidas descobrindo um conjunto de regras que otimizam as recompensas. Um exemplo desse tipo de paradigma é a tarefa de tomada de

decisão probabilística na qual os participantes precisam descobrir quais opções estão associadas com as maiores recompensas, de forma que podem existir opções com altas recompensas, mas com menor probabilidade e outras com recompensas menores, mas com maior probabilidade (menor probabilidade de perdas ou punições). Dessa forma, as possíveis categorias de classificação são: 1) Implícita/procedural; 2) Explícita/teste de hipóteses; 3) Sem aprendizagem: tarefa na qual aprender não é possível ou não faz sentido, como algumas tarefas de aposta onde o *feedback* é aleatório ou não contingente à resposta;

- 3) **Feedback:** esta classificação descreve o quanto informativo o *feedback* foi para o desempenho. Alguns estudos utilizaram *feedback* aleatório, o que significa que a informação oferecida não era contingente à ação. Quando *feedback* não-informativo foi oferecido, a informação sobre se os participantes estavam ou não cientes de que as suas decisões não estavam relacionadas ao *feedback* foi adicionada;
- 4) **Tipo de feedback:** essa categoria descreve o grau de informação comunicado pelo *feedback*. Pode ser tanto: 1) Categórico – sem sinal; 2) Categórico – com sinal; 3) Gradativo/detalhado. Na primeira categoria, apenas “correto” ou “incorreto” é dado como *feedback*, sem a informação da direção do erro. Na segunda categoria, o *feedback* é categórico mas existe informação adicional sobre a direção do erro. Por exemplo, em uma tarefa de produção temporal, *feedback* categórico sem sinal é apenas “correto” ou “incorreto”, enquanto que na categoria com sinal ele seria “muito curto” ou “muito longo” ou “correto”. Na terceira categoria, o *feedback* é gradativo, em diferentes níveis: baixa, média e alta recompensa, por exemplo. No entanto, como diferentes variações estão presentes, a descrição do *feedback* foi adicionada na tabela.
- 5) **Foco do estudo:** nesse campo da tabela, o principal objeto da investigação foi resumido, a fim de que o leitor perceba como diferentes objetivos levam a distintas manipulações do *feedback*.

Tabela 1. Tarefas experimentais utilizadas em estudos sobre o processamento de *feedback*.

Estudo	Tarefa	Processo de Aprendizagem	Feedback	Tipo de Feedback	Foco do estudo
Miltner et al. (1997)	Tarefa de produção temporal	Implícito/Procedural	Informativo	Catagórico – sem sinal: Correto/Incorreto visual, auditivo e táctil	Comparar os ERPs após <i>feedback</i> de erro e acerto em diferentes modalidades sensoriais
Chase et al. (2011)	Aprendizagem probabilística inversa	Explícito /Teste de hipóteses	Informativo	Catagórico – sem sinal Ganho/Perda	Sensibilidade do FRN à erros de predição e ajustes comportamentais
Hajcak et al. (2005)	Tarefa de adivinhação	Sem aprendizagem	Não-informativo	Catagórico – sem sinal Correto/Incorreto Probabilidade de recompensa: 25%, 50% e 75%	O FRN em resposta a recompensas esperadas e não esperadas.

Cohen and Ranganath (2007)	<i>Matching pennies</i> : jogo competitivo	Sem aprendizagem	Não-informativo	Catagórico – sem sinal Ganho/Perda	FRN em relação ao ajuste de comportamento na próxima tentativa
Donamayor et al. (2011) Goyer et al. (2011)	Tarefa de aposta	Sem aprendizagem	Não informativo	Gradativo – Ganho/Perda (5 25)	Efeitos da magnitude e da valência nos ERPs e TFRs.
Wu & Zhou (2009)	Tarefa de aposta	Sem aprendizagem	Não-informativo	Gradativo – Ganho/Perda (5 25) Esperado vs. não esperado	Efeitos da valência, magnitude e expectativa no FRN e P300.
Bellebaum, Polezzi & Daum (2010)	Tarefa de aposta	Explícito	Informativo	Gradativo – Ganho/Perda (5 20 50)	Efeitos da expectativa da magnitude da recompensa no FRN e P300.

Holroyd et al. (2003)	Tarefa de adivinhação	Sem aprendizagem	Não-informativo	Catagórico – sem sinal Ganho/perda (5c.)	Efeitos da probabilidade da recompensa no FRN.
Holroyd et al. (2009)	Tarefa de adivinhação	Exp. 1: Sem aprendizagem; Exp. 2: Sem aprendizagem; Exp. 3. Explícito	Exp. 1: NI; Exp. 2: NI; Exp. 3: Informativo	Catagórico – sem sinal Correto/Incorreto Probabilidade de recompensa : 5%, 50% e 95%	Efeitos da probabilidade da recompensa no FRN.
Bellebaum & Daum (2008)	Tarefa de adivinhação	Explícito	Informativo	Catagórico – sem sinal Ganhou ou não	Efeitos da aprendizagem no FRN e P300.
van der Helden, Boksem & Blom (2010)	Tarefa de tomada de decisão: Sequência de botões	Explícito	Informativo	Catagórico – sem sinal Correto/Incorreto	Investigar se o FRN é preditivo da aprendizagem por reforço

	Tarefa	Implícito	Informativo	Catagórico – com sinal	Relação funcional entre o ERN e o FRN.
Heldmann, Russeler, & Munte (2008)	Tarefa de Eriksen Flanker	Implícito	Informativo	“Correto e em tempo” “Correto mas atrasado” “Falso”	
Sailer & Ulsperger (2010)	Tarefa de tomada de decisão: Sequência de botões	Explícito	Informativo	Gradativo correto/errado Ganhos +/- 5 25	Efeitos da aprendizagem no FRN e P300.
Gruendler et al. (2011)	Tarefa de produção temporal táctil	Implícito	Informativo	Catagórico – sem sinal 'Em tempo' 'Atrasado'	Preferências de processamento hemisférico para distintos ERPs: FRN, ERN e N2.
van der Vijver et al. (2011)	Tarefa de produção temporal	Implícito	Informativo	Catagórico – com sinal 'Correto' – 'Muito curto' – 'Muito longo'	Correlatos oscilatórios e de conectividade do processamento de feedback

Christie & Tata (2009)	<i>Adapted Iowa Gambling task</i> : tarefa de aposta Iowa	Implícito	Informativo	Gradativo Ganho/perda - pequeno (50) ou grande(100)	Localização da origem de teta e do FRN após a perda.
Papo et al. (2007)	Tarefa de teste de hipóteses	Explícito	Informativo	Catégorico – sem sinal Correto/Incorreto	Oscilações em gama após feedback positivo e negativo.
Cavanagh, et al. (2012)	Tarefa de aprendizagem probabilística	Explícito	Informativo	Catégorico – sem sinal Correto/Incorreto	O papel dos ERPs e oscilações teta nos processos associados com novidade, conflito, punição e erros.
Cavanagh, et al. (2010)					
Santesso (2008)	Tarefa de aprendizagem com recompensa	Explícito	Informativo	Catégorico – sem sinal Correto + recompensa monetária	O papel do ACC na aprendizagem usando EEG e fMRI (separados).

Pfabigan et al. (2011)	Tarefa probabilística de aposta	Explícito	Informativo	Catagórico – sem sinal Correto/Incorreto	Efeitos da valência e expectativa no FRN e P300.
------------------------	---------------------------------	-----------	-------------	---	--

Em geral, tarefas de aposta, também chamadas de jogos de azar, requerem que o participante aposte, fazendo uma aposta em cada tentativa. Nos estudos da tabela 1, paradigmas de aposta variaram de acordo com as quantidades possíveis de recompensas e prejuízos, número de opções, entre outras características. Por exemplo, em um estudo (Christie & Tata, 2009) os participantes tinham que apostar tanto grandes quanto baixas quantidades de dinheiro. Em alguns blocos, a probabilidade da recompensa era mais alta do que em outros. Assim, os participantes tinham que aprender como identificar tais blocos, a fim de maximizar as recompensas, adotando uma estratégia de otimização (grandes apostas nos blocos com alta probabilidade de ganhar e baixas quando tal probabilidade é baixa).

As tarefas de adivinhação são muito similares às tarefas de aposta, pois os participantes precisam escolher entre duas opções, mas ao invés de apostarem uma determinada quantidade de dinheiro, eles apenas escolhem uma opção que pode ou não conter uma recompensa. Dessa forma, a diferença principal é que em uma tarefa de aposta, cada escolha é seguida por um ganho (*feedback* positivo) ou uma perda (*feedback* negativo), enquanto que na tarefa de adivinhação, o *feedback* pode ser uma recompensa (adivinhação correta) ou a omissão da mesma (adivinhação incorreta). No entanto, existem algumas exceções incluindo paradigmas que penalizam os participantes pela adivinhação incorreta. A principal característica da tarefa de adivinhação é que o participante precisa adivinhar onde está a recompensa escondida.

No campo de aprendizagem por reforço, esses dois tipos de paradigmas têm sido utilizados para investigar diferenças relacionadas a várias características da recompensa ou punição: magnitude, probabilidade, entre outras. A vantagem desse tipo de paradigma é a facilidade em controlar a probabilidade de certos tipos de *feedback* ou recompensas, uma vez que estes não são necessariamente contingentes às respostas dos participantes. Mesmo que alguns aspectos da aprendizagem possam ser investigados usando esse tipo de paradigma, a frequente ausência de um padrão correto de resposta prejudica a utilização desse tipo de tarefa para investigar aprendizagem, pois não há uma medida comportamental clara da mesma. No entanto, um estudo (Bellebaum & Daum, 2008) utilizou uma tarefa de adivinhação para investigar aprendizagem. Os autores desenvolveram uma tarefa de adivinhação na qual os participantes tinham que escolher entre diversas opções para encontrar uma recompensa escondida. A recompensa não era aleatória, pois existia uma regra para encontrá-la. Uma vez que os participantes a descobriam, nenhuma adivinhação se tornava necessária.

O jogo cognitivo *Matching pennies*, citado na tabela, pode ser considerado uma tarefa de adivinhação. Mesmo que o estudo citado (Cohen & Ranganath, 2007) tenha tido como objetivo investigar como o FRN estava relacionado com a decisão tomada na próxima tentativa, as recompensas eram recebidas 50% do tempo. Os autores consideraram uma mudança na escolha da próxima tentativa como um ajuste positivo ou adaptativo, que referiram como aprendizagem por reforço.

Em tarefas de tomada de decisão, como a de sequência de botões (van der Helden, et al., 2010), os participantes tinham que aprender uma sequência de 12 botões, que reiniciava após cada erro. Havia quatro botões como opções e a sequência mudava assim que o padrão fosse aprendido (na décima segunda tecla correta de uma dada sequência). Esse paradigma permitiu aos autores investigar as respostas cerebrais ao *feedback* nos momentos que os participantes aprendiam, ou seja, as respostas aos erros anteriores ao ajuste correto. Nesse tipo de tarefa, pode-se variar a maneira que o *feedback* é apresentado, o seu valor, o número de botões na sequência, etc. Por exemplo, em outro estudo (Sailer, Fischmeister, & Bauer, 2010) havia uma sequência de botões para aprender, mas a tentativa não reiniciava após um erro. Além disso, o *feedback* era graduado de forma que ganhos e perdas variavam também em relação ao seus valores (5 ou 25 centavos).

A tarefa Eriksen Flanker também foi utilizada para estudar o FRN, especificamente, a relação funcional entre o ERN e o FRN. No estudo citado na tabela (Heldmann, Russeler, & Munte, 2008) foi solicitado aos participantes que indicassem se a letra no meio de um conjunto era um H ou um S, pressionando o botão direito e esquerdo do mouse, respectivamente. Por exemplo, no conjunto “SSHSS” e “HHHHH”, a letra no meio é um “H”, que seria indicado pressionando o botão direito do mouse. Após cada resposta, o *feedback*, informando se a resposta foi “correta e em tempo” ou “correta e atrasada” ou “falsa”, era apresentado. Os limites de tempo para o *feedback* foram definidos com base na distribuição do tempo de reação do bloco anterior.

Alguns estudos utilizaram uma tarefa de produção temporal com algumas importantes modificações (Gruendler, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011). Com o objetivo de investigar as diferenças hemisféricas no processamento do *feedback*, um estudo (Gruendler, et al., 2011) utilizou a tarefa com estímulos tácteis e lateralizados. Nessa tarefa, os participantes foram instruídos a estimar um segundo após um estímulo táctil no dedo indicador direito ou esquerdo. A resposta foi dada pressionando o botão com o mesmo dedo que foi estimulado. Além disso, foi inserido um sinal de parar em 20% das tentativas. Esse sinal

ocorria entre o estímulo táctil e a resposta, indicando que o participante não deveria responder naquela tentativa. Neste estudo, o *feedback* informava se a resposta foi “pontual” (*in time*) ou “não pontual” (*not in time*).

Outra modificação da tarefa de produção temporal para investigar aprendizagem foi feita mudando o intervalo alvo de um segundo para um alvo aleatório entre 300 e 2000 milissegundos (van de Vijver, et al., 2011). Nesta tarefa, os participantes foram instruídos a aprender a produzir o intervalo por tentativa e erro, utilizando *feedback* indicando se o intervalo estimado foi “muito curto”, “muito longo” ou “correto”. O intervalo alvo mudava a cada cinco tentativas corretas. Dessa forma, a tarefa foi utilizada para investigar aprendizagem de curto prazo e o ajuste ao *feedback* em uma tarefa implícita, de aprendizagem motora.

Em paradigmas de teste de hipóteses, os participantes devem aprender a regra por trás de um conjunto de estímulos, julgando se um determinado estímulo é uma instância ou é do mesmo conjunto constituído com base em uma regra oculta. O participante aprende essa regra por tentativa e erro, testando diferentes hipóteses. Por exemplo, no artigo citado na tabela (Papo et al., 2007), os participantes devem decidir se um conjunto de três números é uma instância de uma regra oculta. Um conjunto (três números) é apresentado por vez, e em cada tentativa o participante deve responder se o mesmo é ou não uma instância da regra oculta. Ressalta-se que neste tipo de paradigma, receber *feedback* negativo significa que é necessário rejeitar a hipótese antiga e elaborar uma nova com base na informação acumulada ao longo da tarefa, enquanto *feedback* positivo fornece evidência para continuar com a mesma hipótese testada. A interação entre *feedback* positivo e negativo é o mecanismo que permite ao participante aprender neste tipo de paradigma. Uma estrutura similar de tarefa é chamada **Tarefa de Aprendizagem Probabilística** na qual os participantes aprendem as contingências entre estímulo-resposta e o *feedback*, conforme descrito por outros (Cavanagh, et al., 2012).

2.3 A DOPAMINA E A APRENDIZAGEM POR REFORÇO

Um dos maiores problemas para resolver na aprendizagem por reforço é como associar ações e recompensas, especialmente quando as mesmas são atrasadas ou quando existem ações intermediárias e menos

relevantes para realizar. O problema central é atribuir crédito ou culpa às ações ou decisões que levaram à determinada recompensa ou punição (Sutton & Barto, 1998).

Biologicamente, existem evidências de que a associação entre estímulos e recompensas ou ações e recompensas é mediada pelos neurônios dopaminérgicos projetados principalmente das áreas cerebrais médias como o estriado e os lobos frontais (Schultz, 1998, 1999, 2002). Outros núcleos dopaminérgicos como substância *nigra pars compacta* e a área ventral tegmental e suas projeções para os gânglios basais e córtex estão associadas ao processamento de recompensas e são frequentemente incluídos como parte do sistema dopaminérgico mesoencefálico (Haber & Fudge, 1997; Wise & Rompre, 1989). Os neurônios dopaminérgicos apresentam uma resposta fásica sempre que há uma diferença entre a recompensa predita e a obtida (Schultz, 1998, 2002).

Um aspecto importante dessa resposta é o intervalo de tempo entre o estímulo/resposta e a recompensa/*feedback*: o valor de recompensa de um determinado estímulo ou comportamento diminui a medida que aumenta o tempo para a chegada da recompensa, conforme foi verificado não somente em animais (Fiorillo, Newsome, & Schultz, 2008; Kobayashi & Schultz, 2008), mas também em seres humanos (Gregorios-Pippas, Tobler, & Schultz, 2009). O último estudo demonstrou que o valor subjetivo de uma recompensa monetária diminui hiperbolicamente e exponencialmente com o tempo entre a decisão e a entrega da recompensa. Por outro lado, as respostas dopaminérgicas às recompensas são mais altas quando as mesmas são atrasadas (Fiorillo, et al., 2008). Esses estudos registraram as respostas dopaminérgicas utilizando registro de célula única (intracelulares) em animais, exceto o estudo em humanos (Gregorios-Pippas, et al., 2009), o qual utilizou ressonância magnética funcional (fMRI) para investigar os efeitos de desconto temporal nas áreas estriadas (especialmente no estriado ventral).

Devido ao seu papel fundamental na codificação de erros de predição, o sistema dopaminérgico tem sido amplamente referido em artigos de neuroimagem investigando o sistema de monitoramento de *performance* em seres humanos. Holroyd e Coles (2002) sugeriram que o sistema dopaminérgico mesoencefálico carrega os sinais de erros de predição a serem usados por outras partes do cérebro para aprender, especialmente pelo córtex cingulado anterior (ACC). Além disso, um estudo (Santesso et al., 2009) em humanos mostrou que a administração de um agonista de dopamina que reduz as respostas dopaminérgicas

fásicas prejudicou a aprendizagem por reforço, afetando também o FRN. Presume-se que o FRN seja causado por reduções fásicas na liberação de dopamina que são projetadas ao ACC. As ativações fásicas dos neurônios dopaminérgicos parecem refletir a codificação do valor da recompensa de eventos que orientam a atenção (Schultz, 2002).

O ERN, que é presumidamente gerado pelo mesmo sistema de monitoramento de *performance* do FRN, foi também afetado pela administração de um antagonista de dopamina, haloperidol (3mg). Nesse estudo (Zirnheld et al., 2004), a ingestão da droga foi associada com uma atenuação tanto do ERN quanto do FRN. Além disso, o grupo que tomou haloperidol cometeu mais erros na tarefa de Eriksen Flanker e teve pior desempenho na tarefa de produção temporal em relação ao grupo controle (placebo) e ao grupo que tomou difenidramina (que é uma droga com efeitos similares no sistema nervoso central, mas que não afeta a neurotransmissão dopaminérgica).

2.4 ERROS, ERROS DE PREDIÇÃO E O FRN

Um aspecto chave da resposta dopaminérgica é o erro de predição de recompensa, que é definido como a diferença entre a recompensa esperada e obtida (Schultz, 2002). O chamado erro de predição é um fator chave para a aprendizagem, uma vez que foi mostrado que recompensas completamente preditas não promovem aprendizagem (Waelti, Dickinson, & Schultz, 2001). Dessa forma, parece que os erros de predição de recompensa são os principais mediadores da aprendizagem por reforço.

Na mesma direção, estudos sugerem que o FRN sinaliza um erro de predição de recompensa, que pode ser tanto na forma de uma recompensa monetária ou de uma informação de desempenho, como o erro ou acerto (Nieuwenhuis, Holroyd, Mol, & Coles, 2004).

Na tentativa de explicar o FRN, a denominada teoria da aprendizagem por reforço do ERN foi proposta (*RL-ERN theory*) (Holroyd & Coles, 2002; Nieuwenhuis, et al., 2004). Nessa teoria, quatro predições centrais foram feitas: 1) O FRN reflete uma avaliação de **bom vs. ruim**, de uma maneira dicotômica, ou seja, tudo ou nada; 2) A amplitude do FRN depende da diferença entre o resultado obtido e o esperado; 3) A amplitude do FRN é inversamente correlacionada com a amplitude do ERN como uma função da aprendizagem; e 4) o FRN é gerado no ACC, especialmente na sua porção dorsal. No entanto,

existem resultados controversos relativos a cada um desses pressupostos, que são discutidos nas subseções seguintes.

2.4.1 Magnitude do *feedback* e o FRN

A primeira predição é relativa à questão do FRN ser ou não sensível à magnitude da recompensa ou apenas à sua valência (positiva vs. negativa). Estudos com tarefas de apostas comparando diferentes magnitudes de recompensa verificaram que o FRN reflete uma avaliação de se um evento ou *feedback* foi bom ou não, ao invés de refletir o quanto bom ou ruim ele foi (Gehring & Willoughby, 2002; Hajcak, et al., 2005; Yeung & Sanfey, 2004). Yeung & Sanfey (2004) analisaram o FRN e o P300 em resposta a ganhos e perdas de diferentes magnitudes (pequena e grande) em tarefa de aposta. Os resultados indicaram uma dupla dissociação entre a valência e a magnitude: o FRN foi apenas sensível à valência do *feedback*, com maiores respostas à perdas pequenas e grandes, enquanto que o P300 foi apenas sensível à magnitude, pois apresentou maiores amplitudes em resposta a grandes ganhos e perdas.

Hajcak et al. (2006) conduziu dois experimentos com o objetivo de descobrir se o FRN é sensível à magnitude do *feedback* negativo. Em ambos os estudos, utilizou-se uma tarefa de aposta com ganhos e perdas de pequena e grande magnitude. A diferença entre os experimentos foi que no segundo, foi introduzida uma recompensa neutra, representada por zero. Os autores presumiram que se o FRN fosse sensível à magnitude da recompensa, o FRN em resposta ao zero teria valores de amplitude intermediários, entre as perdas pequenas e grandes. No entanto, os resultados mostraram que o FRN foi insensível à magnitude dessas recompensas, respondendo de forma dicotômica a perdas e ganhos de ambas as magnitudes. O *feedback* neutro (zero) resultou em um FRN com amplitude equivalente a das perdas.

No entanto, um estudo recente (Donamayor, et al., 2011), utilizando MEG, encontrou que perdas maiores estão associadas com maior FRN. O equivalente magnético do FRN se estende de 230 a 465 ms após o *feedback*. Além disso, os resultados indicaram que o córtex cingulado posterior (PCC) foi a origem provável do FRN, com uma atividade subsequente no ACC. Este último resultado vai na mesma direção de outro estudo (Agam et al., 2011) com EEG e MEG simultâneos, e também fMRI (segundo experimento) investigando os geradores do ERN utilizando um paradigma antisacada. Os resultados

sugerem que o ERN é gerado na porção dorsal do PCC que comunica a região dorsal do ACC (dACC). Devido ao PCC estar também envolvido na avaliação da saliência emocional dos estímulos e também devido ao envolvimento das porções anteriores do córtex cingulado no processamento de mudanças na estratégia de resposta implicados na seleção e no reforço de comportamentos adaptativos, os autores sugeriram a existência de dois estágios de processamento de *feedback*: uma avaliação emocional inicial conduzida pelo PCC seguida por uma avaliação das mudanças na estratégia de resposta nas áreas mais anteriores do giro cingulado. Os resultados de conectividade funcional (MRI) mostraram que existe um trabalho coordenado entre essas duas áreas para o processamento de erro.

O último estudo verificou que ambos os estágios do processamento de *feedback* são sensíveis à magnitude das perdas, não dos ganhos, indicando que o FRN, neste caso o magnético FRN, é sensível à magnitude do *feedback* negativo. Os autores sugeriram que a ausência de efeitos de magnitude para o *feedback* positivo pode se dever ao fato de que os ganhos não requerem uma mudança de estratégia, como nas perdas.

Outro estudo (Y. Wu & Zhou, 2009) utilizando um paradigma similar, mas manipulando a expectativa de ganhos e perdas, verificou que o FRN não foi apenas sensível à valência do *feedback*, mas também à expectativa em relação à magnitude da recompensa, e não à magnitude sozinha. Considerando também os resultados dos estudos prévios, os autores sugeriram que enquanto o FRN está envolvido na avaliação de se um resultado é ou não consistente com as expectativas, o P300 é sensível à um processo posterior de avaliação de resultado, com a associada alocação de recursos atencionais. Resultados de outros estudos (Goyer, Woldorff, & Huettel, 2008; Hewig et al., 2007) encontraram apenas diferenças aparentes que falharam em apresentar significância estatística.

É importante observar que todos os estudos citados investigando as diferenças relacionados à magnitude do *feedback* utilizaram tarefas de aposta ou adivinhação nas quais o *feedback* é representado por recompensa financeira. Conforme foi demonstrado na tabela 1, esses estudos utilizaram recompensas pseudo-randômicas que não eram contingentes à resposta escolhida. Isso significa que não havia associação a ser aprendida e que a recompensa não representava um resultado real da ação do sujeito.

O único estudo encontrado que focou nos efeitos da magnitude do *feedback* no ERN utilizando resultados de desempenho encontrou

uma modulação paramétrica do ERN em função da magnitude do erro (Vocat, Pourtois, & Vuilleumier, 2011). Neste estudo, os sujeitos executavam movimentos balísticos para acertar em um alvo, que era alternado na tela. Os autores analisaram os ERPs em resposta ao toque na tela, que embora seja uma resposta, funciona como um *feedback* sensorial. Como o erro variou em diferentes graus (medidos como a diferença geométrica entre o ponto onde o objeto tocou na tela e o alvo), eles foram classificados em diferentes magnitudes (na mira, desvio leve, desvio médio e grande desvio). Os resultados demonstraram que o ERN foi sensível à magnitude do erro, aumentando monotonicamente com o grau de erro, ou seja, o ERN é mais negativo após grandes desvios.

Portanto, embora existam controvérsias, parece que o ERN e o FRN não são apenas sensíveis à valência do *feedback*, mas também, à sua magnitude, especialmente quando a mesma comunica a necessidade de ajustes comportamentais ou então de uma mudança de estratégia. No entanto, mais pesquisas utilizando *feedback* de desempenho são necessárias para adquirir um conhecimento mais consistente nessa questão específica.

2.4.2 Expectativa do *feedback* e o FRN

Se o FRN é causado por um erro de predição de recompensa é esperado que a sua amplitude varie de acordo com o quanto previsível ou imprevisível o *feedback* é. Por exemplo, se você está esperando perder três centavos como o resultado de uma resposta e realmente perde essa quantia, você não apresentará um erro de predição de recompensa, uma vez que a perda é esperada. Portanto, presume-se que a probabilidade de um resultado afeta o FRN.

Em uma tarefa de adivinhação, os participantes foram instruídos a escolher entre quatro balões, visando encontrar uma recompensa de cinco centavos (Holroyd, Nieuwenhuis, Yeung, & Cohen, 2003). Sem que os participantes soubessem, o *feedback* era selecionado aleatoriamente. Em uma condição, a probabilidade de obter uma recompensa era alta (75%), enquanto que na outra essa probabilidade era baixa (25%). Foi verificado que o FRN era maior (mais negativo) para omissões de recompensa quando a probabilidade da mesma era alta, ou seja, o *feedback* era inesperado. Outros estudos também evidenciaram que o FRN reflete um erro de predição de recompensa ao invés de um simples resultado negativo apenas (Bellebaum, Polezzi, &

Daum, 2010; Chase, et al., 2011; Holroyd, et al., 2009; Yasuda, Sato, Miyawaki, Kumano, & Kuboki, 2004).

Foi sugerido que o FRN reflete um erro de predição de recompensa enquanto que o ERN (fechado com a resposta) reflete a detecção de um erro comportamental (Potts, Martin, Kamp, & Donchin, 2010). Utilizando a análise de componentes principais, os autores verificaram que o ERN é composto por um único componente central enquanto que o FRN abrange diversos outros componentes centrais e pré-frontais. Eles sugeriram que enquanto o ACC monitora ambas as ações e o *feedback* para erros, o córtex pré-frontal atualiza a expectativa de recompensa baseado na violação da predição detectada pelo ACC.

No entanto, um estudo falhou em encontrar a diferença entre recompensas esperadas e inesperadas (Hajcak, et al., 2005). Neste estudo, o FRN em resposta ao *feedback* em uma tarefa de adivinhação foi comparado entre três condições com diferentes probabilidades (25, 50 e 75%). Não foram encontradas diferenças entre as condições em relação à probabilidade do *feedback*, sugerindo que apenas a sua valência (positiva vs. negativa) afetou o FRN. Uma das possibilidades de explicação para esse resultado incongruente é a chamada “falácia do apostador” (*gamblers fallacy*), que consiste no problema em que depois de obter uma recompensa, o apostador espera obtê-la novamente mesmo que as chances sejam baixas. Se este for o caso, ser explicitamente informado sobre a probabilidade de recompensa evitaria a falácia, tornando o FRN sensível à probabilidade da recompensa.

A fim de testar essa possibilidade, outros estudos foram realizados (Hajcak, Moser, Holroyd, & Simons, 2007; Holroyd, et al., 2009). Hajcak et al. (2007) conduziu dois experimentos utilizando uma tarefa de adivinhação na qual os participantes prediziam a recompensa esperada antes de escolher (estudo 1 – prospectivo) ou após a escolha ter sido feita (estudo 2 – retrospectivo). Eles encontraram que apenas no estudo 2 o FRN foi maior após recompensas inesperadas.

O mesmo problema foi investigado por outros (Holroyd, et al., 2009) com três experimentos distintos. No primeiro experimento, foi utilizada uma tarefa de adivinhação similar àquela utilizada no estudo de Hajcak et al. (2005), mas com a probabilidades diferentes (5, 50 e 95%) e também com a possibilidade de sofrer perdas de diferentes magnitudes se a recompensa não fosse encontrada ou se o participante respondesse muito devagar. Verificou-se que o FRN foi maior em resposta ao *feedback* negativo inesperado do que ao *feedback* negativo esperado. Entretanto, os tamanhos de efeito foram baixos, mesmo com uma diferença extrema na probabilidade do *feedback* (5% - 95%). Além

disso, não foi encontrado um FRN intermediário para a condição controle (50%). No segundo experimento, os autores mudaram a tarefa de forma que ao invés de explicitamente indicar a probabilidade das recompensas no início de cada tentativa, foram apresentadas imagens arbitrárias de objetos no início de cada tentativa. Cada objeto representava uma probabilidade distinta de recompensa, sendo que o valor de cada imagem tinha que ser aprendido por tentativa e erro ao longo da tarefa. Os resultados mostraram maiores diferenças no FRN entre *feedback* esperado e inesperado, mas o FRN da condição controle ainda não era diferente do apresentado em resposta ao *feedback* esperado. Assim, no experimento 3, os autores modificaram o paradigma fazendo às contingências estímulo-resposta-recompensa aprendíveis. Os resultados demonstraram que quando as contingências eram aprendíveis, a amplitude do FRN variava de acordo com o grau de previsibilidade da recompensa. Recompensas inesperadas provocaram FRNs maiores.

Os resultados desses estudos sugerem que o FRN é sensível à probabilidade do *feedback* apenas quando existe um padrão aprendível. Foi sugerido que os participantes também são mais motivados em tarefas nas quais eles conseguem ver a conexão entre as ações e os resultados (Holroyd, et al., 2009). Além disso, em tarefas com contingências aprendíveis, o *feedback* é mais informativo e relevante para o desempenho, o que o tornaria, conseqüentemente, mais sensível às diferentes características do mesmo.

Oliveira et al. (2007) investigou se a expectativa do *feedback* está associada com a amplitude do FRN em uma tarefa de *timing* antecipatório. Nesse experimento, os participantes eram instruídos a pressionar um botão quando um estímulo visual em movimento horizontal atingia um alvo específico na tela. Antes do *feedback*, os participantes explicitamente revelavam se a sua resposta havia sido muito cedo, tarde ou no alvo. O *feedback* era apresentado depois dessa estimativa. Foi encontrado que os participantes apresentavam um viés superotimista, julgando que suas respostas estavam corretas com uma frequência maior do que elas realmente estavam. O FRN foi maior para *feedback* indicando erro em tentativas que o participante acreditava estar correta. Adicionalmente, foi verificado um FRN após *feedback* positivo em tentativas nas quais os participantes haviam predito com erradas. Em um segundo experimento, os autores removeram a predição de *performance* do paradigma e introduziram falso *feedback* indicando uma resposta correta quando erros foram cometidos. Foi verificado que o *feedback* positivo falso provocou um FRN mais alto do que o *feedback*

negativo verdadeiro. Os autores sugeriram que o FRN reflete um erro de predição que não é necessariamente negativo. Adicionalmente, eles sugeriram que um viés otimista natural pode ter contribuído aos resultados dos experimentos prévios que indicaram maior FRN em resposta ao *feedback* negativo, uma vez que o *feedback* positivo seria naturalmente mais esperado do que o negativo.

2.4.3 A aprendizagem e o FRN

Erros de predição de recompensa, ou apenas erros de predição, mudam à medida que as pessoas aprendem. O processo de aprendizagem promove o desenvolvimento de fortes associações entre as ações e os resultados (*feedback*), de forma que se pode executar uma tarefa de maneira mais eficiente. Se isto é verdade, o FRN reduziria nos estágios finais da aprendizagem, pois as predições estão em maior concordância com os resultados reais.

Foi demonstrado que o FRN reduziu em participantes que descobriram uma regra oculta em uma tarefa de adivinhação (Bellebaum & Daum, 2008). Este estudo verificou que no segundo estágio da tarefa, apenas os participantes que aprenderam apresentaram redução na amplitude do FRN após *feedback* de erro. Além disso, o P300 foi maior em resposta ao *feedback* positivo e para resultados inesperados.

O FRN e o P300 parecem representar aspectos diferentes do processamento de *feedback*. Essa dissociação foi investigada em outro estudo (Sailer, et al., 2010) utilizando um paradigma de aprendizagem de uma sequência de botões na qual os participantes tiveram que aprender uma sequência de escolhas baseada no *feedback*, indicando ganhos ou perdas de diferentes magnitudes (5 ou 25 centavos). Eles encontraram que bons e maus aprendizes mostraram reduzido FRN no estágio final da tarefa, mas que apenas os bons aprendizes adquiriram conhecimento da sequência. Por outro lado, o P300 reduziu apenas no grupo dos bons aprendizes na segunda metade da tarefa, indicando que esse componente de ERP foi mais sensível à aprendizagem das contingências resposta-*feedback*. Os autores sugeriram que o FRN pode representar o valor motivacional de uma recompensa que diminui ao longo da tarefa. Ressalta-se, entretanto, que a maneira como o FRN foi mensurado neste estudo foi diferente dos outros. Enquanto o FRN foi mensurado como a média da amplitude na janela de tempo e eletrodo associados ao FRN por estudos que encontraram um efeito (Bellebaum

& Daum, 2008; Heldmann, et al., 2008), Sailer & Ulsperger (2010) mediram o FRN de cada sujeito como a diferença de voltagem da base para o pico e entre o pico mais negativo e a média dos picos positivos imediatamente precedentes e posteriores. O mesmo procedimento foi empregado em outro estudo (Yeung & Sanfey, 2004). Ou seja, os dois estudos que negaram esse efeito utilizaram uma medida diferente do FRN. Além do mais é que o FRN é normalmente maior para *feedback* negativo inesperado, e não há razão para acreditar que o mesmo tenha um valor motivacional superior ao *feedback* positivo. Dessa forma, ainda não há evidência suficiente para oferecer suporte à hipótese de que o FRN é um componente que reflete o valor motivacional do *feedback*.

Utilizando uma tarefa Eriksen Flanker, um estudo (Heldmann, et al., 2008) analisou a relação funcional entre o ERN e o FRN. Se o FRN é provocado por *feedback* inesperado, aprender a tarefa faria o erro esperado, uma vez que ele provocaria um ERN logo após a resposta. Os resultados mostraram que o *feedback* em resposta a erros pequenos, não facilmente detectados, foram associados com maior FRN e com a ausência do ERN (após a resposta), enquanto que grandes erros que eram mais fáceis de detectar, foram seguidos por um ERN e associados com reduzido FRN. Os autores sugeriram que o *feedback* de desempenho apenas provoca um FRN quando ele contém informação não redundante, ou seja, informação que não pode ser detectada sem o *feedback*.

Na mesma direção, outro estudo (Muller, Moller, Rodriguez-Fornells, & Munte, 2005) testou o FRN e o ERN durante uma tarefa na qual os participantes aprendiam associações entre vários desenhos e as respectivas respostas com a mão esquerda e direita. Foi demonstrado que o FRN reduziu na segunda metade da tarefa apenas quando o *feedback* era verdadeiro, mas não quando era falso. Assim como o FRN reduziu, o ERN aumentou na segunda metade da tarefa. Os autores sugeriram que esses dois componentes podem refletir ativações com diferentes origens cerebrais, uma mais anterior (ERN), dedicada ao monitoramento do desempenho por meio de sinais internos, e outra mais posterior (FRN), que utiliza informação externa para monitorar e ajustar a *performance*.

Os estudos citados previamente analisaram o impacto da aprendizagem no FRN, mas a compreensão de como ele contribui para aprender uma habilidade ou para adquirir conhecimento é ainda um desafio. Em relação a esse problema, um estudo relevante (van der Helden, et al., 2010) investigou como o FRN está associado à boa aprendizagem por reforço, o que em tal estudo foi definido como o

quanto um participante evitou o mesmo erro após cometê-lo (*good reinforcement learning*). Utilizando um paradigma no qual os participantes tiveram que aprender uma sequência de teclas, eles verificaram que o FRN foi um bom preditor de se os participantes evitariam ou repetiriam os mesmos erros. Foi demonstrado que quanto maior o FRN em resposta ao *feedback* de erro, menor a probabilidade de repetir o mesmo erro na próxima tentativa, ou seja, melhor a aprendizagem.

Holroyd & Coles (2002) sugeriram que o FRN reflete um erro de predição codificado no ACC e utilizado para fins adaptativos, a fim de maximizar as recompensas. Outros estudos encontraram que o FRN (Cohen & Ranganath, 2007) e o ERN (Gehring, et al., 1993) são preditivos do ajuste comportamental na próxima tentativa. Van der Vijver et al. (2011) utilizando uma versão modificada da tarefa de produção temporal (descrita previamente), não encontraram diferença no FRN precedendo ajustes comportamentais corretos e incorretos. Por outro lado, eles verificaram que a energia de teta (4-8 Hz) precedendo tentativas corretamente ajustadas foi maior do que após o *feedback* incorreto, precedendo ajustes também inadequados.

2.5 CORRELATOS OSCILATÓRIOS DO PROCESSAMENTO DE FEEDBACK

A grande maioria dos artigos sobre os correlatos neurais do processamento de *feedback* focou nos componentes evocados do sistema de monitoramento da *performance* (Cohen, et al., 2011). Conforme foi afirmado antes neste capítulo, eventos neurais que não estão em fase sincronizados com o *feedback*, ou seja, que não acontecem exatamente no mesmo momento, não podem ser detectados se a atividade neural for analisada exclusivamente no domínio dos ERPs, uma vez que sinais que não estão em fase síncrona se cancelariam na média final (Herrmann, Grigutsch, & Busch, 2005).

Cohen et al. (2011) argumentam que embora exista um grande número de artigos dando suporte à associação entre o FRN e as respostas dopaminérgicas fásicas, ainda não há evidência inequívoca para tal. Os autores não negam a ligação, mas sugerem que não existem evidências convincentes que pudessem garantir que a resposta dopaminérgica fásica é a principal origem das diferenças do FRN observadas em tais pesquisas. Além disso, os autores criticaram que a maioria dos estudos na área de aprendizagem baseada no *feedback*

focaram exclusivamente no mecanismo pelo qual a necessidade de mudança é sinalizada ao invés de endereçar os mecanismos pelos quais a aprendizagem acontece, sem considerar a natureza das representações sendo aprendidas. Os autores defenderam que a análise das oscilações ou das decomposições de tempo e frequência do EEG e MEG oferece informações mais ricas e biologicamente interpretáveis em relação à como o *feedback* é processado para a aprendizagem do que o FRN.

Existem algumas predições centrais no novo modelo para aprendizagem com *feedback* proposto por Cohen et al. (2011): 1) A aprendizagem está associada ao aumento na sincronização entre áreas de processamento do estímulo e as áreas motoras relacionadas ao mapeamento sendo aprendido; 2) As alterações na sincronização relacionadas à aprendizagem são moduladas de forma *top-down*⁸: oscilações teta frontais modulam a aprendizagem com *feedback* negativo, enquanto que beta frontal modula aprendizagem por meio de *feedback* positivo; 3) Modulações do córtex pré-frontal da sincronização entre áreas estão refletidas nas diferenças entre e intrassujeitos. Em relação às diferenças intrassujeitos, é esperado que a aprendizagem promova mudanças nessa sincronização; em relação às diferenças entre sujeitos, é esperado que as maiores sincronizações entre áreas cerebrais sejam observadas em sujeitos que são melhores aprendizes. Estas predições são novas e ainda não foram testadas. No entanto, os autores fizeram tais predições com base em alguns estudos disponíveis a respeito dos correlatos oscilatórios da aprendizagem.

A principal faixa de frequência analisada nos estudos sobre processamento de *feedback* e sobre o sistema de monitoramento do desempenho é a teta (4-8 Hz). Foi sugerido que o ERN representa uma sincronização em fase de intermitente atividade de EEG na frequência teta (Luu, Tucker, & Makeig, 2004). Outros estudos concluíram que o ERN surge de um reinício da fase e da sincronia de fase de atividade de EEG na frequência teta, no contexto de que teta aumenta após um erro ser cometido (Trujillo & Allen, 2007).

Um dos primeiros estudos investigando os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* (Cohen, et al., 2007)

⁸ Na neurociência, modulação *top-down* é definida como o processo controlado pelas áreas executivas do cérebro, especialmente as áreas pré-frontais. Esse termo é utilizado em inglês ao longo do texto para evitar a tradução literal que daria uma ideia de modulação “de cima para baixo”, uma vez que as áreas pré-frontais que realizam as funções executivas não estão necessariamente na parte de cima do cérebro, e sim, nas porções externas anteriores.

demonstrou que a energia de teta aumenta após as perdas em relação aos ganhos, especialmente nas áreas médias frontais, enquanto que a energia em gama (21-29 Hz) nas mesmas regiões aumenta após os ganhos, mas não após as perdas. Foi observado que essas respostas são moduladas pela probabilidade da recompensa, com as maiores diferenças para perdas inesperadas. Além disso, eles verificaram que o FRN não foi sensível aos mesmos aspectos do *feedback* que as oscilações em teta, sugerindo que essas duas técnicas de análise podem fornecer *insights* complementares sobre os processos neurais associados ao *feedback*.

Outros estudos apresentaram evidências de que o *feedback* de erro provoca um aumento na energia de teta aproximadamente 200 a 400 ms após a apresentação do *feedback* (Cavanagh, et al., 2012; Christie & Tata, 2009; Cohen, Elger, & Fell, 2009; Marco-Pallares, et al., 2008; van de Vijver, et al., 2011). O segundo resultado relativo ao aumento em gama-baixo ou beta-alto (20-30 Hz) após *feedback* positivo ou após recompensas, foi também evidenciado em outros estudos (Marco-Pallares, et al., 2008; van de Vijver, et al., 2011). Por outro lado, um aumento na energia de gama (30-40 Hz) após *feedback* negativo em relação ao positivo em um paradigma de teste de hipóteses foi encontrado por outro estudo (Papo, et al., 2007).

Um estudo recente (Cavanagh, et al., 2011) utilizou modelagem computacional para calcular os erros de predição e a incerteza inerente a cada tentativa, a fim de investigar como as oscilações teta na área média-frontal são moduladas pela incerteza e como que esses sinais estão conectados com as abordagens de exploração da mesma ou mudança de estratégia (*exploration vs. exploitation*)⁹ em uma tarefa de aprendizagem por reforço. Durante a tarefa, os participantes tinham primeiramente que explorar as opções de resposta (*exploration*) para

⁹ No inglês, *exploitation* significa utilizar repetidamente o mesmo recurso, enquanto que o termo *exploration* refere-se à exploração de novos recursos e novas possibilidades. Na literatura os termos *exploration* e *exploitation* são utilizados para designar duas abordagens cognitivas distintas. *Exploitation* é o termo utilizado para descrever a abordagem na qual o sujeito utiliza a mesma estratégia ou técnica sem explorar novas possibilidades. Na neurociência cognitiva, *exploration* é uma abordagem onde o sujeito testa novas possibilidades ou estratégias mentais. Para ter um bom desempenho, é necessário iniciar com maior *exploration*, testando diferentes estratégias, e então se valer dessa técnica que funcionou melhor para obter melhor desempenho (*exploitation*). Essa descrição foi necessária uma vez que não foram encontradas palavras em português que sozinhas fossem boas traduções para tais termos.

então encontrar um padrão ótimo de resposta (*exploitation*). Três resultados principais apoiaram a ideia de que a energia de teta nas áreas médias-frontais e frontopolar direita reflete o grau de incerteza associado ao *feedback*: 1) incerteza relativa e energia de teta foram positivamente correlacionados somente quando os participantes estavam escolhendo uma opção com maior incerteza associada; 2) estas correlações foram encontradas nas áreas cerebrais associadas com a exploração de novas estratégias (*exploration*), incluindo córtex dorsomedial e o polo frontal direito; 3) estes efeitos relacionados com a exploração (*exploration*) foram maiores em participantes que efetivamente utilizaram a incerteza como guia para a exploração de novas estratégias.

A energia de teta representa, portanto, diferentes características do sistema de monitoramento de desempenho. Utilizando um conjunto de tarefas diferentes, a hipótese de que os processos oscilatórios na frequência teta são refletidos em uma gama de componentes de ERP médios-frontais, como o ERN, FRN, N2 (controle e dissonante) e a negatividade relacionada à resposta correta (CRN), foi testada (Cavanagh, et al., 2012). Mesmo que estes componentes do ERP sejam estudados como indexadores do sistema de monitoramento do desempenho, eles são diferentemente sensíveis a diferentes características do *feedback* e resposta. Por exemplo, o N2 é sensível a variações nas demandas de estímulo-resposta, enquanto que o N2 dissonante responde a estímulos que representam uma diferenciação perceptiva inesperada (ou uma dissonância perceptiva). Os resultados desse estudo mostraram que, enquanto esses componentes específicos de ERP são sensíveis a manipulações de características específicas dos estímulos em cada tarefa, a energia de teta foi sensível a todas as manipulações, sugerindo que teta médio-frontal reflete um mecanismo não específico para a organização dos processos neurais próximos aos pontos de decisão ou para coordenar informações de desempenho de fontes externas e internas. Neste estudo, a energia de teta foi sensível à novidade, ao conflito, à punição e ao erro, todos esses considerados como informação relevante para o desempenho.

Recentemente, van de Vijver et al. (2011) investigaram os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* em uma tarefa de produção temporal. Foi observado um aumento na energia de teta nas áreas médias-frontais após o *feedback* negativo, enquanto que após o *feedback* positivo (“correto”), a energia em beta (18-24 Hz) aumentou sobre a região central do hemisfério esquerdo. O aumento da energia de teta foi um bom preditor do ajuste adequado na próxima tentativa;

ajustes corretos foram associados com maior energia em teta após *feedback* negativo na tentativa anterior. Além disso, sincronização em teta entre a área média-frontal (eletrodo FCz) e o pré-frontal direito (eletrodo F6) e entre o pré-frontal direito (F6) e a área sensoriomotora esquerda (CP3) aumentou mais após *feedback* de erro do que de acerto. Os autores sugeriram que a detecção de erro no *feedback* leva a uma maior comunicação entre a área de monitoramento de *performance* (média-frontal) e às áreas associadas com a tomada de decisão e também relacionadas com a reestruturação do plano de ação (áreas pré-frontais dorsolaterais).

3 ESTUDO 1: MUITO PERTO OU MUITO LONGE? DIFERENÇAS ENTRE *FEEDBACK* COM ERROS PEQUENOS E GRANDES E INTERAÇÕES COM A APRENDIZAGEM

Este estudo foi desenhado visando investigar como o *feedback* de erros pequenos e grandes está associado com diferenças nos ERPs, oscilações e conectividade em bons e maus aprendizes.

RESUMO

O processamento de *feedback* é importante para a aprendizagem, e, portanto, pode afetar como o ser humano consolida as habilidades motoras. Este estudo investigou as diferenças no processamento de *feedback* graduado de erros pequenos e grandes entre bons e maus aprendizes durante a execução de uma tarefa de produção temporal. Sinais multivariados de EEG foram analisados em termos de potenciais relacionados ao evento (ERPs), oscilações e conectividade. Os resultados indicaram que mesmo o *feedback* comunicando grandes erros tendo sido associado com maior negatividade relacionada ao *feedback* (FRN), o *feedback* de erro pequeno foi associado com maior P300 e com um aumento na amplitude do ERP nas áreas motoras no hemisfério esquerdo (contralateral à mão de resposta). Além disso, pequenos erros induziram maior dessincronização nas faixas alfa e beta com topografias distintas para os dois grupos: os bons aprendizes mostraram uma redução mais localizada de beta sobre as regiões fronto-centrais esquerdas, enquanto os maus aprendizes demonstraram uma redução ampla na energia de alfa após o *feedback* de erro pequeno. Apenas os bons aprendizes apresentaram um aumento na conectividade entre a área média-frontal (FCz) e a área central esquerda (C3). As respostas oscilatórias na área motora esquerda (aproximada) bem como a sincronização entre FCz e C3 foram consistentemente correlacionadas com o desempenho nas últimas etapas da tarefa quando o *feedback* de desempenho não estava disponível. Esses resultados indicam que mesmo que os erros grandes estejam associados com maior FRN, erros pequenos mobilizaram mais atenção e recursos de memória que são cruciais para aprendizagem, mais evidente nos bons aprendizes. Assim, os resultados sugerem que as áreas motoras tem um papel importante no processamento de *feedback* graduado para a consolidação da habilidade.

Palavras-chave: Aprendizagem. EEG. Oscilações. Habilidade motora.

1 INTRODUÇÃO

A aprendizagem pode ser considerada como um processo contínuo e incremental que nos permite melhorar e atingir altos níveis de proficiência em uma série de habilidades. Algumas habilidades são aprendidas explicitamente, como descobrir as regras do xadrez. Outras são aprendidas implicitamente, como andar de bicicleta, entre outras habilidades motoras. As habilidades implícitas dependem de processos não verbais de forma que explicações sobre as regras ou como fazer não são suficientes para aprender. Estas são consideradas implícitas, tendo em vista que é necessária muita prática para dominá-las, pois o processo de aprendizagem é incremental. Mesmo que melhoras no desempenho possam ser causadas pela prática somente (Diedrichsen, White, Newman, & Lally, 2010), diferentes níveis de *feedback* são frequentemente necessários para um processo de aprendizagem rápido e robusto (Masters, Maxwell, & Eves, 2009). No presente estudo, *feedback* é conceituado como um resultado de uma ação que pode ser obtido de diferentes fontes, desde registros sensoriais diretos, como olhar onde a bola foi após acertá-la, até fontes mais indiretas, como o *feedback* verbal do técnico sobre um movimento específico. Devido ao processo de aprendizagem ser altamente dependente do tipo de informação utilizada para guiar o desempenho (Wolpert, et al., 2011), o *feedback* vem sendo amplamente investigado em pesquisas relacionadas à aprendizagem (Burkhard, Patterson, & Rapue, 1967; Kawashima et al., 2000; W. F. Wu et al., 2011; Wulf, Shea, & Matschiner, 1998).

Um indicador frequentemente estudado de como o *feedback* é processado pelo cérebro é a negatividade relacionada ao *feedback* (FRN), que é uma deflexão negativa nos ERPs que inicia cerca de 150 ms com pico entre 230 e 330 ms após a apresentação de *feedback*, indicando um erro (Holroyd & Krigolson, 2007; Luu, et al., 2003; Miltner, et al., 1997) ou punições como perdas monetárias (Cohen & Ranganath, 2007; Hajcak, et al., 2007) com uma topografia média-frontal. Desde a sua primeira publicação (Miltner, et al., 1997), o FRN tem sido vastamente investigado em experimentos comparando diferentes características relacionadas ao processamento de *feedback* (Brunia, Hackley, van Boxtel, Kotani, & Ohgami, 2011; Dayan & Niv, 2008; Holroyd & Coles, 2002; Holroyd, et al., 2003; Nieuwenhuis, et al., 2004). Presume-se que o FRN seja provocado por um erro de predição de recompensa: ele é mais negativo sempre que um resultado é pior do que o esperado (Chase, et al., 2011; Hajcak, et al., 2005; Holroyd & Krigolson, 2007; Holroyd, et al., 2009; Kobza, Thoma,

Daum, & Bellebaum, 2011; Yu & Zhou, 2006) ou apenas diferente do esperado (Oliveira, et al., 2007).

Se o FRN reflete uma dissonância entre os resultados preditos (esperados) e os reais (obtidos), pressupõem-se que a aprendizagem causaria uma redução do FRN, uma vez que a mesma fortalece as associações entre respostas e resultados, permitindo ao aprendiz realizar predições mais acuradas sobre o seu próprio desempenho (Wolpert, et al., 2011). Essa hipótese vai ao encontro dos resultados de estudos anteriores que verificaram uma relação entre o FRN e a aprendizagem (Bellebaum & Daum, 2008; Heldmann, et al., 2008; Sailer, et al., 2010). Foi demonstrado que os bons aprendizes apresentaram um menor FRN (mais positivo) do que os maus aprendizes (Sailer, et al., 2010). Além disso, o FRN tem uma relação funcional com a negatividade relacionada ao erro (ERN), pois o FRN é maior quando o monitoramento do desempenho é mais dependente de *feedback* externo, nos estágios iniciais da aprendizagem (Heldmann, et al., 2008).

Embora o FRN seja muito informativo para a aprendizagem, ele está baseado em uma simples técnica de média, não podendo, portanto, representar as respostas cerebrais que não são acopladas ao início do *feedback*, como as oscilações de tempo variável e sincronização ou conectividade. Evidências recentes sugerem que os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* podem trazer novas evidências para a compreensão de como o mesmo é processado para a aprendizagem (Cavanagh, et al., 2012; Cohen, et al., 2007; Cohen, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011). van de Vijver et al. (2011) verificaram que a energia de teta aumentava na área média-frontal após a apresentação de *feedback* negativo, enquanto que maior energia em beta estava associada ao processamento de informação positiva. Eles demonstraram que a energia de teta após *feedback* negativo, e a energia de beta (18-24 Hz) após *feedback* negativo e positivo eram maiores em tentativas que precediam um ajuste positivo. Além disso, a sincronização de fase entre FCz e F5/F6 na frequência teta aumentou após o *feedback* negativo, mas esse aumento não foi preditivo do ajuste comportamento na próxima tentativa. No entanto, outro estudo (Cavanagh, et al., 2009) verificou que a sincronização em teta entre a área média-frontal, especialmente FCz, e as áreas pré-frontais laterais (F5/F6) aumentou durante as tentativas erradas (fechado com a resposta e não com o *feedback*), e que esta mudança foi preditiva da lentificação da resposta na próxima tentativa. Adicionalmente, outro estudo demonstrou (Cavanagh, et al., 2010) que a sincronização de fase entre as áreas média-frontal e pré-frontal lateral foi maior após a apresentação de

feedback de erro, mas esse aumento não foi preditivo de ajuste comportamental adequado. Além disso, foi encontrado que a energia de teta na área média-frontal aumentou somente após um erro de predição negativo (pior do que o esperado), mas não em seguida a um erro de predição positivo (melhor do que o esperado). Juntos, esses estudos sugerem que tanto as oscilações neurais e a sincronização entre áreas podem fornecer *insights* sobre os processos de monitoração do desempenho.

Ressalta-se que a maioria dos estudos citados sobre aprendizagem utilizaram *feedback* categórico (correto vs. incorreto, por exemplo) em tarefas cujo desempenho é dependente do conhecimento explícito de regras bem definidas. Van de Vijever et al. (2011) é uma exceção, pois investigaram a aprendizagem utilizando uma tarefa de produção temporal, entretanto, com *feedback* categórico, que provê informação suficiente para aprendizagem de tarefas de aprendizagem explícitas, mas não é muito eficiente quando a habilidade em questão é motora. Wolpert, Diedrichsen e Flanagan (2011) argumentam que a aprendizagem por reforço, ao contrário da baseada em erro, promove uma aprendizagem mais lenta uma vez que a recompensa ou o *feedback* é categórico e por isso fornece menos informação para que o ajuste e a redução do vetor de erros seja reduzido. Para aprender uma tarefa de produção temporal, é necessário não apenas ajustar mentalmente o intervalo de tempo a ser produzido, mas também, coordená-lo com a resposta motora, reduzindo o erro incrementalmente, tentativa por tentativa. É uma tarefa na qual a aprendizagem baseada em erro faria mais sentido do que a por reforço, dado que é necessário conhecer a quantidade exata de erro de cada tentativa (informação gradativa).

Dessa forma, o presente estudo objetivou analisar as respostas cerebrais em resposta ao *feedback* de desempenho, indicando erros grandes e pequenos, comparando tais respostas entre participantes que aprenderam e não aprenderam a tarefa de produção temporal (bons vs. maus aprendizes). A utilização de uma tarefa de produção temporal permitiu a investigação da aprendizagem procedural, pois esta é uma tarefa implícita que requer ajustes incrementais no desempenho que são altamente dependentes do *feedback* (é difícil saber o quanto um intervalo se desviou do alvo sem a presença de *feedback*). Além disso, este paradigma possibilitou a inclusão de *feedback* com alta resolução, ou seja, *feedback* graduado, após cada tentativa (em milissegundos), o que favorece a implementação de pequenos ajustes proporcionais na *performance*.

Optou-se pelo uso de *feedback* graduado por duas razões: 1) durante a aprendizagem motora ou procedural, o *feedback* normalmente é graduado, pois o grau do erro pode ser visto imediatamente após a ação; e 2) o ajuste de *performance* é feito majoritariamente com base na quantidade de erro e não na informação categórica. Por exemplo, um jogador de futebol chuta a bola ao gol e erra. A fim de ajustar o programa motor para o próximo chute, o jogador precisa saber o quão longe e alta a bola foi, ao invés de utilizar apenas a informação de que ele não fez um gol na última tentativa (*feedback* categórico). A aprendizagem procedural exige um melhor controle sobre esses ajustes finos em seus diferentes parâmetros, como força, tempo, equilíbrio, direção, etc.

O objetivo desse estudo é, portanto, dividido em três partes: 1) Comparar os ERPs, oscilações e a sincronização de fase ou conectividade em resposta ao *feedback* indicando erros grandes e pequenos; 2) Analisar as diferenças entre bons e maus aprendizes em relação aos ERPs, oscilações e conectividade em resposta ao *feedback* de erros grandes e pequenos; 3) Correlacionar os ERPs, oscilações e conectividade em resposta ao *feedback* com a consolidação da aprendizagem, mensurada durante tentativas nas quais não foi fornecido *feedback* de desempenho.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Participantes

Trinta e dois adultos (média de idade = 24.4 anos, DP = 5.08, 11 homens, 2 canhotos) com audição normal (relatada) e visão normal ou corrigida participaram deste experimento. A amostra foi dividida em dois grupos de acordo com o desempenho na tarefa experimental, conforme é explicado no decorrer desta sessão. Esse procedimento resultou em dois grupos: o grupo dos bons aprendizes (n = 16, média de idade 24.8 anos, cinco homens) e o grupo dos maus aprendizes (n = 16, média de idade = 24 anos, seis homens). O consentimento livre e esclarecido foi assinado pelos participantes antes da sessão experimental. Este estudo foi aprovado pelo comitê de ética do Departamento de Psicologia da Universidade de Goldsmiths e conduzido de acordo com a Declaração de Helsinki.

3.2.2 Tarefa experimental

Foi utilizada uma versão modificada da tarefa de produção temporal (Miltner, et al., 1997). Na tarefa original, o participante é instruído a estimar um intervalo de um segundo após aviso sonoro, tendo o mesmo que pressionar um botão no exato momento em que ele pensa que esse tempo passou desde que o som foi apresentado. No presente experimento, os participantes foram instruídos a produzir um intervalo de 1.7 segundos ou 1700 milissegundos. Esta modificação do intervalo de tempo a ser produzido foi introduzida por duas razões: 1) com durações integrais de segundo, os sujeitos tentem a confiar mais em técnicas de contagem mental ao invés de utilizar o *feedback* para ajustar as suas estimativas; 2) os mecanismos cerebrais para estimar intervalos menores e maiores que um segundo são diferentes, sendo as durações de mais de um segundo menos automáticas em relação às inferiores (Lewis & Miall, 2003).

Cada tentativa iniciou com uma cruz de fixação apresentada no centro da tela por uma duração aleatoriamente variável entre 300 e 900 ms seguida por um estímulo sonoro (800 Hz, 50 ms), indicando o início do intervalo. Era solicitado aos participantes pressionar um botão com o seu dedo polegar direito (incluindo os participantes canhotos) no momento que eles achassem que o intervalo de 1700 ms havia passado a partir do estímulo sonoro. Após a resposta (600 ms), os participantes recebiam *feedback* indicando a magnitude do erro, ou seja, a exata diferença, em milissegundos, entre o intervalo produzido pelo participante e o intervalo alvo (1700). Essa diferença tinha sinal negativo caso o intervalo tivesse sido mais curto ou positivo caso tivesse sido mais longo que o alvo (1700 ms). O *feedback* permanecia na tela por um segundo. Após esse tempo, a cruz de fixação aparecia na tela indicando o início da próxima tentativa.

Com o objetivo de investigar a aprendizagem ou a consolidação da habilidade, foram incluídos seis blocos de 20 tentativas sem *feedback* de desempenho. Nesses blocos, ao invés do *feedback*, a palavra “OK” era apresentada após a resposta (respeitando os mesmos intervalos de tempo utilizados para o *feedback* real). No total, os participantes realizavam seis blocos com *feedback* (80 tentativas cada) alternados com seis blocos sem *feedback* (20 tentativas cada). Dessa forma, cada participante realizou 480 tentativas com *feedback* e 120 tentativas sem *feedback*. A tarefa iniciou com um bloco sem *feedback* e finalizou com outro bloco sem *feedback* (isso porque na metade da tarefa, houve um

intervalo maior onde foram feitos dois blocos com *feedback* na sequência). Os participantes eram livres para fazer pequenos intervalos entre os blocos, mas tinham um intervalo maior no meio da tarefa (entre três e cinco minutos). A tarefa durou de 50 minutos a uma hora.

As tentativas com *feedback* foram divididas em dois tipos: *feedback* de erros grandes e de erros pequenos. A fim de evitar a repetição da palavra *feedback*, a partir desse momento, as categorias serão referidas apenas como grandes e pequenos erros, no entanto, é importante lembrar de que esse capítulo trata do *feedback* e não da resposta em si. As análises são todas feitas a partir do *feedback* indicando erros grandes e pequenos. Essa divisão foi feita com base nos percentuais do erro absoluto para cada sujeito e em cada bloco. Foi definido que 25% das tentativas com os erros mais baixos seriam consideradas como “erros pequenos” e os 25% mais altos como “erros grandes”, ressaltando que esses percentuais foram calculados para cada participante em cada bloco, o que evitou qualquer viés causado pelas diferenças no número de tentativas entre esses dois tipos de erros e ao longo da tarefa. Adicionalmente, essa decisão permitiu a análise das diferenças relacionadas ao uso do *feedback* como informação para o ajuste da *performance* sem confundir com o grau de expectativa associado com menores erros nos blocos finais (o que seria esperado a medida que os participantes aprendem). Esse fator é particularmente importante uma vez que foi demonstrado que a probabilidade do erro afeta como córtex cingulado anterior o processa, sendo que as respostas são mais altas para *feedback* inesperado (Jessup, Busemeyer, & Brown, 2010). Tentativas com erros excessivamente altos (> 3DPs) foram consideradas desviantes e excluídas da análise.

Os participantes foram divididos em dois grupos com base na *performance* nos últimos três blocos sem *feedback*. Para avaliar a aprendizagem, foram utilizadas duas medidas: 1) **a magnitude do erro**: a média do erro absoluto nos últimos blocos sem *feedback*; e 2) **a variabilidade da resposta**: a média do desvio-padrão em cada um dos últimos três blocos sem *feedback*. Estas duas medidas foram normalizadas entre 0 e 1, combinadas e então os grupos foram divididos a partir da mediana. Os participantes com valores acima da mediana (50% superiores) foram considerados os maus aprendizes¹⁰ (alto erro e

¹⁰ Essa denominação foi utilizada por não ter sido encontrada uma boa tradução para o termo original “*low-learners*” e “*high-learners*”, uma vez que em português, a tradução literal “baixo e alto” não seria ideal com a palavra aprendizes. Ressalta-se que esses participantes classificados como “mau

alta variabilidade de resposta), enquanto que os com valores abaixo da média (50% inferiores) foram classificados como os bons aprendizes (baixo erro e baixa variabilidade). A ideia de incluir não apenas o erro absoluto, mas também a variabilidade do mesmo como critério para a divisão dos grupos é justificada pelo fato de que a consistência do desempenho é uma das principais marcas da aprendizagem (Reis et al., 2009; Wolpert, et al., 2011).

Além das diferenças na magnitude e variabilidade do erro, foram analisadas as diferenças entre as condições em relação ao quanto eficientemente os participantes conseguiram ajustar as suas estimativas com base no *feedback*. Para analisar a eficiência de ajuste média, o valor do erro absoluto (e) da tentativa atual (i) foi subtraído da tentativa anterior ($i - 1$), que serve como um indicador de melhora geral no desempenho na tentativa atual. Esse valor foi dividido pelo erro total obtido na tentativa anterior, de forma que a eficiência do ajuste é proporcional ao total de ajuste necessário. Desta forma, a eficiência do ajuste (AE) é definida como:

$$AE = \frac{e(i-1) - e(i)}{e(i-1)} = \frac{\Delta e}{e(i-1)}$$

Eq. 1

O propósito dessa medida é ter uma ideia de o quanto bem os ajustes foram realizados, na média, por cada grupo (bons e maus aprendizes) e durante os blocos com e sem *feedback*. Considerando que o *feedback* foi utilizado para ajustar a *performance*, espera-se que o AE seja mais alto nos blocos com *feedback* do que nos quais o mesmo não estava disponível.

aprendizes” não têm dificuldades de aprendizagem ou qualquer transtorno relacionado. A denominação significa, simplesmente, a sua *performance* ou a sua aprendizagem da tarefa específica utilizada nesse estudo foi inferior à apresentada pelo outro grupo, dos bons aprendizes.

3.2.3 Registro e análise do EEG

Sinais de EEG foram continuamente registrados utilizando 64 eletrodos ativos, amplificados pelo sistema BioSemi ActiveTwo^(R) (<http://www.biosemi.com>) e posicionados de acordo com o sistema 10-20 estendido por meio de toucas elásticas específicas, disponíveis no *site* do fornecedor. Foram utilizados dois eletrodos adicionais nos lobos auriculares e outros quatro eletrodos para registro de eletrooculograma (EOG) vertical (acima e abaixo do olho direito) e horizontal (eletrodos posicionados na têmpora direita e esquerda, ao lado dos olhos). Esses eletrodos foram utilizados visando monitorar os movimentos oculares e as piscadas, considerados fontes de artefatos no EEG. Os sinais foram registrados com uma taxa amostral de 512 Hz, filtrados na banda entre 0.16 – 100 Hz. A tarefa foi apresentada em um computador utilizando MATLAB (The MathWorks Inc., Natick, MA) com base no *toolbox Cogent 2000* (<http://www.vislab.ucl.ac.uk/cogent.php>). Os dados de EEG foram processados e analisados, utilizando as seguintes *toolboxes* em MATLAB: *EEGLAB* (Delorme & Makeig, 2004) para pré-processamento dos dados, incluindo a análise dos componentes independentes (ICA) e *Fieldtrip* (Oostenveld, Fries, Maris, & Schoffelen, 2011) para análise dos dados e comparações estatísticas.

3.2.3.1 Pré-processamento: Os dados de EEG foram re-referenciados para a média comum¹¹ (*common average reference*) para a análise dos ERPs e wavelets (oscilações), mas re-referenciados para a média aritmética dos lobos auriculares para a análise de conectividade¹². Foi utilizado um filtro¹³ passa alta de 0.5 Hz e depois, os dados foram divididos em épocas de -600 ms antes e 1000 ms após o *feedback*, ou seja, fechados com o *feedback*¹⁴. Os artefatos foram tratados de uma

¹¹ Nesse processo, o registro de cada eletrodo é subtraído da média geral de todos os eletrodos.

¹² Na análise de sincronização de fase, é importante que as referências não introduzam relações de fase inexistentes nos dados, o que pode acontecer quando se utiliza referência à média comum.

¹³ O filtro utilizado é chamado de *finite impulse response* (FIR), baseado na função *filtfilt()* do Matlab. Esse filtro é *zero-lag*, o que evita o atraso no sinal provocado por outros tipos de filtro. Ao longo deste estudo, todos os filtros utilizados com dados de EEG seguem este mesmo padrão.

¹⁴ O conceito de “fechado” com o *feedback* foi uma tradução para o termo “*feedback locked*” que significa que o *feedback* é o ponto zero da época. Da

maneira semi-automática: primeiramente, foi feita uma inspeção visual a fim de remover grandes artefatos musculares (alta frequência), seguido pela ICA utilizada para corrigir as piscadas. Após a correção das piscadas, as épocas contendo amplitudes superiores a 80 μV foram descartadas. A média do número de tentativas utilizadas na análise foi: 103 (bons aprendizes / DP=9.2) e 103 tentativas (maus aprendizes/ DP=11.3) para pequenos erros; e 101 (bons aprendizes/ DP=6.8) e 100 (maus aprendizes/ DP=15.1) para grandes erros.

3.2.3.2 *Análise dos ERPs*

Antes de obter a média dos ERPs, cada época foi filtrada com um filtro passa-baixa de 35 Hz. Para calcular os ERPs, foi feita a média das tentativas dentro da janela de tempo de - 200 ms antes e 1000 ms após o *feedback*. A média da amplitude na linha de base (- 200 ms até o *feedback*) foi subtraída do sinal (correção pela linha de base).

3.2.3.3 *Análise no domínio tempo-frequência*

O conteúdo espectral variante no tempo do EEG foi estimado por meio de representação de tempo e frequência baseada em *wavelet* do tipo *Morlet*. O sinal foi convolvido em cada tentativa utilizando *complex Morlet wavelet* para posteriormente ser calculada a média das tentativas para cada condição. Para as frequências baixas, de 4 a 35 Hz, *wavelets* com quatro ciclos foram utilizadas, enquanto que para frequências mais altas (> 35 Hz), sete ciclos foram aplicados. A janela de tempo analisada foi de - 600 ms a 1000 ms, fechado com o *feedback* (ponto zero). Para calcular a energia espectral relativa em cada frequência, foi realizada uma normalização do espectro, dividindo a energia em cada frequência pelo seu valor médio na linha de base, de -200 ms antes até o início do *feedback* (ponto zero).

3.2.3.4 *Análise de Connectividade*

Considerando que a atividade oscilatória de diferentes áreas cerebrais pode ser sincronizada (para uma revisão, ver: Pereda, Quiroga, & Bhattacharya, 2005), foi analisada a sincronização de fase nas frequências de 3 a 67 Hz, em passos de 4 Hz. A conectividade funcional

mesma forma, existem estudos com análises “*response locked*” que são fechadas com a resposta, ou seja, o ponto zero do tempo é a resposta.

foi analisada por meio da técnica introduzida recentemente denominada *Weighted Phase Lag Index (WPLI)*¹⁵, que é uma extensão do *Phase Lag Index (PLI)* (Stam, Nolte, & Daffertshofer, 2007), calculado ponderando o PLI de acordo com o Componente Imaginário da Coerência (*ImC – Imaginary Component of the Coherency*) (Nolte et al., 2004). Nolte et al. (2004) sugeriram o uso da ImC como uma medida de conectividade que é robusta à condução de volume¹⁶ e à influência de origens não correlacionadas, uma vez que as mesmas não são capazes de produzir uma ImC diferente de zero. No entanto, Stam et al. (2007) ressaltaram que a ImC é drasticamente afetada pela fase da coerência, que faz dela mais eficaz para detectar sincronizações com um atraso de fase de um quarto de ciclo, quebrando se dois sinais estão em fase ou em fase oposta. O PLI foi proposto como uma melhoria da ImC, mas é sensível à pequenas perturbações, ou descontinuidade, que provoca uma redução de sensibilidade em situações nas quais os efeitos são pequenos (Vinck, Oostenveld, van Wingerden, Battaglia, & Pennartz, 2011). A fim de melhorar este índice, o WPLI foi desenvolvido, ponderando as fases e atrasos pela magnitude do componente imaginário do espectro-cruzado (Vinck, et al., 2011). O WPLI demonstrou ser mais robusto à condução de volume e ao ruído do que ambas ImC e PLI, além de ser mais sensível à interações verdadeiras. Vinck et al. (2011) propuseram uma versão “desenviesada” (*debiased*) do WPLI, pois existe um viés positivo para ambas PLI e ImC, que também foram encontradas no WPLI. No presente estudo foi utilizada a versão desenviesada do WPLI (para maiores detalhes, consulte Vinck et al., 2011).

As tentativas foram divididas em segmentos de 250 ms (-250 até 1000 ms) e submetida à transformada discreta de Fourier. O WPLI foi calculado para cada um desses segmentos, de 3 a 67 Hz (resolução

¹⁵ A tradução para a técnica seria: **Índice Ponderado de Atraso de Fase**. Optou-se por não utilizar o termo traduzido por entender que se trata de um nome que não é bem representado pela sua tradução.

¹⁶ O problema da condução de volume diz respeito ao fato de que o cérebro é um bom condutor e, por essa razão, uma única fonte de atividade pode provocar uma correlação entre dois pontos diferentes no cérebro levando o pesquisador a acreditar que há uma conexão funcional entre essas duas áreas, quando na verdade, elas estão apenas refletindo a atividade de uma terceira fonte. Por essa razão, as medidas de sincronização de fase devem identificar esse problema. Como a parte imaginária da coerência contém um atraso temporal, ela é considerada uma medida insensível à condução de volume, uma vez que esse problema faria com que as correlações entre as fases fossem simultâneas (Nolte, et al., 2004).

de frequência: 4 Hz). Considerando que poucos estudos analisaram a conectividade relacionada ao *feedback* (Cavanagh, et al., 2009; Cavanagh, et al., 2010; Cohen, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011), a análise não foi restrita a nenhum par de eletrodos específico. Primeiramente, foram analisados os gráficos de distribuição do WPLI em função da frequência, que indicaram que a frequência beta (19 e 23 Hz) é a que apresenta maiores picos de conectividade. Após selecionar a frequência beta, foram inspecionados os valores da WPLI para todo o escalpo utilizando a figura “*heads-in-head*” (cabeças-na-cabeça), que foi desenvolvida e testada em outros artigos metodológicos relevantes sobre conectividade (Nolte, et al., 2004; Nolte & Muller, 2010; Nolte et al., 2008). Os códigos em MATLAB para essa figura foram fornecidos pelo primeiro autor dos referidos artigos. A figura “*heads-in-head*” é importante uma vez que ela permite a visualização simultânea das conexões entre todos os eletrodos da cabeça, conforme será explicado na sessão dos resultados. Foram essas visualizações que guiaram a escolha dos pares de eletrodos utilizados para as comparações estatísticas.

3.2.4 Análise Estatística

O teste não-paramétrico de permutação de *clusters* (Maris & Oostenveld, 2007) foi utilizado para comparar as respostas evocadas e induzidas ao *feedback* indicando erros pequenos e grandes. Essa abordagem estatística é ideal para tratar dados multidimensionais e tem demonstrado resultados robustos tanto em estudos com EEG (Lindsen, Jones, Shimojo, & Bhattacharya, 2010; Sheth, Sandkuhler, & Bhattacharya, 2009) quanto com MEG (Osipova et al., 2006; van Ede, de Lange, Jensen, & Maris, 2011). O teste não-paramétrico de permutação de *clusters* tem se mostrado tão robusto contra falso alarme (erro estatístico do tipo 1) quanto soluções mais conservadoras, como correção de *Bonferroni*, mas com uma maior sensibilidade para detectar efeitos reais (Maris & Oostenveld, 2007), considerando que as técnicas tradicionais diminuem a sensibilidade de uma análise exploratória realizada sem nenhuma hipótese definida em termos de tempo e espaço. Este teste estatístico está baseado no pressuposto de que se um efeito é estatisticamente significativo e biologicamente relevante, a significância estatística deve ser também encontrada em um dado número de dados vizinhos em todas as dimensões analisadas, como tempo, espaço (eletrodos) e frequência, sendo esses vizinhos denominados *clusters*. Uma única diferença significativa em um ponto do dado específico não

resultaria em um *cluster* significativo, mesmo que o mesmo seja altamente significativo ($p < .00001$).

O procedimento envolve encontrar *clusters* ou agrupamentos e então calcular a estatística destes por meio dos seguintes passos: 1) comparar as condições por meio de teste t (pareado ou independente) para cada uma das amostras na estrutura de dados multidimensional; 2) marcar as diferenças significativas utilizando um ponto de corte (por exemplo, $p < .05$); 3) construir os *clusters* conectados que: (1) ultrapassem o ponto de corte e (2) tenham o mesmo sinal; 4) calcular a estatística no nível do *cluster* extraíndo a soma dos testes estatísticos (valores de t) do mesmo; 5) usar a estatística com maior valor no nível do *cluster*; 6) avaliar esse máximo em relação à distribuição da permutação (Maris & Oostenveld, 2007). Esse último passo, onde a estatística do *cluster* é definida contra a sua própria distribuição é o que faz esse teste não paramétrico, uma vez que o teste de hipótese se baseia em uma distribuição fundamentada nos próprios dados (comparados aleatoriamente a partir de cada permutação). No presente estudo, a distribuição da permutação foi derivada dos valores estatísticos de testes-t pareados com base em 500 permutações aleatórias¹⁷. O ponto de corte para a inclusão do *cluster* foi definido como 0.05. Para as comparações envolvendo os ERPs, o teste de permutação de *cluster* foi conduzido considerando as dimensões temporais (pontos de tempo) e espaciais (eletrodos). Para as comparações envolvendo as representações de tempo-frequência, os *clusters* foram calculados com base nas dimensões espaciais, temporais e espectrais (frequências). Eletrodos com uma distância menor que 5 cm foram considerados vizinhos, sendo que 4.2 foi a média de vizinhos por eletrodo.

Além do teste não paramétrico de permutação de *cluster*, análises de variância (ANOVA) tradicionais foram utilizadas visando testar as diferenças entre grupos, bem como os efeitos interativos entre respostas aos erros pequenos e grandes e o grupo (bons e maus aprendizes). Quando as variáveis dependentes pertencendo ao mesmo grupo de análises mostraram correlações moderadas, utilizou-se análise

¹⁷ Em cada permutação, dados das duas condições são misturados, para que os testes sejam feitos sorteando cada condição, de forma que a distribuição de permutação é a distribuição dos valores estatísticos dos dados ao serem comparados aleatoriamente. Se o efeito é significativo, o resultado da comparação com os dados nas condições reais, corretas, será significativamente diferente dos obtidos aleatoriamente, ou seja, cairá fora da curva da distribuição de permutação.

multivariada de variância (MANOVA). Foram utilizadas análises de *design* misto 2 x 2 ANOVA com a **magnitude do feedback** (erros grandes e pequenos) como variável intraparticipantes e o **grupo de aprendizagem** (bons e maus aprendizes) como a variável entreparticipantes, ou então uma 2 x 2 MANOVA com as mesmas variáveis independentes. A média da amplitude (ERPs) ou energia relativa (TFRs) de um *cluster* significativo de eletrodos, frequências e janelas de tempo foi utilizada como variáveis dependentes. Testes t independentes, bem como testes t-pareados, foram também utilizados para investigar os efeitos simples. As comparações estatísticas para a conectividade foram conduzidas utilizando uma 2 x 5 x 2 ANOVA com *design* misto, tendo o **grupo de aprendizagem** como o fator entreparticipantes e a **magnitude do feedback** e o **tempo** (-250-0/0-250/250-500/500-750/750-1000ms) como os fatores intraparticipantes, ou seja, as medidas repetidas. Neste caso, os graus de liberdade foram ajustados quando a esfericidade foi violada. Essas análises estatísticas foram realizadas utilizando o *Statistical Package for the Social Sciences* (Versão 18.0, SPSS, Inc., Chicago, IL).

A fim de testar as correlações entre os ERPs e TFRs com o desempenho, foi utilizada a correlação linear de Pearson. As correlações foram testadas não apenas para janelas de tempo específicas, mas na época inteira, correlacionando a amplitude (para ERPs) ou a energia espectral relativa (para TFRs) com a média do erro absoluto nos três últimos blocos sem *feedback* e com *feedback*, separadamente. O interesse principal foi analisar os blocos sem *feedback* pois presume-se que quanto melhor a *performance* sem *feedback*, melhor a representação interna do intervalo de tempo, desenvolvida durante as tentativas com *feedback* (das quais a atividade cerebral foi extraída). Durante os blocos com *feedback*, o participante está constantemente ajustando suas estimações, ou seja, a representação interna da habilidade não é a principal referência para o desempenho em tais tentativas. Foram apenas descritas as correlações que permaneceram significativas por ao menos 50 ms, visando evitar problemas com comparações múltiplas.

3.3 RESULTADOS

Aprender a estimar um intervalo fixo de tempo pode ser caracterizado pela redução da magnitude do erro, que é a diferença absoluta entre os intervalos produzidos e o alvo (1700 ms). Considerando a aprendizagem como a consolidação de uma representação interna desse intervalo, o desempenho nos blocos sem *feedback* são relevantes para avaliar se os participantes foram capazes de manter a *performance* sem a utilização de informação externa. Na figura 1, pode-se visualizar o desempenho dos bons e maus aprendizes em relação à magnitude do erro absoluto (Figura 1a), à variabilidade de resposta (Figura 1b), e à eficiência de ajuste (Figura 1c) nos 12 blocos da tarefa, na mesma ordem em que foram executados. Entre blocos, os bons aprendizes apresentaram menor erro e variabilidade e mais alta eficiência de ajuste do que os maus aprendizes. Fica evidente na figura 1 que os maus aprendizes mostraram as maiores reduções no desempenho durante os blocos sem *feedback*, o que sugere que estes apresentaram uma baixa retenção da habilidade.

A fim de analisar como a tarefa foi aprendida pelos dois grupos, foram comparadas a primeira e segunda metade da tarefa utilizando uma 2x2x2 MANOVA com *design* misto com as variáveis *feedback* (com vs. sem *feedback*) e **estágio da tarefa** (primeira vs. segunda metade da tarefa) como fatores intra-participantes e com o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como o fator entre sujeitos. O erro absoluto e a variabilidade de resposta (DP) foram incluídos como variáveis dependentes no modelo. Os resultados indicaram que o desempenho foi superior para os bons em relação aos maus aprendizes ($F(2, 29) = 28.526, p < .001, \eta^2 = .66$). Foi encontrado um efeito significativo do **estágio da tarefa** ($F(2, 29) = 19.82, p < .001, \eta^2 = .58$), que indicou que os participantes melhoraram significativamente o desempenho da primeira para a segunda metade da tarefa. Além disso, houve um efeito significativo do *feedback* ($F(2, 29) = 28.14, p < .001, \eta^2 = .66$), indicando que o desempenho nos blocos com *feedback* foi significativamente superior em relação aos blocos sem o mesmo. Foi também verificada uma interação entre **grupo de aprendizagem** e *feedback* ($F(2, 29) = 4.28, p = .023, \eta^2 = .23$), uma vez que a diferença no desempenho entre os blocos com e sem *feedback* foi maior nos maus aprendizes. Por fim, foi verificada uma interação significativa entre *feedback* e **estágio da tarefa** ($F(2, 29) = 17.06, p < .001, \eta^2 = .54$), pois a diferença entre os blocos com e sem *feedback* foi menor na segunda metade da tarefa.

Para analisar as mesmas diferenças em termos de eficiência de ajuste (AE), foi utilizada uma 2x2x2 ANOVA com *design* misto e as mesmas variáveis independentes descritas no parágrafo anterior, mas com a AE como variável dependente. Os bons aprendizes apresentaram uma maior eficiência do que os maus aprendizes ($F(1, 30) = 64.90, p < .001, \eta^2 = .68$), eficiência esta que aumentou da primeira para a segunda metade da tarefa ($F(1, 30) = 10.31, p < .001, \eta^2 = .26$), indicando que os participantes não apenas dimiuíram o seu erro, mas também se tornaram mais eficientes para realizar ajustes conforme o feedback. Foi encontrado um efeito significativo para o **feedback** ($F(1, 30) = 32.14, p < .003, \eta^2 = .52$), considerando que a eficiência de ajuste foi superior nos blocos com a presença deste. Houve também uma interação entre **grupo de aprendizagem** e **feedback** ($F(1, 30) = 4.21, p = .049, \eta^2 = .12$), considerando que os bons aprendizes apresentaram uma menor diferença na eficiência do ajuste entre os blocos com e sem feedback. A eficiência do ajuste foi mais alta nos bons aprendizes desde o primeiro bloco, no qual nenhum feedback estava disponível (Figura 1c). Ademais, os bons aprendizes mostraram um aumento progressivo na eficiência de ajuste ao longo da tarefa, reduzindo nos blocos sem *feedback*.

Juntos, esses resultados indicaram que a principal diferença entre os bons e maus aprendizes está relacionada com o desempenho em ambos os tipos de blocos (com e sem *feedback*), evidenciando que os bons aprendizes não são somente melhores no desempenho (erro e variabilidade reduzidos), mas também, melhores na retenção da representação interna do intervalo. Além disso, os bons aprendizes apresentaram um aumento progressivo na eficiência de ajuste, especialmente nas tentativas com *feedback*, enquanto que os maus aprendizes não melhoraram ao longo da tarefa.

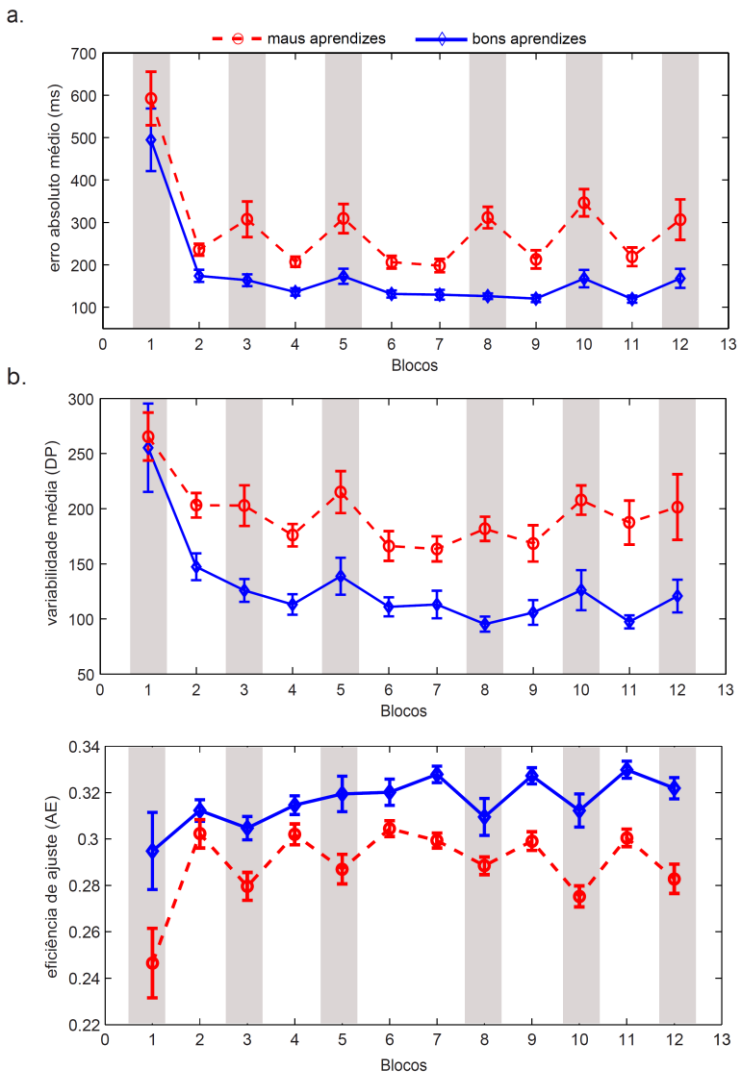


Figura 1. Desempenho na tarefa de produção temporal

Desempenho dos bons (linhas azuis) e maus-aprendizes (linhas vermelhas) durante os blocos com (cinza) e sem-feedback (branco) medido por meio da média do erro absoluto (a), média da variabilidade de resposta (b), e eficiência de ajuste (c).

3.3.2 Análise dos ERPs

Os ERPs foram comparados entre dois tipos de *feedback*: com pequenos e grandes erros (para maiores detalhes, consultar o método) por meio do teste não paramétrico de permutação de *cluster*. Foi encontrado um *cluster* negativo estatisticamente significativo ($p < .001$), que iniciou aproximadamente 200 ms após a apresentação do *feedback* com a duração de 600 ms. A topografia do *cluster* entre 200-300 ms assemelha-se àquela tipicamente apresentada pelo FRN (Fig.2a), sendo mais negativa na área média-frontal (FCz) após o *feedback* indicando erros grandes em relação aos pequenos. A partir de 275 ms o *cluster* apresenta uma topografia parietal, movendo-se progressivamente para o lobo parietal esquerdo (350-425 ms), ao central esquerdo (425-500 ms) e terminando nas regiões fronto-centrais esquerdas (500-575 ms).

Em seguida, a mesma comparação foi feita separadamente para cada grupo (bons e maus aprendizes). Ambos os grupos apresentaram um *cluster* negativo significativo ($p < .001$), com topografia inicial semelhante ao FRN (200-300 ms), um *cluster* parietal (350-425 ms), mas que foi mais alto nos maus aprendizes, e que gradualmente moveu-se para as regiões fronto-centrais, mas apenas, significativamente, no grupo dos bons aprendizes. Com a finalidade de demonstrar o curso temporal dos ERP nessas regiões de interesse indicadas nos *clusters*, foram incluídos na figura 2 (Figura 2b) os ERPs médios de cada grupo de eletrodos para as janelas de tempo indicadas relevantes.

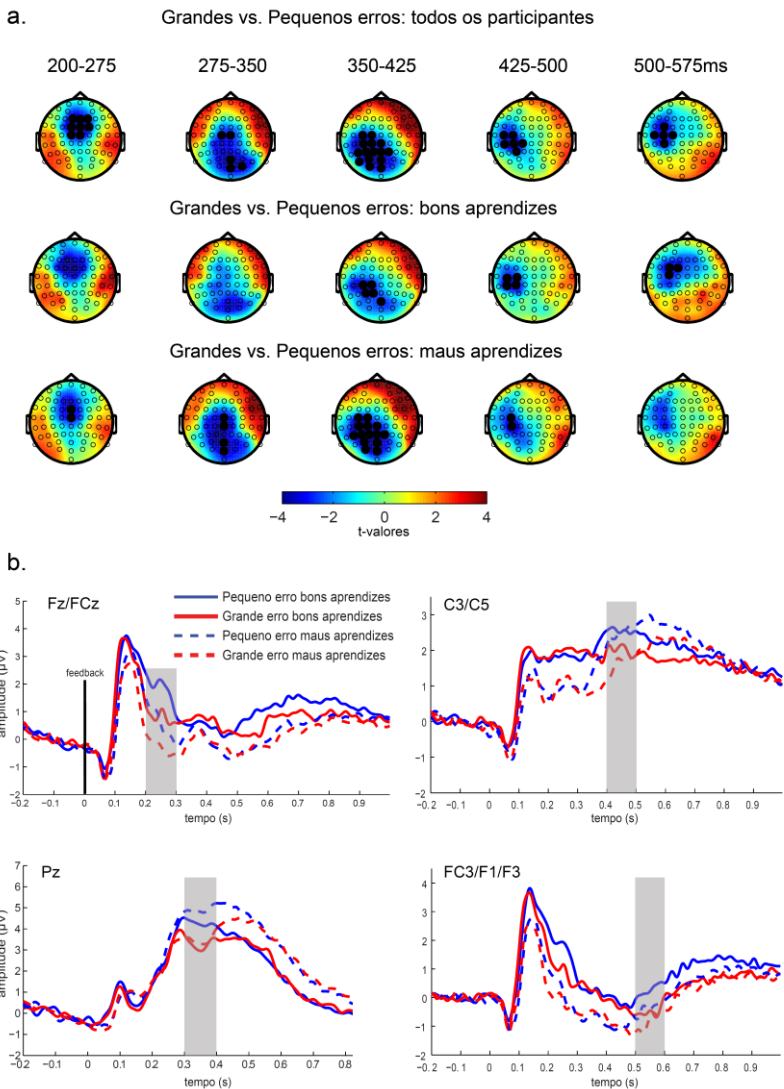


Figura 2. Cluster dos ERPs erros grandes vs. pequenos

Cluster negativo para a comparação entre as respostas ao feedback com erros grande se pequenos: para todos os participantes (primeira linha), seguido pelos grupos separados: os bons aprendizes (segunda linha) e os maus aprendizes (terceira linha). Os eletrodos marcados em preto são significativos por toda a janela de tempo indicada. (b) Os ERPs médios para cada região de interesse (eletrodos indicados) acompanhados das respectivas janelas de tempo (em cinza).

A média da amplitude nas janelas de tempo destacadas em cinza na figura 2b para os eletrodos também explicitados na mesma figura foram comparados separadamente utilizando uma 2x2 ANOVA de *design* misto, sendo a **magnitude do feedback** (erros grandes vs. pequenos) o fator intra-participantes e o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) o fator entre-participantes. Em ambos os grupos, o FRN foi significativamente maior (mais negativo) após *feedback* indicando erros grandes ($F(1, 30) = 36.91, p < .001, \eta^2 = .552$). Não foi encontrado efeito significativo para **grupo de aprendizagem** ou interações entre essas variáveis ($F < 1.5, p > .25$). Os mesmos resultados estatísticos foram encontrados para o componente semelhante ao P300, sendo o mesmo mais alto após *feedback* indicando erro pequeno ($F(1, 30) = 24.84, p < .001, \eta^2 = .45$). A amplitude nos eletrodos contralaterais centrais (C3-C5) foi mais alta seguida de erros pequenos do que grandes ($F(1, 30) = 19.97, p < .001, \eta^2 = .40$), mas também não houveram efeitos para **grupo** nem tampouco interações ($F < 1, p > .3$). Por fim, a amplitude nos eletrodos nas regiões frontais esquerdas (FC3, F1, F3) foi maior seguido de *feedback* indicando pequeno erro ($F(1, 30) = 13.294, p = .002$).

Foram correlacionadas as amplitudes do ERP em cada grupo de eletrodos (indicados na Fig. 2b) com o desempenho médio na segunda metade da tarefa, entre os blocos com e sem *feedback*, separadamente. O interesse foi investigar se a atividade em um dado conjunto de eletrodos estava correlacionado com o desempenho na tarefa quando os participantes não tinham *feedback* disponível, ou seja, identificar quais padrões podem ter contribuído para a consolidação da *performance*. Ao invés de testar uma janela de tempo específica, a correlação da amplitude com a *performance* foi testada em todos os pontos de tempo da série, o que permitiu averiguar quando as correlações se tornaram significativas e em quais condições. Além disso, essas correlações foram realizadas também separadamente para bons e maus aprendizes.

A amplitude nos eletrodos relacionados ao FRN (FCz e Fz) foram correlacionados com o desempenho apenas nos blocos com *feedback* (Fig. 3a), sendo que quanto maior o erro absoluto nos últimos três blocos com *feedback*, maior o FRN (mais negativo), o que é esperado considerando que o FRN é mais alto em resposta a maiores erros. Essa correlação foi sustentada apenas para *feedback* indicando erro grande na janela de tempo precedente ao FRN. Não houve correlação sustentada entre a amplitude nesses eletrodos e o desempenho nos blocos sem *feedback*, o que pode indicar que o FRN

pode ser mais relevante para o monitoramento da *performance* do que com a consolidação da habilidade.

Por outro lado, a amplitude do ERP nas regiões centrais esquerdas (C3 e C5) foi correlacionado com o desempenho apenas nos blocos sem *feedback* (Fig. 3b). Interessantemente, as correlações foram significativas em momentos diferentes e inversas para bons e maus aprendizes. No grupo dos maus aprendizes, quanto maior amplitude nessas áreas motoras, melhor o desempenho nas tentativas sem *feedback*. A janela de tempo é semelhante a do FRN, especialmente para erros grandes. No grupo dos bons aprendizes, uma correlação positiva foi observada em um momento posterior (500-750 ms), que indicou que quanto menor a amplitude nessa região, melhor a representação interna foi desenvolvida. Essa correlação foi consistente apenas para *feedback* indicando erros pequenos.

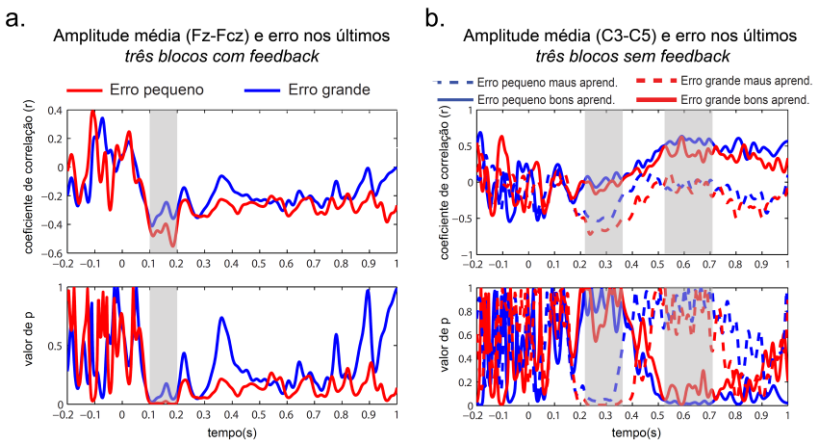


Figura 3. Correlações entre ERPs e desempenho.

(a) Correlação entre o erro absoluto médio nos três últimos blocos com *feedback* e a amplitude média do ERP nos eletrodos FCz e Fz após *feedback* indicando erros grandes (linha vermelha) e pequenos (linha azul). No gráfico inferior estão os valores de p para cada teste de correlação indicado na figura superior (as áreas destacadas em cinza indicam a zona de significância); (b) Correlação entre o erro absoluto médio nos três últimos blocos sem *feedback* e a amplitude média dos ERPs nos eletrodos C3 e C5 após *feedback* indicando erros grandes (linhas vermelhas) e pequenos (linhas azuis) para bons (linhas sólidas) e maus aprendizes (linhas pontilhadas). Na figura inferior, os valores de p para os testes da figura superior.

3.3.3 Análise de tempo-frequência

A decomposição de tempo-frequência baseada em *wavelet* foi aplicada no EEG para cada tentativa individual, para posterior média entre eletrodos e participantes. As diferenças no processamento de *feedback* indicando erros grandes e pequenos foram analisadas separadamente para cada grupo (bons e maus aprendizes). Os resultados indicaram a presença de um *cluster* positivo tanto para os bons ($p < .0001$) quanto para os maus aprendizes ($p = .0040$). Nenhum *cluster* negativo significativo foi encontrado.

As diferenças nas representações de tempo e frequência das comparações entre erros grandes e pequenos (testes-t pareados) para ambos os grupos são demonstradas na figura 4. O grupo dos bons aprendizes apresentou as maiores diferenças na energia espectral relativa na frequência beta após aproximadamente 400 ms após o *feedback*, enquanto que o grupo dos maus aprendizes apresentou as maiores diferenças em uma faixa de frequência mais baixa, aproximadamente entre 10-13 Hz. Em relação ao tamanho do *cluster* (Figura 4b), os maus aprendizes mostraram um alto número de eletrodos significantes na faixa de alfa que atingiu o pico entre 700 e 800 ms (linha pontilhada vermelha), enquanto que os bons aprendizes apresentaram um *cluster* mais localizado, aproximadamente 400 ms após o *feedback*, na frequência beta. Estes resultados sugerem que as diferenças entre o processamento de erros grandes e pequenos estão relacionados a uma ampla desincronização para os maus aprendizes, enquanto que para os bons aprendizes, essa diferença é mais localizada em regiões fronto-centrais do hemisfério esquerdo em beta (anterior – 400 ms) e alfa (posterior – 600 ms). As topografias dessas diferenças podem ser observadas na figura 4c.

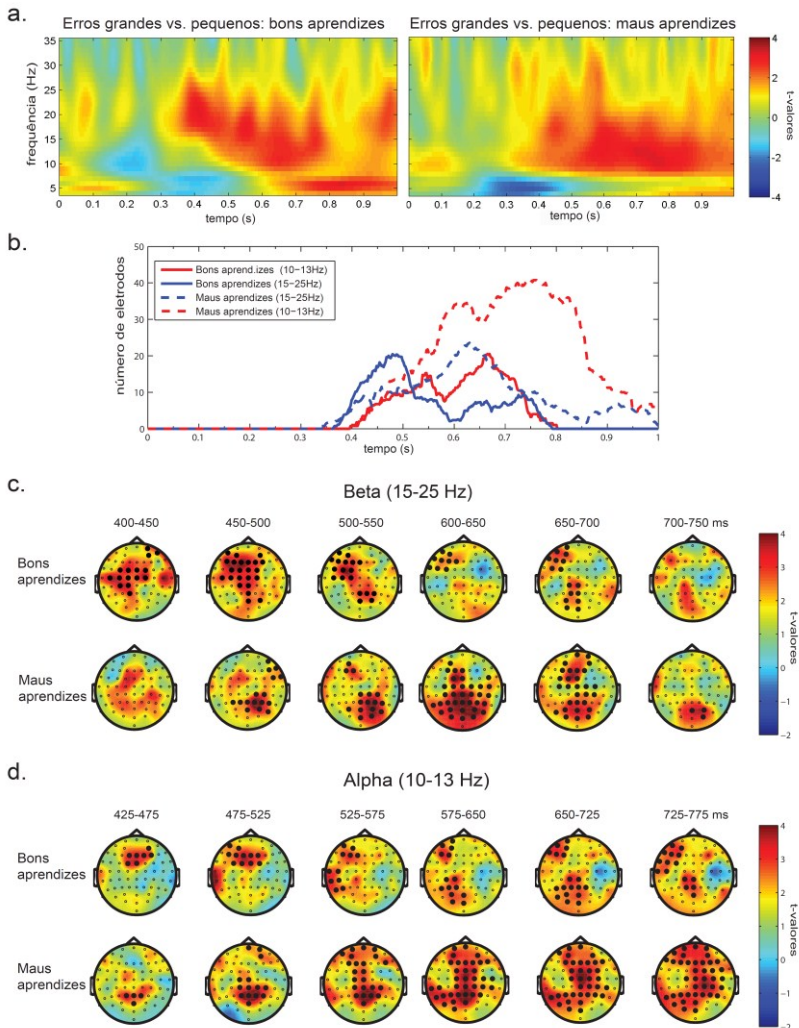


Figura 4. Clusters das oscilações: erros grandes vs. pequenos

(a) Diferenças espectrais para processamento de erros grandes e pequenos em bons e maus aprendizes; (b) Tamanho do *cluster* positivo ao longo do tempo após o *feedback*, medido pelo número de eletrodos significativos em cada ponto no tempo nas frequências alfa (vermelho) e beta (azul) em bons (linha sólida) e maus aprendizes (linha pontilhada); (c) Topografia do *cluster* positivo em beta para bons e maus aprendizes; (d) Topografia do *cluster* em alfa para bons e maus aprendizes. As janelas de tempo para a topografia foram escolhidas com base no comportamento do *cluster* demonstrado em “b”.

A análise do curso temporal da energia relativa dos eletrodos do *cluster* indicam que os bons aprendizes demonstraram uma maior desincronização nas faixas de beta e alfa após o *feedback* indicando erros pequenos do que os maus aprendizes (gráficos de linha, figura 5). Foram encontradas diferenças maiores e mais significativas nos eletrodos do hemisfério esquerdo tanto em beta (eletrodos centrais esquerdo – Figura 5a) quanto em alfa (eletrodos na área média-frontal – Figura 5c). Essa diferença, entre bons e maus aprendizes, iniciou antes do que a diferença entre erros grandes e pequenos (exceto em beta – Figura 5a), aproximadamente aos 150 ms. Nos eletrodos da área média-frontal (Fig. 5c – primeiro topoplot), a diferença aumenta aproximadamente aos 200 ms e é sustentada por cerca de 400 ms. Nos mapas topográficos (*topoplots*) (lado direito da figura 5), é visível que a maior redução na energia relativa espectral para erros pequenos, sendo essa desincronização maior no grupo dos bons aprendizes. Além disso, os bons aprendizes apresentaram uma maior desincronização nas áreas fronto-centrais esquerdas após erros pequenos, sendo essa diferença (entre erros pequenos e grandes) menor no grupo dos maus aprendizes. Para alfa, uma sincronização bem definida sobre as áreas centrais ou motoras, especialmente ipsilaterais (mesmo lado da mão de resposta – direito), foi verificado junto à uma desincronização de todas as outras áreas. Em resposta ao *feedback* com erros pequenos, a assimetria nas áreas sensoriomotoras parece ser maior do que em resposta à erros grandes. Os maus aprendizes não apresentaram um padrão bem definido nas áreas centrais, mas sim uma ampla e espalhada sincronização nas áreas frontais, especialmente centrais, que foi maior para o *feedback* indicando erros grandes.

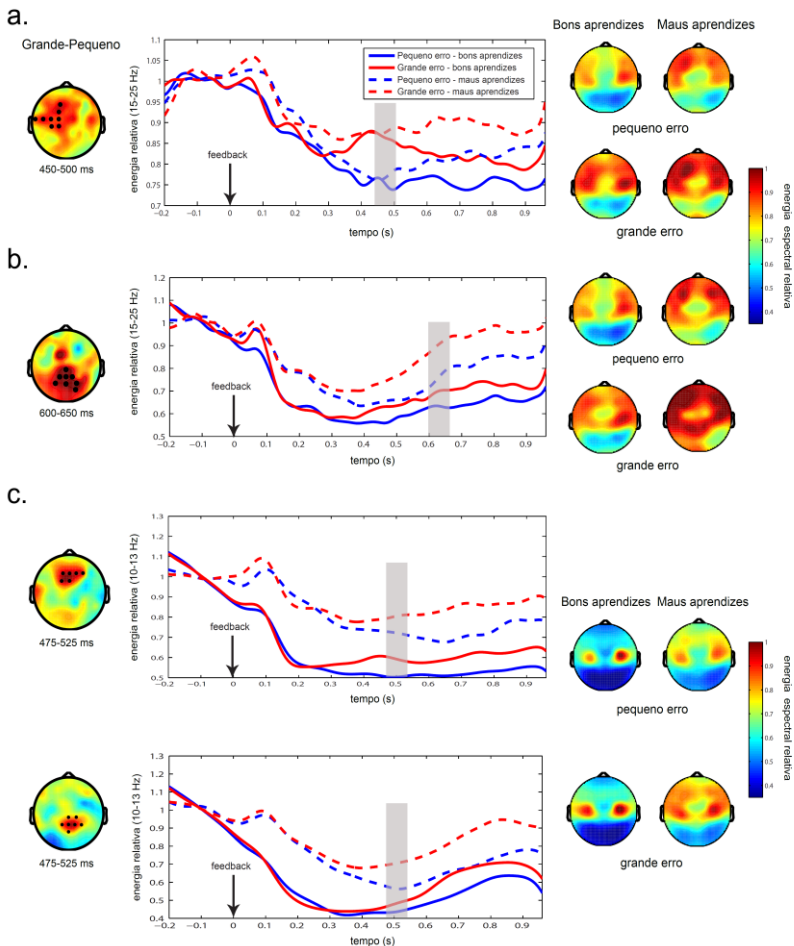


Figura 5. Curso temporal dos clusters

(a) Trajetória temporal da energia relativa de beta (15-25 Hz) nos sensores mais significantes (destaque em preto) do *cluster* dos bons aprendizes. Os mapas topográficos ao lado direito mostram a topografia da energia relativa na frequência indicada na janela de tempo destacada em cinza no gráfico de linha. As outras subfiguras (b e c) mostram a mesma informação, mas para eletrodos significantes no *cluster* dos maus aprendizes (b e segunda figura de c) e bons aprendizes (primeira figura de c). Os mapas topográficos de c são apenas quatro, pois a janela de tempo e a frequência selecionadas são as mesmas.

Considerando que os padrões de lateralização sensoriomotores têm sido observados em estudos sobre imaginação motora, ou mentalização de movimentos (Neuper, Schlogl, & Pfurtscheller, 1999; Pfurtscheller, Neuper, Flotzinger, & Pegenzer, 1997; Pfurtscheller, Neuper, Ramoser, & Muller-Gerking, 1999) e que a imaginação motora é relevante para a aprendizagem (Olsson, Jonsson, Larsson, & Nyberg, 2008), levantou-se a hipótese de que o *feedback* indicando erros pequenos poderia induzir uma reprodução mental da tentativa. Para testar tal hipótese, o índice de lateralização (*lateralization index – LI*), calculado como a energia relativa de alfa/beta no hemisfério ipsilateral (direito – C4) menos a mesma medida no hemisfério oposto (esquerdo – C3). O LI foi calculado para as duas faixas de frequência, alfa e beta.

Os resultados demonstraram que os bons aprendizes apresentaram um aumento no LI após o *feedback* indicando pequenos erros, enquanto que os maus aprendizes apresentaram o resultado contrário, com maior LI para erros grandes, tanto para alfa quanto para beta LI. Em resposta ao *feedback* indicando erros pequenos, os bons aprendizes apresentaram o pico da LI em alfa entre 500 e 800 ms, enquanto que após grandes erros, eles reduziram o LI entre 700 e 900 ms após o *feedback* (Figura 6). A média do LI em alfa e beta nessas janelas de tempo principais (500-600 ms e 800-900 ms) foi submetida à uma 2x2 ANOVA com a **magnitude do feedback** (erros pequenos vs. grandes) como fator intraparticipante e o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como fator entreparticipantes. Foi encontrada uma interação significativa entre **magnitude do feedback** e **grupo de aprendizagem** para LI em alfa entre 800 e 900 ms ($F(1, 30) = 6.68, p = .015, \eta^2 = .18$). Para LI em beta, a interação foi na janela de tempo anterior (500-600 ms) ($F(1, 30) = 5.32, p = .028$). Em ambos os casos, a interação se deve ao fato de que houve os bons aprendizes apresentaram um maior LI em resposta aos erros pequenos, enquanto que os maus aprendizes demonstraram a tendência oposta, ou seja, maior LI em resposta a *feedback* indicando erros grandes.

Foram também analisadas as correlações entre a energia relativa de beta e alfa nos eletrodos do *cluster* (Figura 5a, b e c) com o desempenho nos três últimos blocos com e sem *feedback*. Não foram encontradas correlações consistentes na frequência alfa, nem com os LIs em alfa e beta. No entanto, a média de beta nos eletrodos fronto-centrais esquerdos (Figura 5a) mostraram correlações consistentes com o desempenho nos blocos sem *feedback*, tanto em resposta a erros grandes como pequenos, mas apenas no grupo dos bons aprendizes (Figura 6c). Essa correlação se torna significante cerca de 100 ms após o *feedback* e

permanece marginalmente significativa até o final da época (mais estável e significativa entre 300 e 500 ms), indicando que maior energia relativa de beta, maior o erro nos blocos finais sem *feedback*, ou seja, quanto mais beta dessincronizada nas áreas fronto-centrais esquerdas, melhor a consolidação do intervalo de tempo treinado.

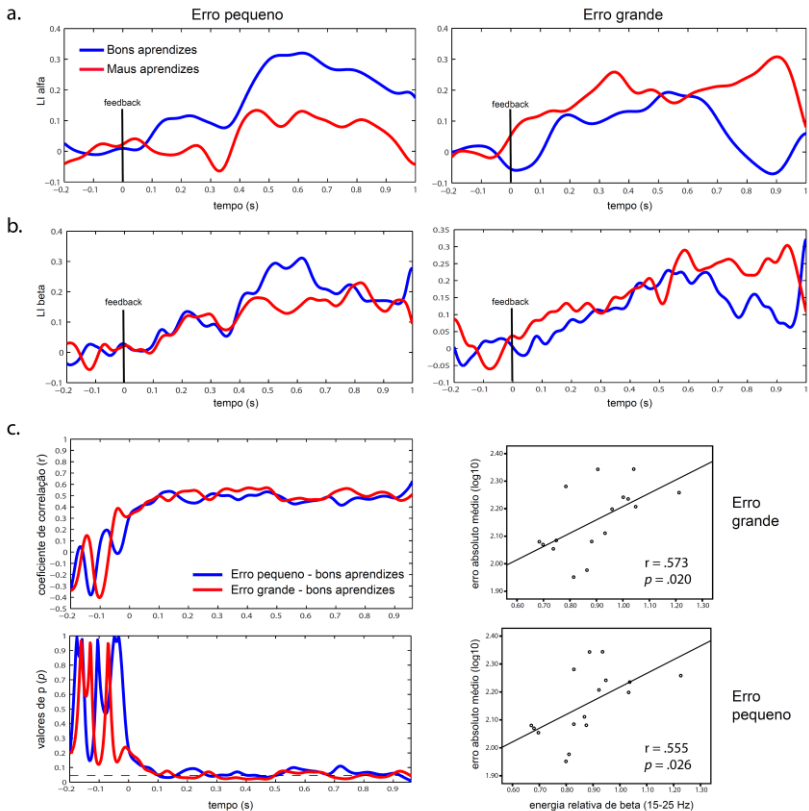


Figura 6. LI após o *feedback* e correlações com o desempenho.

Evolução temporal do LI em alfa (a) e beta (b) após o *feedback* indicando erros pequenos (lado esquerdo) e grandes (lado direito) de bons e maus aprendizes; (c) Evolução temporal das correlações entre a energia relativa de beta nos eletrodos do *cluster* destacados na figura 5a e o erro absoluto médio nos três últimos blocos sem *feedback*. O primeiro gráfico de c demonstra os coeficientes de correlação, com os respectivos valores de significância estatística indicados abaixo. Ao lado direito, os gráficos mostram a distribuição da correlação do grupo dos bons aprendizes.

Na frequência gama (35-70 Hz) não foram encontrados *clusters* estatisticamente significativos ao nível dos eletrodos para a comparação entre as respostas ao *feedback* indicando erros pequenos e grandes. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de que gama é mais localizado no espaço e no tempo (Tallon-Baudry, Bertrand, Henaff, Isnard, & Fischer, 2005), o que pode ter dificultado encontrar eletrodos vizinhos significativos, pois o efeito fica restrito a uma área menor, como em um ou dois eletrodos. A partir da análise da topografia das diferenças (Figura 7a), testou-se um efeito específico aparente no eletrodo central esquerdo na frequência gama, especificamente entre 35 e 50 Hz. Gama aumentou no eletrodo C5, frequentemente associado com a área motora primária esquerda (embora o EEG não tenha resolução espacial suficiente para tal afirmação), mas esse aumento foi específico: entre 350 e 650 ms e somente após o *feedback* indicando erros pequenos e no grupo dos bons aprendizes. Essa interação foi testada utilizando uma 2x2 ANOVA com desenho misto tendo o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como fator entreparticipantes e a **magnitude do feedback** (erro pequeno vs. erro grande) como fator intraparticipantes. Como variável dependente, utilizou-se a média da energia relativa de gama (35-50 Hz) entre 350 a 650 ms após o *feedback*. Embora não tenha sido encontrado efeitos significativos para a **magnitude do feedback** ($F(1, 30) = 0.855, p = .362$) e para o **grupo de feedback** ($F(1, 30) = 1.38, p = .250$), foi verificada uma interação estatisticamente significativa entre tais variáveis ($F(1, 30) = 8.100, p = .008, \eta^2 = .21$). Testes *t* pareados indicaram que a energia relativa de gama no eletrodo C5 foi significativamente mais alta para erros pequenos do que para erros grandes no grupo dos bons aprendizes ($t(15) = 2.420, p = .029$). Para os maus aprendizes, a energia relativa de gama foi maior para erros grandes, mas a diferença não foi estatisticamente significativa ($t(15) = -1.532, p = .146$).

Foi encontrada uma correlação significativa entre a energia relativa de gama em C5 e a média do erro absoluto nos três últimos blocos sem *feedback*, mas não com o desempenho nos respectivos blocos com *feedback*. A correlação indicou que quanto maior a energia relativa de gama em C5 em resposta ao *feedback* indicando erros pequenos, menor o erro absoluto nos blocos finais sem *feedback* ($r = -.420, p = .017$), sugerindo que a atividade no córtex motor pode ser importante para a consolidação da habilidade. Além disso, a eficiência do ajuste nos três últimos blocos sem *feedback* foi correlacionado com a energia relativa de gama em resposta ao *feedback* de erro pequeno ($r =$

.569, $p = .001$). Interessantemente, essas correlações foram válidas para ambos os grupos, mas apenas após *feedback* de erros pequenos, uma vez que a energia relativa de gama em C5 após *feedback* de erros grandes não apresentou correlação com nenhuma medida de desempenho, incluindo com o erro absoluto médio ($r = .136$, $p = .458$) e a eficiência de ajuste ($r = -.112$, $p = .541$).

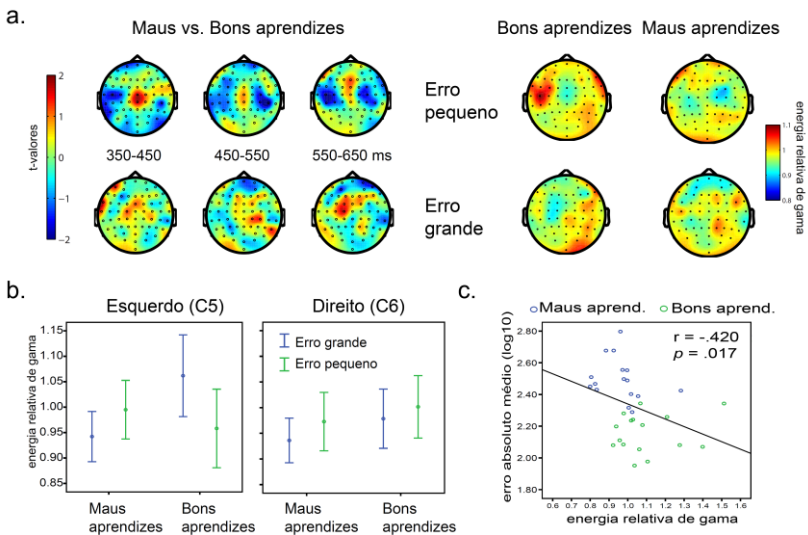


Figura 7. Resultados na frequência gama

Os mapas topográficos no lado esquerdo mostram as diferenças (valores da estatística t) entre bons e maus aprendizes na energia relativa de gama entre 350 e 650 ms após *feedback* indicando erros pequenos (primeira fileira) e grandes (segunda fileira). Áreas em azul indicam maior energia relativa de gama para bons em relação a maus aprendizes. No lado direito, os mapas topográficos demonstram a energia relativa de gama média para ambos os *feedbacks* em ambos os grupos, entre 350 e 650 ms. (b) Média e intervalos de confiança (95%) da energia relativa de gama entre 350 e 650 ms após *feedback* indicando erro pequeno (azul) e grande (verde) nos eletrodos centrais de cada hemisfério. (c) Correlação entre a energia relativa de gama entre 350 e 650 ms após *feedback* indicando erro pequeno e a média do erro absoluto nos três últimos blocos sem *feedback*.

3.4 Análise de Conectividade

Por meio do WPLI, foi encontrado um aumento na sincronização de fase na frequência beta (19-23Hz) entre 0 a 250 ms após o *feedback* em relação à linha de base, somente no grupo dos bons aprendizes. Os maus aprendizes não apresentaram nenhuma sincronização de fase específica em resposta ao *feedback*. As conexões apresentadas na figura *heads-in-head*¹⁸ indicam que os eletrodos da área média-frontal, principalmente FCz, sincronizaram com os da área central esquerda, principalmente C3 e C5 (Figura 8a). Utilizando FCz como referência, é possível visualizar a distribuição topográfica das conexões entre FCz e as demais áreas do escalpo (Figura 8b), que demonstra que o eletrodo C3 é o que mais sincroniza com FCz para os bons aprendizes.

¹⁸ Essa figura demonstra a força da sincronização entre o sinal de EEG lido em cada canal em relação a todos os demais. Por exemplo, para ver como que FCz sincronizou com as demais áreas, deve-se localizar o eletrodo FCz (quarto eletrodo de cima para baixo, na linha central) e ver a distribuição das cores no minimapa topográfico. Dessa forma, é possível visualizar em uma única figura, todas as conexões encontradas. Por exemplo, ao observar os eletrodos centrais do hemisfério esquerdo, é possível ver que os mesmos se conectam com as áreas médias (linha central) e também com as áreas sensoriais (posterior esquerda).

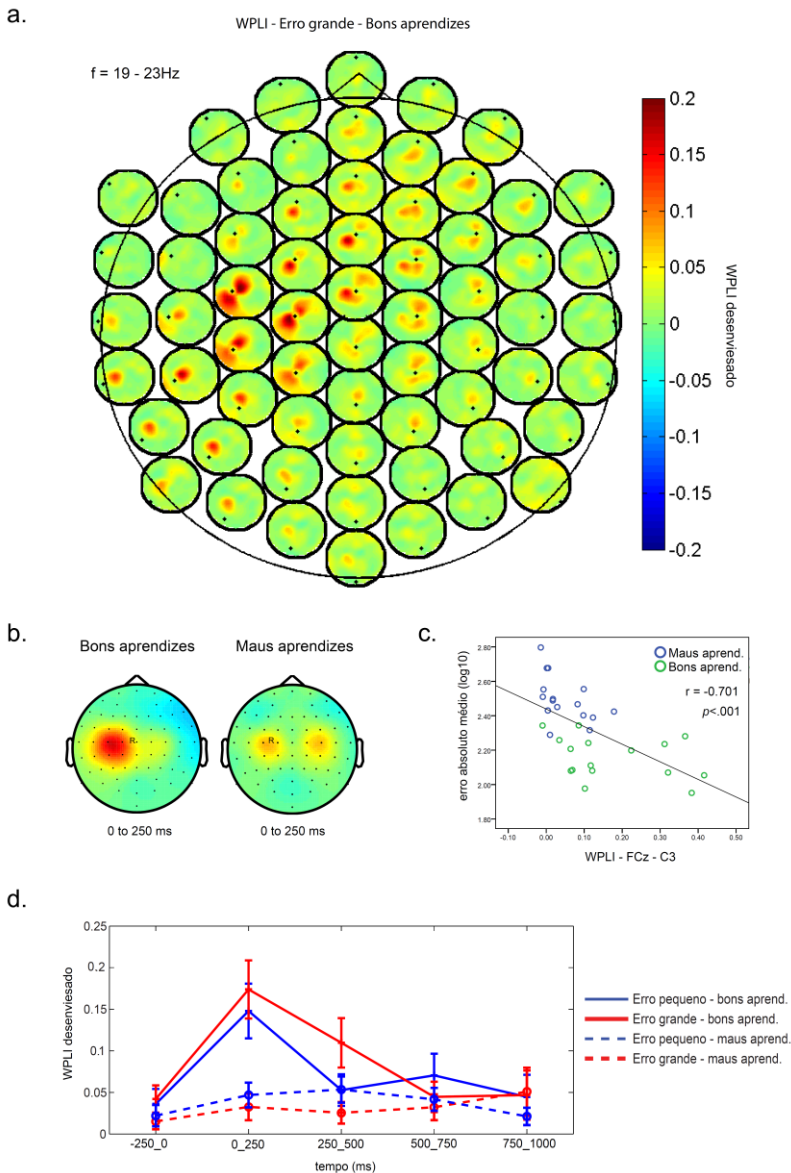


Figura 8. Resultados da conectividade na frequência beta

(a) Conexões entre 0 e 250 ms após erros grandes nos bons aprendizes; (b) Topografia do WPLI entre FCz e os demais canais; (c) Correlações entre o WPLI (FCz-C3) e o erro nos últimos três blocos sem *feedback*; (d) Médias e

EPs do WPLI (FCz-C3) em cada segmento de tempo analisado e em todas as condições (descritas na legenda).

Com a finalidade de testar se essa sincronização, bem como a diferença entre os grupos, foi ou não estatisticamente significativa, calculou-se a média do WPLI entre FCz e C3 em cada um dos segmentos de tempo nos quais esse indicador foi calculado (-250 até 1000 ms em passos de 250 ms, conforme pode ser visualizado na figura 8c). Esse valor médio foi a variável dependente inserida em uma 2x2x5 ANOVA de desenho misto, com os fatores **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes), **magnitude do feedback** (erro grande vs. pequeno) e **tempo** (-250:250:1000 ms) como variáveis independentes. Foi encontrado um efeito significativo para **tempo** ($F(2.37, 30) = 5.79, p = .003, \eta^2 = .16$), mas não para **magnitude do feedback** ($F(1, 30) = 1.66, p = .207$). Os bons aprendizes apresentaram valores de WPLI (FCz-C3) significativamente mais altos do que os maus aprendizes ($F(1, 30) = 5.75, p = .023, \eta^2 = .16$). Além disso, houve uma interação significativa entre **tempo** e **grupo de aprendizagem** ($F(2.37, 30) = 3.94, p = .018, \eta^2 = .12$), considerando que a sincronização entre FCz e C3 aumentou apenas para os bons aprendizes, conforme é evidenciado na figura 8c.

Testes *t* para amostras independentes indicaram que os bons aprendizes apresentaram uma maior sincronização entre a área média e a área motora esquerda entre 0 e 250 ms após o *feedback* indicando erros pequenos ($t(30) = -3.148, p = .004$) e grandes ($t(30) = -3.342, p = .002$). Não houve diferença significativa entre os grupos nas outras janelas de tempo. Testes *t* pareados comparando erros grandes e pequenos indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa entre os mesmos em nenhuma janela de tempo ($p > 0.05$). As mesmas comparações foram feitas para o par C3-CP3, mas os resultados não indicaram diferenças entre grupos, tempo ou magnitude do *feedback*.

O WPLI entre 0 e 250 ms após o *feedback* apresentou correlações consistentes com a maioria das medidas de desempenho. O erro absoluto médio nos três últimos blocos foi correlacionado com a sincronização de fase (WPLI entre FCz e C3) após *feedback* de erro pequeno ($r = -.701, p < .001$) e grande ($r = -.674, p < .001$). O WPLI entre FCz e C3 foi também correlacionado com a variabilidade de resposta (erro pequeno: $r = -.530, p = .002$ / erro grande: $r = -.569, p = .001$) e com a eficiência de ajuste (erro pequeno: $r = .523, p = .002$ / erro grande: $r = .625, p < .001$) nos últimos blocos sem *feedback*. A direção dessas correlações demonstra que, quanto maior é a sincronização em

beta entre FCz e C3, melhor é o desempenho (menor erro, variabilidade e melhor eficiência de ajuste). As correlações foram também significantes para os indicadores na primeira metade da tarefa, mas os efeitos foram muito menores (coeficientes de correlação entre -0.3 e -0.4 e 0.3 e 0.4 para eficiência de ajuste). Juntos, esses resultados sugerem que a conectividade entre a área média-frontal, parte do sistema de monitoramento do desempenho, e a área central esquerda, envolvida nos ajustes e atos motores, são importantes para a consolidação da *performance*, conforme é discutido na próxima sessão.

3.4 DISCUSSÃO

Esse estudo objetivou investigar como diferentes magnitudes de erro são processadas por meio do *feedback* e como esses processos estão associados com a aprendizagem, ou seja, como estão relacionados com o desenvolvimento de uma representação interna da habilidade treinada (produção de intervalo temporal). A aprendizagem foi investigada nesse estudo por meio de dois fatores: 1) diferenças entre participantes que atingiram uma melhor representação interna do intervalo de tempo treinado em relação àqueles que não a desenvolveram (maus aprendizes); 2) correlações entre as respostas cerebrais ao *feedback* de erro grande e pequeno (ERPs, oscilações e conectividade) e o desempenho nos últimos blocos da tarefa, especialmente nas tentativas nas quais o *feedback* não estava disponível, ou seja, quando o desempenho foi baseado na representação interna adquirida e não no *feedback*.

3.4.1 *Feedback* de erro grande vs. pequeno: diferenças nos ERPs, TFRs e conectividade

Uma questão apontada pelo presente estudo foi apresentar quais as diferenças no processamento de *feedback* indicando erros grandes e pequenos, pois a maioria dos estudos compararam diferentes tipos de *feedback* (por exemplo: correto vs. incorreto), mas raramente consideraram diferentes níveis da mesma valência de informação. Nos ERPs, foi verificado que o erro grande estava associado com maior FRN (mais negativo) do que o erro pequeno. Estudos comparando o FRN em resposta à recompensa e à punição de diferentes magnitudes apresentaram resultados controversos: um estudo encontrou que a magnitude não impactou no FRN (Hajcak, Moser, Holroyd, & Simons,

2006), enquanto outros indicaram que o FRN é proporcional à magnitude da perda (Bellebaum, et al., 2010; Donamayor, et al., 2011). No entanto, foi sugerido que o FRN é mais sensível às diferentes características da recompensa (incluindo a magnitude) quando as associações entre ação e consequência (*feedback*) podem ser realmente aprendidas (Holroyd, et al., 2009). No estudo de Hajcak et al. (2006), a recompensa não comunicava informação significativa em termos de aprendizagem das contingências ação-recompensa, o que pode ter influenciado nos resultados.

Embora erros grandes e pequenos tivessem a mesma probabilidade, no sentido de que os mesmos apresentaram a mesma frequência de ocorrência ao longo da tarefa (25% das tentativas), é possível que os níveis de expectativa tenham influenciado na amplitude do FRN, considerando que alguns resultados indicam que os seres humanos tem um viés otimista ao gerar expectativas de *performance* (Oliveira, et al., 2007). Assim, seria esperado encontrar maior FRN em resposta a erros grandes, pois as tendências otimistas fariam deles menos esperados, mesmo que estes fossem igualmente prováveis. No entanto, se o viés otimista tivesse levado os participantes a terem maior expectativa de erros pequenos, o P300 não teria sido menor para erros grandes, pois estes seriam menos esperados e, portanto, evocariam um maior P300, considerando que o P300 é sensível à novidade presente no estímulo (Polich, 2007). Este não foi o caso porque o P300 foi significativamente maior para os erros pequenos do que para os grandes. Este resultado vai ao encontro dos estudos que mostraram um maior P300 em resposta ao *feedback* positivo em relação ao negativo (Bellebaum & Daum, 2008; Hajcak, et al., 2007; Sailer, et al., 2010; van der Helden, et al., 2010).

Em uma revisão relevante (Polich, 2007) foi sugerido que o P300 ocorre quando a ativação da atenção promove o engajamento de operações de memória nas áreas temporo-parietais, ou seja, o P300 é gerado em serviço ao subsequente processamento de memória. Dessa forma, o *feedback* de erro pequeno pode ter ativado os processos atencionais que são relevantes para o resgate da tentativa que o gerou a fim de reforçá-la. Este é um aspecto crucial da aprendizagem, especialmente da aprendizagem motora, pois nesse processo, as boas tentativas precisam ser resgatadas e reforçadas na memória, a fim de atingir um desempenho com baixo erro e alta estabilidade.

Além disso, foi encontrada uma diferença lateralizada entre erro grande e pequeno nos eletrodos associados ao processamento motor. Outro estudo encontrou um padrão semelhante ao comparar perdas e

ganhos em um jogo competitivo (Cohen & Ranganath, 2007), mas este foi na mesma janela de tempo do FRN, lateralizado de acordo com a mão de resposta, contralateralmente. Os autores nomearam esse componente de LFRN (*left FRN*), sugerindo que a informação de *feedback* pode ser processada no córtex motor, cujo papel seria reforçar as respostas boas e enfraquecer as perdas. Em ambos os estudos (Cohen; Ranganath, 2007) e, neste estudo, não se tem suficiente resolução espacial para determinar se a área da mão estava envolvida, mas os eletrodos C3 e C5, nos quais os efeitos foram encontrados, são frequentemente utilizados para investigar as respostas motoras. Neste estudo, esta diferença ocorreu mais tarde, mesmo que um componente similar ao LFRN tenha sido encontrado no grupo dos maus aprendizes em resposta a erros grandes e pequenos (Fig. 2b, parte superior direita). Na janela de tempo posterior foi encontrada uma positividade nesses eletrodos (C3 e C5), que foi maior para erros pequenos e, significativa, mas somente no grupo dos bons aprendizes.

Em síntese, três processos evocados principais foram encontrados: detecção de erro com maior FRN para *feedback* indicando erro grande; alocação de atenção e memória com maiores respostas relacionadas ao P300 maior para erros pequenos; reforço motor: com maior positividade em resposta a erros pequenos nas áreas motoras esquerdas.

Os resultados até então evidenciaram que, embora os erros maiores estejam associados a um maior FRN, erros pequenos parecem alocar mais recursos relacionados com os processos de atenção e memória, o que vai ao encontro dos resultados para as análises das oscilações do presente estudo. Erros pequenos foram associados com maior redução na energia relativa nas faixas de frequência alfa e beta, que é um indicativo de maior ativação em resposta a erros pequenos. Essa diferença iniciou cerca de 300 ms após o *feedback*, se tornando estatisticamente significativa perto dos 400 ms, diferença sustentada quase até o final da época.

Utilizando um teste de *Stroop*, foi verificado que a energia de alfa reduz mais para os erros em relação às tentativas corretas (Carp & Compton, 2009). Ressalta-se, entretanto, que em um paradigma *Stroop* os erros são mais informativos do que as respostas corretas, pois não há nada a aprender ou melhorar uma vez que o participante tenha entendido as regras. No presente estudo, erros pequenos podem ser considerados altamente ativadores, pois os mesmos não apenas sinalizam um erro, mas também fornecem informação importante que pode ser utilizada para aprender e melhorar o desempenho ainda mais. Dessa forma, uma

maior desincronização em alfa e beta para os erros pequenos pode indicar que os participantes aprenderam mais utilizando o *feedback* com erros pequenos (mais correto) do que grandes (mais incorreto).

Outro estudo encontrou que o *feedback* correto foi associado com maior energia em beta após *feedback* incorreto (van de Vijver, et al., 2011). Os autores sugeriram que o *feedback* positivo provoca oscilações em beta nas áreas motoras contralaterais que servem para sinalizar a necessidade de manter o *status quo*, o que por sua vez serviria como um mecanismo para fortalecer a atual resposta de sucesso. Os resultados do presente estudo desafiam a segunda parte dessa explicação uma vez que foi encontrado que erros pequenos estão associados com menor energia de beta do que erros grandes, ou com maior desincronização nesta faixa de frequência. Se a explicação de manter o *status quo* estivesse correta, o resultado encontrado seria o oposto, ou seja, teria sido verificada maior sincronização em resposta ao pequeno erro. Com base nos resultados do presente experimento, e no estudo citado (van de Vijver, et al., 2011), sugere-se que a desincronização de beta, não a sincronização, pois a energia tem sentido de curva para baixo, nos eletrodos centrais (contralaterais à mão de resposta), reflete um mecanismo de resgate e ajuste da tentativa atual de acordo com o *feedback*. Isto explicaria porque o *feedback* indicando erro pequeno foi associado com maior desincronização, se forem considerados que ajustes finos são mais difíceis do que os maiores, mais rudimentares, necessitando, portanto, de uma maior ativação das áreas motoras contralaterais. Os resultados em gama para os bons aprendizes também oferecem suporte a essa noção de que erros pequenos estão associados com maior ativação nesta área. Existe, entretanto, a necessidade de cautela nesta comparação entre os resultados do presente estudo e de van de Vijver et al. (2011), pois os mesmos utilizaram métodos distintos para mensurar a energia espectral.

Não foram encontradas diferenças na conectividade entre erros grandes e pequenos. Outros estudos demonstraram que FCz e as áreas laterais pré-frontais (F5 e F6) sincronizam em teta (4-8 Hz) após erros ou *feedback* negativo em relação às tentativas corretas ou *feedback* positivo (Cavanagh, et al., 2009; Cavanagh, et al., 2010; van de Vijver, et al., 2011). É possível que a diferença entre correto e incorreto em termos de conectividade em teta seja apenas sensível ao *feedback* categórico indicando valências diferentes (correto vs. incorreto), considerando que neste estudo o *feedback* de erro tinha a mesma valência (todos os *feedbacks* comunicavam erros de diferentes magnitudes). Outra possibilidade é que a sincronização em teta após o

feedback de erro não seja sensível à magnitude dos mesmos. A terceira hipótese é que a sincronização em teta esteja ausente quando o *feedback* comunica informação com alta qualidade ou completa, pois encontrou-se somente um aumento na sincronização entre áreas na frequência beta. Ademais, diferentemente das pesquisas referidas, a sincronização encontrada foi entre FCz e C3 e não entre FCz e F5 ou F6, o que indica a análise de uma interação distinta, possivelmente representando outro processo cognitivo.

3.4.2 Bons vs. Maus aprendizes: diferenças nos ERPs, oscilações e conectividade

As respostas cerebrais ao *feedback* indicando erros grandes e pequenos foram diferentes para os participantes que atingiram uma boa representação interna da habilidade (bons aprendizes) em relação aos que apresentaram uma baixa consistência no desempenho (maus aprendizes). Nos ERPs, os bons aprendizes apresentaram diferenças mais altas nas respostas aos erros grandes e pequenos nos estágios finais do *cluster* (nas áreas motoras esquerdas), enquanto que os maus aprendizes apresentaram as maiores diferenças nas ativações relacionadas ao P300. Não foram encontradas diferenças entre os grupos na amplitude dos ERPs.

As principais diferenças entre os grupos foram nas respostas oscilatórias. O comportamento dos *clusters* comparando respostas ao *feedback* indicando erros grandes e pequenos mostrou que os maus aprendizes apresentaram uma grande e dispersa desincronização em resposta aos erros pequenos, especialmente na frequência alfa, enquanto que os bons aprendizes apresentaram um *cluster* mais localizado que iniciou cerca de 400 ms após o *feedback* nas áreas fronto-centrais do hemisfério esquerdo, movendo-se para as áreas parietais e temporais na frequência beta. Estes resultados podem indicar que a diferença entre erro pequeno e grande nos maus aprendizes é mais genérica e relacionada com a atenção, enquanto que nos bons aprendizes, a diferença é mais localizada e específica, possivelmente relacionada ao processo cognitivo de resgatar e reproduzir mentalmente a tentativa, que inclui o ato motor de pressionar o botão.

Devido a essa possibilidade, neste estudo foi investigado o índice de lateralização nas faixas de alfa e beta (Fig. 6ab), que é considerado um dos marcadores do processo de imaginação motora (Neuper, et al., 1999; Neuper, Wortz, & Pfurtscheller, 2006; Pfurtscheller & Neuper, 1997). Os bons aprendizes apresentaram um

maior LI em resposta ao erro pequeno em ambas as faixas de frequência: beta (entre 500 e 600 ms) e alfa (entre 800 e 900 ms após o *feedback*). Os maus aprendizes apresentaram a tendência oposta, ou seja, apresentaram maior LI em resposta ao erro grande na frequência alfa. Esse resultado sugere que os bons aprendizes resgataram e imaginaram a ação a fim de reproduzir/reforçar/corrigir a tentativa de sucesso (baixo erro), enquanto que os maus aprendizes parecem ter feito isso após erros grandes. Essa interação é também respaldada pelos resultados na faixa de frequência gama que indicou um aumento significativo na energia relativa de gama na área motora esquerda apenas para os bons aprendizes e após *feedback* de erro pequeno. Isto fortalece a noção de que o processamento de erros pequenos envolve processos de imaginação que permitem resgatar, corrigir e reforçar as boas tentativas.

Um estudo (Olsson, et al., 2008) comparando as respostas cerebrais (com fMRI) de saltadores em altura novatos e profissionais demonstrou que, enquanto os novatos aumentaram a ativação nas áreas visuais durante a imaginação motora do salto, os profissionais apresentaram um aumento nas áreas motoras e pré-motoras durante o mesmo processo. Os autores sugeriram que para desenvolver uma perspectiva ou representação interna da ação motora, é importante ter representações motoras estabelecidas ou consolidadas da habilidade. No presente estudo, os bons aprendizes apresentaram indicativos de uma melhor representação da habilidade, mas é difícil saber se a atividade relacionada à imaginação motora provocada pelo erro pequeno foi uma consequência ou a causa de uma melhor representação interna. Considerando que não existe um ponto de corte definido entre ter e não ter uma representação motora, e que os processos de aprendizagem são contínuos e incrementais, especula-se que a imaginação provocada pelo *feedback* é fortalecida à medida que a aprendizagem acontece ao mesmo tempo que ela fortalece a representação motora, de maneira circular ou mútua.

Verificou-se ainda que os bons aprendizes aumentaram a conectividade entre a área média-frontal (FCz) e a central esquerda (C3) em resposta ao *feedback*, tanto para erros pequenos quanto para erros grandes. A região média-frontal tem sido implicada no processo de monitoramento do desempenho (Balconi & Scioli, 2011; Cavanagh, et al., 2009; Cavanagh, et al., 2010; Cohen, et al., 2011; Holroyd & Coles, 2002; Luu, et al., 2003) e também de corrigir as ações (Cohen & Ranganath, 2007; Ullsperger & von Cramon, 2006). Cavanagh et al. (2009) demonstraram que a conectividade entre FCz e o córtex pré-

frontal lateral (F5/F6) aumentou após respostas erradas e que este aumento foi preditivo do ajuste pós-erro.

Um novo modelo para a compreensão dos mecanismos neurais da aprendizagem guiada por *feedback*, proposto por Cohen, Wilmes and van de Vijver (2011) sugerem que a aprendizagem está associada com um aumento na sincronização entre as áreas relacionadas ao estímulo e as áreas motoras envolvidas na habilidade aprendida. No presente estudo, foi encontrado que a região média frontal (FCz) sincronizou com a área motora contralateral (C3) após a apresentação de *feedback*. Esse padrão de conectividade não foi apresentado pelo grupo dos maus aprendizes, sugerindo que a aprendizagem fortalece ou é fortalecida pela conexão entre essas duas regiões, permitindo uma correção mais eficaz do erro. Estudos adicionais são necessários para averiguar se a aprendizagem aumenta a conectividade entre essas áreas ou se é facilitada por ela.

3.4.3 Correlações com o desempenho nas tentativas com e sem *feedback*

A fim de investigar quais desses padrões estão associados com a consolidação motora, foram testadas as correlações das respostas cerebrais evocadas e induzidas com a média da *performance* nos últimos três blocos (segunda metade da tarefa) com e sem *feedback*. Observou-se que o FRN em resposta aos grandes erros foi correlacionado com o desempenho, mas apenas nos blocos com *feedback*. Esse resultado foi ao encontro do que era esperad, pois o FRN é um sinal do sistema de monitoramento do desempenho que sinaliza sempre que um resultado difere do esperado (Holroyd & Coles, 2002; Nieuwenhuis, Slagter, von Geusau, Heslenfeld, & Holroyd, 2005; Oliveira, et al., 2007).

Os ERPs nas áreas motoras contralaterais foram diferencialmente correlacionados com o desempenho nos blocos sem *feedback*: para os maus aprendizes, quanto maior a amplitude menor o erro durante a mesma janela de tempo do FRN, especialmente em resposta aos grandes erros; para os bons aprendizes, quanto maior a amplitude nessa área, maior o erro, especialmente em resposta aos erros pequenos. Esta interação é intrincada e pode indicar que a atividade evocada inicial nessas áreas motoras, como o componente encontrado no estudo mencionado previamente (Cohen & Ranganath, 2007), é mais relevante para a consolidação do grupo dos maus aprendizes, enquanto

que para os bons aprendizes, o componente evocado mais tarde nessa área é o mais relevante.

Independente da inexistência de resultados comparáveis na literatura, os resultados deste estudo permitem especular que os bons e maus aprendizes utilizam estratégias diferentes para aprender com o *feedback*, e, desta forma, diferentes padrões são correlacionados com o seu desempenho. Um detalhe importante desse resultado é que os maus aprendizes mostraram maior consistência nas correlações entre desempenho e respostas cerebrais aos erros grandes, enquanto que os bons aprendizes apresentaram respostas mais consistentes aos erros pequenos. Isto pode indicar que os maus aprendizes utilizaram uma estratégia focalizada em evitar erros grandes, enquanto que os bons aprendizes focaram mais na correção e reforço das boas tentativas (erros pequenos). Entre as evidências para o uso de estratégias distintas está a correlação encontrada entre a consolidação da habilidade (desempenho nos blocos sem *feedback*) e a dessincronização de beta na área motora esquerda, que foi presente apenas no grupo dos bons aprendizes. Esta correlação foi válida para ambos *feedbacks* (erros grandes e pequenos) em uma ampla janela de tempo, mas mais significativa entre 300 e 500 ms.

A energia relativa de gama na área motora foi correlacionada com a consolidação da habilidade em ambos os grupos, mas somente em resposta à *feedback* indicando erros pequenos (tentativas boas). A correlação de gama com a eficiência do ajuste foi também significativa, mesmo para o ajuste medido em blocos onde o *feedback* não estava disponível, indicando que os participantes com maiores aumentos na energia de gama em resposta a erros pequenos foram mais capazes de corrigir a si próprios mesmo quando o *feedback* não estava disponível. Esta resposta cerebral pode estar relacionada ao processo de resgate e codificação na memória da tentativa de sucesso, o que é crucial para a aprendizagem. Hipotetizou-se que este processo de resgate envolve imaginação motora: os participantes rapidamente resgatam e reproduzem mentalmente a última tentativa, a fim de corrigi-la e reforçá-la. Um estudo utilizando eletrocorticografia (Miller et al., 2010) mostrou que a imaginação motora está relacionada com uma ampla dessincronização nas áreas motoras sustentada nas frequências baixas (8-32 Hz) e uma focal e localizada sincronização em gama (>35 Hz) na porção motora específica ao membro movimentado na imaginação. Esta é provavelmente a razão pela qual não foram encontrados *clusters* significativos na frequência gama, mas houve diferenças significativas e correlações encontradas especificamente no eletrodo com a energia

máxima de gama (C5). Isto é também uma razão para interpretar esses resultados com cautela, uma vez que há uma baixa resolução espacial inerente aos registros de EEG.

As correlações mais altas e consistentes com o desempenho durante os últimos blocos foram com a conectividade entre FCz e C3 na frequência beta. A maior correlação encontrada indicou que quanto maior a sincronização de fase entre FCz e C3, melhor o desempenho nos últimos blocos sem *feedback* (segunda metade da tarefa). Não foram encontrados estudos com resultados comparáveis em termos de conectividade, mas é sugerido que esse processo reflita a conexão entre o monitoramento da *performance* (área média frontal) e a área motora que mantém a representação e a ação do ato aprendido. Especula-se que quanto mais conectadas essas áreas são, mais fácil é o resgate e correção das tentativas com base no *feedback*. Novamente, mais estudos são necessários para determinar se uma maior conectividade entre essas duas áreas facilita ou é facilitada pela aprendizagem.

3.5 CONCLUSÃO

Neste estudo, observou-se que, enquanto os erros grandes estão associados com maior FRN, os pequenos estão relacionados com maior P300, com maior desincronização em alfa e beta e com maior sincronização em gama. Bons e maus aprendizes parecem ser diferentes em relação a como processam o *feedback*, especialmente quando o mesmo indica erros pequenos. A sincronização de gama na área motora em resposta aos erros menores foi correlacionada com o desempenho na tarefa e apenas aumentou no grupo dos bons aprendizes. Observou-se também que a sincronização de fase entre as áreas médias-frontais e as áreas motoras foram apresentadas somente pelos bons aprendizes, e que a força dessa conexão foi correlacionada com a *performance* mesmo quando o *feedback* não estava disponível. Dos ERPs à sincronização de fase, os resultados do presente estudo sugerem que as respostas cerebrais às boas tentativas (erros pequenos) estão associadas com maiores ativações nas áreas motoras e que essas ativações estão correlacionadas com o quanto bem uma memória motora pode ser consolidada.

4 ESTUDO 2: CORRETO OU INCORRETO? DINÂMICA OSCILATÓRIA E DE CONECTIVIDADE UTILIZANDO *FEEDBACK* CATEGÓRICO

Este estudo objetivou investigar a diferença entre *feedback* indicando acertos e erros em uma tarefa de produção temporal quase idêntica àquela utilizada no estudo 1. A única diferença é que neste estudo, o *feedback* foi categórico, indicando apenas se a tentativa foi “correta”, “muito curta” ou “muito longa”.

RESUMO

Neste estudo, os correlatos de ERPs, oscilações e de conectividade da aprendizagem guiada por *feedback* foram investigados. Utilizando uma tarefa de produção temporal, as respostas cerebrais ao *feedback* de 36 participantes divididos em bons e maus aprendizes foram analisadas. Os resultados indicaram que enquanto o FRN e o P300 foram sensíveis à valência do *feedback* (correto vs. incorreto), as oscilações na frequência teta (4-8 Hz) foram sensíveis não somente a valência do mesmo, mas também à aprendizagem. Os achados de conectividade direcionada revelaram a dinâmica das conexões antes e depois da apresentação do *feedback*. Verificou-se que a conectividade não foi sensível à valência do *feedback*, mas que foi diferente entre os bons e maus aprendizes e apresentou correlação significativa com o desempenho na tarefa.

Palavras-chave: *Feedback*. Aprendizagem. FRN. Sincronização de fase. Oscilações teta.

4.1 INTRODUÇÃO

Seres humanos têm uma evidente habilidade para fazer planos, desde uma simples lista de compras para uma festa até mais os complexos, como um projeto de pesquisa com a duração de dez anos. Entretanto, para fazer tais planos é necessária experiência prévia, bem como é necessário o monitoramento atento dos resultados de cada ação, a fim de corrigir possíveis erros a tempo. Além disso, se um erro é cometido, este precisa ser incorporado e corrigido para que da próxima vez, não seja repetido. Assim, fazer planos requer conhecer as consequências de certas ações ou de uma sequência de ações. Aprendizagem é o processo que permite ao indivíduo fazer previsões mais acuradas e consequentemente, melhorar ou otimizar o seu desempenho com base nas mesmas.

As consequências das ações do ser humano funcionam como sinais que ensinam. São *feedbacks* que informam o quão adequada ou não foi a ação. Como aprender por meio de *feedback* tem sido o foco de um grande número de estudos no campo da neuroimagem (for review: Cohen, 2008; Cohen, et al., 2011; Nieuwenhuis, et al., 2004), a maioria dos artigos na área estão focados nos potenciais relacionados ao evento (ERPs) associados com o processamento de *feedback*, especialmente no componente denominado **Negatividade Relacionada ao Feedback** (FRN), também referido como **Negatividade Relacionada ao Feedback de Erro** (*feedback ERN*). O último termo se deve ao fato de que na década de 90, uma deflexão negativa nos ERPs com pico aproximado de 80 ms após uma resposta errada com topografia média frontal foi encontrada e nomeada ERN ou Ne (Falkenstein, et al., 1991; Gehring, et al., 1990; Gehring, et al., 1993). Alguns anos depois, um estudo (Miltner, et al., 1997) encontrou uma deflexão negativa com características similares ao ERN, mas que acontecia após a apresentação de *feedback* indicando erro, e não após a resposta errônea, como é o caso do ERN. Esse componente, denominado como FRN, tem sido investigado em muitos estudos desde então, como uma medida da atividade do sistema de monitoramento do desempenho. Presume-se que ambos FRN e ERN refletem a redução fásica da dopamina no sistema dopaminérgico mesoencefálico que é projetada ao Córtex Cingulado Anterior (ACC) (Holroyd & Coles, 2002), considerada como a origem mais provável do FRN em alguns estudos (Balconi & Scioli, 2011; Luu, et al., 2003; Miltner, et al., 1997; Potts, et al., 2010; Santesso et al., 2011).

Presume-se que o FRN seja provocado pela detecção de um erro de predição de recompensa (RPE) (Holroyd & Coles, 2002), que é a diferença entre a recompensa esperada e a obtida (Sutton & Barto, 1998). Essa possibilidade foi respaldada pelos resultados de muitos estudos (Bellebaum, et al., 2010; Chase, et al., 2011; Holroyd, et al., 2009; Potts, et al., 2010; Yasuda, et al., 2004). Além disso, foi proposto que o FRN não está apenas associado à detecção de um RPE, mas também à correção do mesmo, uma vez que foi verificado que quanto maior o FRN em resposta ao *feedback* de erro, maior a probabilidade de evitar o mesmo erro na próxima tentativa (van der Helden, et al., 2010). Outros estudos encontraram que o FRN reduz à medida que a aprendizagem progride (Heldmann, et al., 2008; Sailer, et al., 2010), a medida que os participantes se tornam melhores em prever as consequências das suas ações. No entanto, alguns estudos (Chase, et al., 2011; van de Vijver, et al., 2011) não encontraram tal associação e afirmaram que o FRN pode ser mais sensível a determinadas características do *feedback*, tais como valência e probabilidade, e não à aprendizagem.

Dado que o FRN é um ERP, perdendo, portanto, parte das respostas cerebrais que não estão em fase e acontecem ao mesmo tempo em relação a um determinado evento (Herrmann, et al., 2005), os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* podem oferecer informações complementares das várias características do *feedback* para a aprendizagem (Cavanagh, et al., 2010; Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2007; Cohen, et al., 2011; Marco-Pallares, et al., 2008; Papo, et al., 2007). No domínio oscilatório, foi encontrado que a energia de teta (4-8 Hz) aumenta entre 200 e 500 ms após o erro ou após o *feedback* negativo ou de erro (Cavanagh, et al., 2009; Cavanagh, et al., 2010; Cavanagh, et al., 2012; Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2007; van de Vijver, et al., 2011). Adicionalmente, as oscilações na faixa de beta (15-30 Hz) são observadas após *feedback* positivo ou recompensas (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares, et al., 2008; van de Vijver, et al., 2011). Van de Vijver et al. (2011) verificaram que, enquanto a energia de teta foi preditiva do ajuste adequado de desempenho, na próxima tentativa após o *feedback* negativo apenas, a energia de beta foi relacionada com o ajuste correto após ambos *feedbacks*, positivos e negativos.

A dinâmica oscilatória do processamento de *feedback* vem trazendo novos *insights* na aprendizagem guiada por *feedback*; Cohen et al. (2011) propuseram um novo modelo teórico para a compreensão da aprendizagem guiada por *feedback*. Nesse modelo, um conjunto de

novas predições foi descrito: 1) a aprendizagem está associada com o aumento na sincronização das áreas cerebrais relacionadas com o processamento dos estímulos com as áreas motoras nas quais tais associações (estímulo-resposta) são formadas; 2) estas mudanças na sincronização são guiadas pela influência das regiões corticais pré-frontais em frequências específicas: oscilações teta na área média-frontal estão envolvidas em aprender por meio de *feedback* negativo, enquanto que as oscilações em beta mediam a aprendizagem por meio de *feedback* positivo; 3) essas mudanças na sincronização entre áreas cerebrais estão refletidas nas diferenças intraparticipantes, como por exemplo, o aumento da sincronização à medida que o sujeito aprende, bem como nas distinções entreparticipantes, por exemplo, sujeitos que aprendem melhor apresentam sincronização mais forte entre áreas em relação aos que não são bons aprendizes.

Outra predição é que após o *feedback* negativo, as áreas médias-frontais engajam outras áreas relacionadas às representações do estímulo e da resposta motora, específicas à tarefa, de maneira *top-down*: da área média-frontal às áreas motoras e sensoriais (estímulos). A fim de testar essa predição, é necessário empregar uma medida de conectividade direcionada¹⁹. Foram encontrados poucos estudos analisando a sincronização entre diferentes áreas em resposta ao *feedback* (Cavanagh, et al., 2010; van de Vijver, et al., 2011). Tais estudos indicaram que o *feedback* negativo está associado a um aumento na sincronização de fase em teta entre a área média-frontal (FCz) e o córtex pré-frontal dorsolateral (F5 e F6), mas a direção dessa conexão permanece desconhecida.

Medidas tradicionais de conectividade tais como coerência e sincronização de fase apresentam o problema de serem afetadas pela condução de volume²⁰, que introduz correlações espúrias entre canais (Nolte, et al., 2004; Pereda, et al., 2005); a condução de volume pode

¹⁹ A maioria das medidas de sincronização de fase, comumente empregadas para verificar o quanto duas áreas no escalpo estão sincronizadas ou conectadas (em estudos com EEG e MEG) não testam a direção dessa sincronização. Se as áreas A e B estão sincronizadas é impossível, por meio de medidas tradicionais, saber se o sinal vai de A para B ou vice-versa, ou seja, quem é o líder da conexão estabelecida entre essas áreas. No entanto, existem algumas medidas ou técnicas que permitem analisar o sentido da sincronização, conforme será descrito na seção 4.2 Método, deste estudo.

²⁰ Para a definição deste problema, veja a nota de rodapé n.16 no capítulo 3, estudo 1 (p. 75).

confundir a análise fazendo com que os valores de coerência ou de sincronização de fase entre dois canais sejam inflados em função de uma origem única em comum ao invés de uma interação real. Isto é particularmente relevante no estudo da aprendizagem guiada por *feedback*, uma vez que a sincronização de fase em teta foi encontrada entre duas áreas que são próximas e nas quais uma diferença na energia de teta entre *feedback* correto e incorreto foi também verificada (Cavanagh, et al., 2010; van de Vijver, et al., 2011).

Considerando que uma característica da condução de volume é que ela não provoca atraso entre dois sinais, alguns métodos que são menos sensíveis à energia espectral correlacionada, tais como a **parte imaginária da coerência** (Nolte, et al., 2004), o *phase lag index* ou, em português, índice de atraso de fase (Stam, et al., 2007) e o *weighted phase lag index*, ou índice ponderado de atraso de fase, (Vinck, et al., 2011), foram propostos. Estes métodos mostraram-se robustos ao problema de condução de volume com boa sensibilidade para detectar interação real; no entanto, nenhum destes permite estimar a direção da interação, o que é importante no presente estudo. Por esta razão, para mensurar conectividade direcionada foi utilizado o *phase slope index* (PLI), aqui traduzido como *índice de inclinação de fase*. Este método é insensível à condução de volume uma vez que é baseado na parte imaginária da coerência (Nolte, et al., 2008). Além disso, o PSI demonstrou ser mais robusto ao ruído do que a *Granger Causality* (Causalidade de Granger), método este que, erroneamente, detectou conexões causais devido à ruído adicionado (Nolte, et al., 2008).

No presente estudo, foram testadas algumas das predições feitas por Cohen et al. (2011) por meio da investigação dos correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* em uma tarefa de produção temporal. Com a finalidade de analisar aprendizagem, foram incluídos blocos sem *feedback* de desempenho. Este procedimento permitiu testar o quanto os participantes desenvolveram uma representação interna do intervalo de tempo a ser produzido. Além disso, esses blocos permitiram a divisão dos participantes em dois grupos: bons e maus aprendizes. O objetivo deste estudo foi triplo: 1) analisar os ERPs, as oscilações e a conectividade direcionada após o *feedback* correto e incorreto; 2) comparar os ERPs, oscilações e conectividade direcionada entre bons e maus aprendizes; 3) correlacionar essas respostas cerebrais com o desempenho na tarefa nos blocos sem *feedback*. Como hipótese, presumiu-se que o *feedback* indicando erro estaria associado com maior FRN, aumento da energia de teta na área média e maior sincronização em teta. Além disso, foi predito que a sincronização entre áreas seria

maior no grupo dos bons aprendizes. Por fim, presumiu-se que a energia de beta estaria correlacionada com o desempenho na tarefa.

4.2 MÉTODO

4.2.1 Participantes

Trinta e seis adultos destros (média de idade = 23.1 anos, DP = 6.67) com audição normal (relatada) e visão normal ou corrigida participaram deste estudo. A amostra foi dividida em dois grupos, de acordo com o desempenho na tarefa experimental, conforme é explicado subsequentemente nesta sessão. As medidas de desempenho resultaram em um grupo de bons aprendizes ($n = 18$, média de idade = 23.2, seis homens) e maus aprendizes ($n = 18$, média de idade = 23.1, cinco homens). O termo de consentimento livre e esclarecido foi assinado antes do início dos procedimentos experimentais de acordo com a aprovação pelo comitê de ética do Departamento de Psicologia da Goldsmiths, University of London. Os participantes foram selecionados por meio do esquema de recrutamento de estudantes da própria universidade, tendo cada um, recebido seis créditos pela participação.

4.2.2 Tarefa experimental

Foi utilizado o mesmo paradigma do experimento 1, uma tarefa de produção temporal modificada (Miltner et al., 1997). A tarefa está descrita na página 70 desta tese. Exatamente a mesma estrutura, de tempo e tentativas foi utilizada, sendo que a única diferença foi o tipo de *feedback*. No presente experimento, ao invés de apresentar o *feedback* como a diferença entre o intervalo produzido e o alvo (1700 ms), o *feedback* foi uma categoria que poderia ser: correto (*correct*), muito longo (*too long*) ou muito curto (*too short*)²¹. Os limites para cada categoria foram definidos de maneira adaptativa com base na diferença entre o intervalo produzido e o alvo; a resposta foi considerada correta se ela caísse na janela de tempo que iniciava 200 ms acima e abaixo do alvo (entre 1500 e 1900 ms) no início. Após uma resposta correta, essa janela de tempo era reduzida 20 ms de cada lado, por exemplo, se a

²¹ A tarefa original foi em inglês, por isso os termos são apresentados junto às respectivas traduções.

janela iniciou com 200, baixava para 180 ms, sendo considerado correto, um intervalo entre 1520 e 1880 ms. Por outro lado, após uma resposta incorreta (tanto abaixo quanto acima da janela de tempo correta), a janela de tempo era aumentada em 20 ms de cada lado (o oposto do que acontece para a resposta correta). No entanto, todas as respostas entre 50 ms acima ou abaixo do alvo, foram consideradas como corretas, a fim de evitar confundir o participante (uma resposta boa pode ser considerada muito longa ou muito curta). Os participantes foram informados sobre tais ajustes antes do início da tarefa, ou seja, eles sabiam que após cada tentativa correta ficava mais difícil e vice-versa.

A divisão dos grupos entre bons e maus aprendizes foi feita da mesma forma que no estudo 1, conforme está descrito no último parágrafo da página 67, início da página 68. Além disso, as principais medidas de desempenho foram: o erro absoluto médio, a variabilidade (desvio-padrão do erro) e a eficiência do ajuste (AE – descrito na página 68).

4.2.3 Registro de EEG e análise

Sinais contínuos de EEG foram adquiridos por meio de 64 eletrodos ativos posicionados de acordo com o sistema 10-20 estendido, sendo os sinais amplificados por meio do *BioSemi ActiveTwo*^(R). Eletrooculogramas (EOG) vertical e horizontal foram registrados simultaneamente utilizando quatro eletrodos adicionais: um abaixo e outro acima do olho direito, para o EOG vertical; e um ao lado do olho direito e outro ao lado do olho esquerdo para o EOG horizontal. A taxa de amostragem utilizada foi de 512 Hz, filtrada entre 0.16 e 100 Hz. A tarefa foi apresentada utilizando a *toolbox* Cogent 2000 (<http://www.vislab.ucl.ac.uk/cogent.php>). Os dados de EEG foram processados e analisados utilizando as seguintes *toolboxes* para MATLAB (*The MathWorks Inc.*, Natick, MA): *EEGLAB* (Delorme & Makeig, 2004) para o pré-processamento dos dados, incluindo a análise dos componentes independentes (ICA), e *FieldTrip* (Oostenveld, et al., 2011) para data análise e comparações estatísticas. Além disto, a análise de conectividade foi conduzida utilizando programas de MATLAB personalizados e específicos, desenvolvidos e implementados em outros estudos (Nolte & Muller, 2010; Nolte, et al., 2008).

Pré-processamento: Os dados de EEG foram re-referenciados para a média aritmética das duas orelhas, filtrados com um passa-alta de 0.5 Hz. As épocas foram extraídas com base no *feedback* (ponto zero da época), com uma janela de 2600 ms (de 1600 ms antes até 1000 ms após o *feedback*). Os artefatos foram tratados de maneira semiautomática: primeiramente, os dados foram inspecionados visualmente, a fim de remover épocas com grandes artefatos musculares, seguido por uma ICA utilizada para corrigir épocas que continham piscadas. Após essa correção, as épocas contendo amplitudes maiores que 80 μV foram descartadas. O número médio de tentativas utilizado nas análises foi: 133 tentativas “muito curtas” (DP = 34), 131 “muito longas” (DP = 32) e 139 “corretas” (DP = 27). Uma 3 x 2 ANOVA de *design* misto foi conduzida a fim de comparar o número de tentativas entre as três condições ou tipos de *feedback* (muito curto, muito longo, correto) e, entre os grupos (bons e maus aprendizes). Os resultados indicaram que não houve diferença no número de tentativas entre os tipos de *feedback* ($F(1.6, 30) = 0.805, p = 0.451$) e entre os grupos ($F(1, 30) = 1.144, p = .292$), bem como nenhum efeito interativo foi encontrado ($F(1.6, 30) = 1.693, p = .198$). Esses resultados indicam que a janela de tempo adaptativa funcionou de maneira que os grupos não diferiram em relação ao número de *feedback* correto e incorreto obtido ao longo da tarefa. O número mínimo de tentativas utilizadas em cada condição foi: 74 tentativas para “muito longo”, 81 para “muito curto” e 84 para “correto” como *feedback*.

Análise de ERPs: Para os ERPs, os dados foram filtrados com um passa baixa de 35 Hz. O período analisado foi de 200 ms antes até 1000 ms após o *feedback*. A atividade nos 200 ms precedentes ao *feedback* foi subtraída do sinal, a fim de corrigir os valores pela linha de base. O FRN foi mensurado como a média da amplitude entre 200 e 300 ms após o *feedback* no eletrodo FCz. O P300 foi definido como a média da amplitude em Pz entre 300 e 400 ms após a apresentação do *feedback*.

Análise das oscilações: O conteúdo espectral variante no tempo do EEG foi estimado utilizando *Marlet Wavelet*, que permitiu extrair as representações de tempo e frequência (TFRs). O sinal foi convolvido com *Morlet Wavelet* complexa em cada tentativa única, para subsequente cálculo da média para cada condição. A faixa de frequência analisada foi de 2 a 35 Hz em passos de 1 Hz, utilizando *wavelets* de quatro ciclos. A janela de tempo analisada foi dentre 1600 ms antes até 1000 ms, após o *feedback* (total = 2,6 segundos). Para calcular a energia

espectral relativa, as TFRs foram normalizadas, dividindo a energia espectral em cada frequência pelo seu valor na linha de base, ou seja, pela média da energia nos 200 ms precedentes ao *feedback* em cada frequência.

Análise de Conectividade: A conectividade funcional foi mensurada utilizando o método recentemente introduzido denominado *Phase Slope Index* (PSI), desenvolvido por Nolte et al. (2008). Este método está baseado no pressuposto de que a parte imaginária da coerência não é afetada pela condução de volume e não pode ser explicada como artefato de mistura. O PSI mede a conectividade entre dois sinais com base na inclinação da fase do espectro-cruzado entre os mesmos. Para os canais 1 e 2, o espectro-cruzado S_{12} é dado por:

$$S_{12}(f) = \langle \hat{y}_1(f)\hat{y}_2(f) \rangle \sim \exp(i2\pi f\tau) \equiv \exp(i\Phi(f))$$

Eq. 1 - Nolte et al. (2008)

onde $\langle \cdot \rangle$ denota o valor esperado. O espectro de fase $\Phi(f) = 2\pi f\tau$ é linear e proporcional ao atraso τ . Se a inclinação de $\Phi(f)$ for positiva, a direção causal é de y_1 para y_2 , e se for negativa, de y_2 para y_1 . O PSI é, portanto, uma medida de inclinação de fase definida como:

$$\psi_{ij} = \Im \left(\sum_{f \in F} C_{ij}(f)C_{ij}(f + \delta f) \right)$$

Eq. 2 - Nolte et al. (2008)

onde f é a frequência, δ é a resolução de frequência, $\Im(\cdot)$ denota utilizar a parte imaginária, e F é um conjunto de frequência sobre as quais a inclinação é somada. O termo C_{ij} implica a coerência complexa (espectro-cruzado normalizado):

$$C_{ij}(f) = \frac{S_{ij}(f)}{\sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)}}$$

Eq. 3 - Nolte et al. (2008)

Devido a essa medida estar baseada na parte imaginária da coerência, ela é insensível à condução de volume (a parte imaginária da coerência é deslocada no tempo em relação à parte real). O PSI é então normalizado pelo seu desvio-padrão, que é estimado utilizando o método *Jackknife*. Valores absolutos maiores do que dois são considerados significativos (Nolte, et al., 2008). O PSI apresentou melhor desempenho quando comparado à Causalidade de Granger em simulações com adição de ruído rosa e branco, ruídos estes que induziram o algoritmo de Granger a encontrar relações causais inexistentes, além de ter falhado em encontrar interações reais que o PSI consistentemente detectou o que indica maior sensibilidade do método PSI (Nolte, et al., 2008).

Para analisar a PSI, as épocas foram divididas entre segmentos não-sobrepostos de 300 ms (de -600 a 900 ms) que foram submetidos à transformada discreta de Fourier. O PSI foi então calculado em cada um desses segmentos, de 3.33 até 40 Hz (resolução de frequência de 3.33 Hz). Primeiramente, foi analisado o PSI em função da frequência, de FCz para todos os outros canais, o que levou à escolha da frequência teta (4-8 Hz = 6.7 Hz) como a frequência de interesse, uma vez que o pico de conectividade foi observado nesta frequência. Assim, os valores de PSI foram inspecionados utilizando a figura 8, “*heads-in-head*”, (apresentada no estudo 1, página 95), desenvolvida e testada em artigos metodológicos relevantes sobre conectividade (Nolte, et al., 2004; Nolte & Muller, 2010; Nolte, et al., 2008). Esta figura, conforme foi observado no capítulo anterior, permite a visualização simultânea de todas as conexões em uma dada faixa de frequência e janela de tempo. Essas visualizações guiaram a escolha os pares utilizados para as comparações estatísticas.

4.2.3 Análise estatística

As respostas cerebrais ao *feedback* indicando respostas corretas e incorretas foram comparadas utilizando 2 x 3 ANOVA de desenho misto, com o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como fator entreparticipantes, e o **tipo de feedback** como condições intraparticipantes (“muito curto”, “muito longo”, “correto”). Quando variáveis dependentes pertencentes à mesma análise apresentaram correlações moderadas, a análise multivariada de variância (MANOVA) foi utilizada com as mesmas variáveis independentes descritas anteriormente. Quando interações foram observadas, testes t-pareados e também testes *t* para amostras independentes foram utilizados para os contrastes. Os graus de liberdade foram ajustados quando o pressuposto de esfericidade não foi atingido. As variáveis dependentes de cada ANOVA ou MANOVA utilizadas estão descritas ao longo da sessão dos resultados. Essas análises estatísticas foram realizadas em SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences, version 18.0, Chicago, IL*).

Correlações de Pearson foram utilizadas visando testar a associação entre as respostas cerebrais e o desempenho, entre participantes. As correlações foram testadas não apenas para janelas de tempo específicas, mas para a época toda, correlacionando a amplitude (para ERPs) ou a energia espectral relativa (para TFRs) com o erro médio nos três últimos blocos com e sem *feedback* (separadamente) em cada ponto de tempo. O objetivo principal foi analisar a correlação com os blocos sem *feedback*, pois nesses blocos o desempenho dependente em maior grau do quanto bem a representação interna do intervalo foi aprendida. A correlação foi apenas considerada significativa se ela permaneceu significante ($p < .05$) por ao menos 50 ms.

4.3 RESULTADOS

A sessão dos resultados é dividida em quatro partes principais: 1) resultados comportamentais ou de desempenho na tarefa; 2) resultados dos ERPs; 3) resultados das TFRs; 4) resultados da conectividade.

4.3.1 Desempenho na tarefa

As diferenças entre bons e maus aprendizes podem ser observadas na figura 1. Foi realizada uma $2 \times 2 \times 2 \times 3$ MANOVA com **estágio** (primeira vs. segunda metade da tarefa), **feedback** (com vs. sem *feedback*) e **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como variáveis independentes e com três medidas comportamentais (erro absoluto médio, variabilidade e eficiência de ajuste) como variáveis dependentes.

Houve um efeito multivariado significativo para o **grupo de aprendizagem** ($F(1, 32) = 11.085, p < .001, \eta^2 = .510$), pois os bons aprendizes apresentaram menor erro absoluto médio ($F(1, 32) = 33.632, p < .001, \eta^2 = .497$), variabilidade ($F(1, 32) = 25.722, p < .001, \eta^2 = .431$) e maior eficiência de ajuste ($F(1, 32) = 30.447, p < .001, \eta^2 = .472$) em relação aos maus aprendizes. Foi encontrado também um efeito multivariado significativo para **estágio** ($F(1, 32) = 6.791, p = .001, \eta^2 = .708$), **feedback** ($F(1, 32) = 25.846, p < .001, \eta^2 = .708$) e interações entre **feedback e grupo de aprendizagem** ($F(1, 32) = 4.318, p = .012, \eta^2 = .288$) e entre **estágio e feedback** ($F(1, 32) = 4.476, p = .010, \eta^2 = .296$). A interação entre **feedback e grupo** se deve ao fato de que a diferença no desempenho entre os blocos **com** e **sem feedback** foi maior no grupo dos maus aprendizes. A interação entre **estágio e feedback** indicaram que as diferenças no desempenho nos blocos *com* e *sem feedback* reduziram significativamente na segunda metade da tarefa. Observou-se, na análise dos efeitos univariados, que a variável com maior mudança entre a primeira e segunda metade da tarefa foi a eficiência do ajuste ($F(1, 34) = 19.013, p < .001, \eta^2 = .359$), a qual melhorou na segunda metade. Outrossim, houve uma interação significativa entre **estágio e grupo** apenas para esta variável ($F(1, 34) = 7.345, p = .010, \eta^2 = .178$), indicando que apenas os bons aprendizes aumentaram a eficiência de ajuste na segunda metade da tarefa. Esta interação foi apenas marginalmente significativa para o erro absoluto ($F(1, 34) = 3.846, p = .058, \eta^2 = .102$) e para a variabilidade do erro ($F(1, 34) = 3.260, p = .080, \eta^2 = .080$).

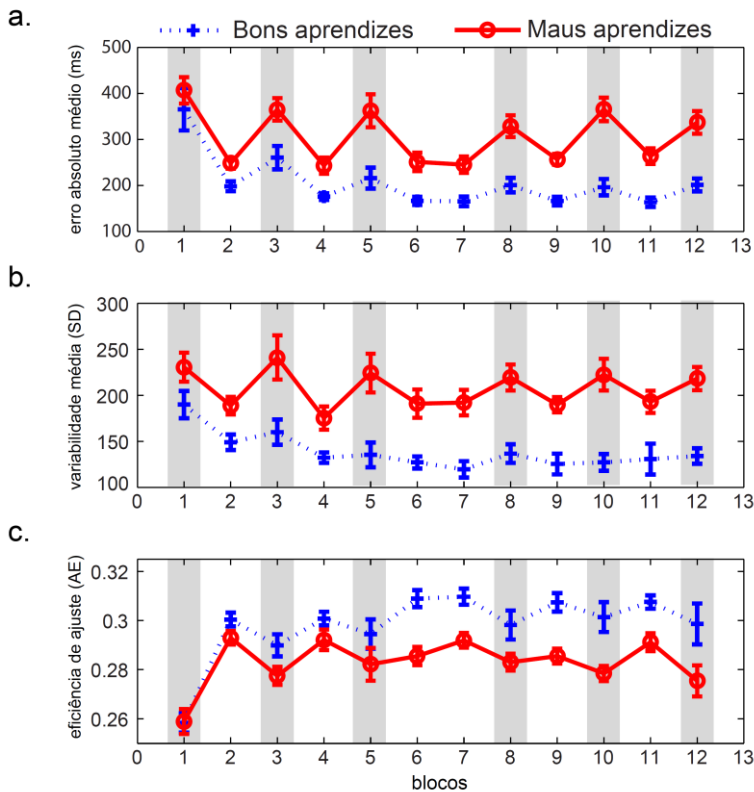


Figura 1. Desempenho na tarefa

Medidas de desempenho de ambos os grupos, bons (azul) e maus aprendizes (vermelho) nos 12 blocos, com (branco) e sem (cinza) *feedback*. O desempenho foi mensurado como a média do erro absoluto (a), variabilidade do erro (b), e eficiência de ajuste (c).

Em geral, estes resultados indicaram que os bons e maus aprendizes diferiram no desempenho nas três medidas empregadas. Além disso, ambos os grupos mostraram uma melhora significativa no desempenho da primeira para a segunda metade da tarefa, o que indica que processos de aprendizagem estavam presentes na execução da tarefa. Um pior desempenho nos blocos sem *feedback* indica que a execução da tarefa é dependente do *feedback*. Vale ressaltar que, a

interação encontrada demonstrou que os maus aprendizes sofreram maiores reduções de desempenho quando o *feedback* não foi disponibilizado (apenas a palavra “OK”), o que sugere que os bons aprendizes desenvolveram uma melhor representação interna do intervalo treinado (figura 1a).

4.3.2 Resultados dos ERPs

Foi encontrada uma deflexão negativa nos ERPs semelhante a um FRN: um componente na direção negativa (deflexão) iniciando perto dos 175 ms após o *feedback*, com uma topografia média-frontal (figura 2c) presente apenas após *feedback* indicando uma tentativa incorreta (ambos: “muito longo” e “muito curto”) tanto para os bons quanto para os maus aprendizes (figura 2a). É imperativo destacar que, um componente semelhante ao P300 foi também encontrado (figura 2b), com maiores amplitudes após o *feedback* positivo (“correto”) com uma topografia parietal posterior, como a do P300 (figura 2d).

Para comparar o FRN e P300 entre as condições e grupos, foi conduzida uma 2 x 3 ANOVA com desenho misto para o FRN e outra para o P300, tendo a variável **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como fator entreparticipantes, e o *feedback* (“muito curto”, “muito longo” e “correto”), como variável intrassujeitos. Os resultados indicaram um efeito significativo para *feedback* no FRN ($F(1.37, 34) = 67.498, p < .001, r^2 = .665$), mas não para **grupo de aprendizagem** ($F(1, 34) = 0.751, p = .392$), nem interação entre os mesmos ($F(1.42, 34) = 0.745, p = .433$). Contrastes indicaram que existe diferença significativa entre *feedback* “correto” e “muito curto” ($p < .001$) e entre “correto” e “muito longo” ($p < .001$), mas não entre “muito curto” e “muito longo” ($p = .363$), ou seja, a diferença é entre o *feedback* indicando acerto e erro, independente se o erro é uma super ou subestimação temporal.

Os resultados para o P300 foram similares: efeitos significativos para *feedback* ($F(1.72, 34) = 62.887, p < .001, r^2 = .649$), mas sem efeitos para o grupo de aprendizagem ($F(1, 34) = 0.035, p = .853$) sem interações ($F(1.72, 34) = 2.068, p = .142$). Contrastes revelaram que houve diferenças significativas entre “correto” e “muito longo” ($p < .001$) e entre “correto” e “muito curto” ($p < .001$), mas não entre as duas categorias incorretas ($p = 1$).

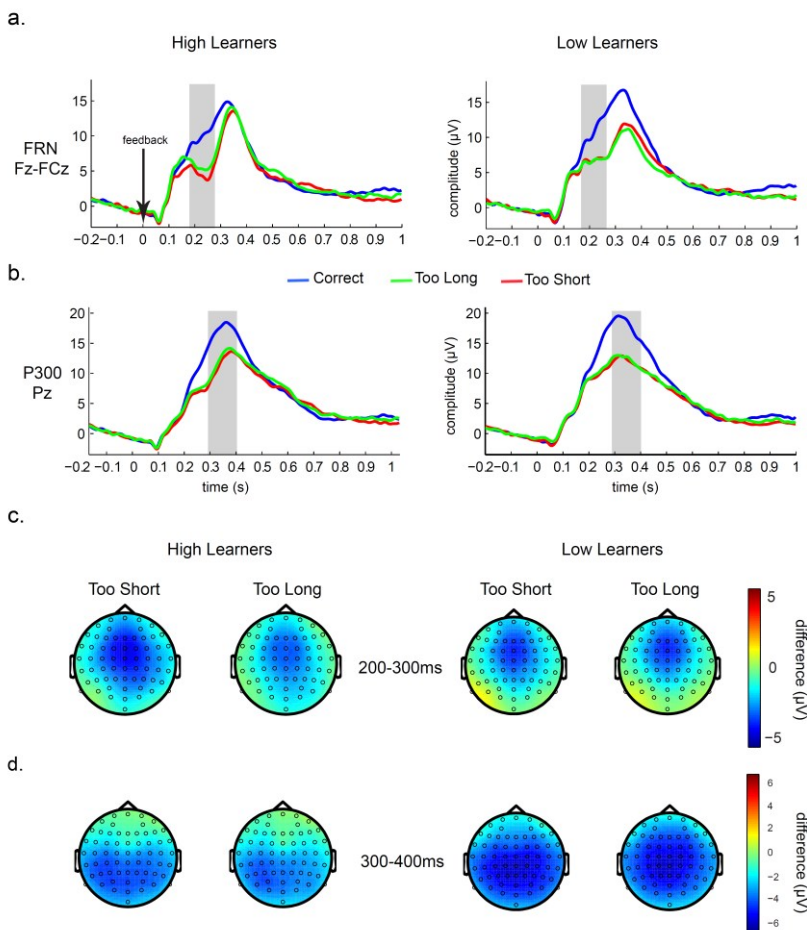


Figura 2. Resultados dos ERPs para feedback correto vs. incorreto.

ERPs após as três categorias de *feedback* (azul: “correto”; vermelho: “muito curto”; verde: “muito longo”); (a) amplitude média em FCz e Fz para bons (lado esquerdo) e maus aprendizes (lado direito); (b) amplitudes em Pz para bons e maus aprendizes; (c) topografia entre 200 e 300 ms após o *feedback* para as diferenças entre o *feedback* correto e as duas categorias incorretas (muito curto e muito longo) para bons e maus aprendizes; (d) as mesmas diferenças apresentadas em “c”, mas na janela de tempo do P300; as cores representam as diferenças entre as condições.

Foram analisadas as correlações entre os ERPs em FCz, Fz e Pz e o desempenho na tarefa na primeira e segunda metade da mesma nas condições com e sem *feedback*. Nenhuma correlação estatisticamente significativa foi encontrada ($p > .1$). Foram também comparados os ERPs nas tentativas precedentes a ajustes corretos e incorretos, mas nenhuma diferença no FRN ou P300 foi encontrada. Além disso, não foram observados *clusters* para a diferença nos ERPs em tentativas precedentes a ajustes corretos e incorretos.

4.3.3 Decomposições de tempo-frequência

As diferenças nas representações de tempo-frequência entre *feedback* correto e incorreto podem ser visualizadas na figura 3. A diferença principal foi observada na faixa de frequência teta (4-8 Hz), com maiores amplitudes para respostas incorretas, em ambas as categorias de *feedback*: “muito curto” e “muito longo”. Maus aprendizes (figura 3^a, segunda linha) apresentaram um menor aumento na energia relativa de teta em resposta ao *feedback* incorreto em comparação aos bons aprendizes (figura 3a, primeira linha). Além disso, a energia espectral relativa das frequências acima de 10 Hz reduziram após o *feedback*, o que significa que houve uma dessincronização nestas frequências; este efeito foi mais evidente nos bons aprendizes. A distribuição topográfica da energia relativa de teta entre 200 e 500 ms após o *feedback* é média-frontal, mais forte após *feedback* indicando erro no grupo dos bons aprendizes.

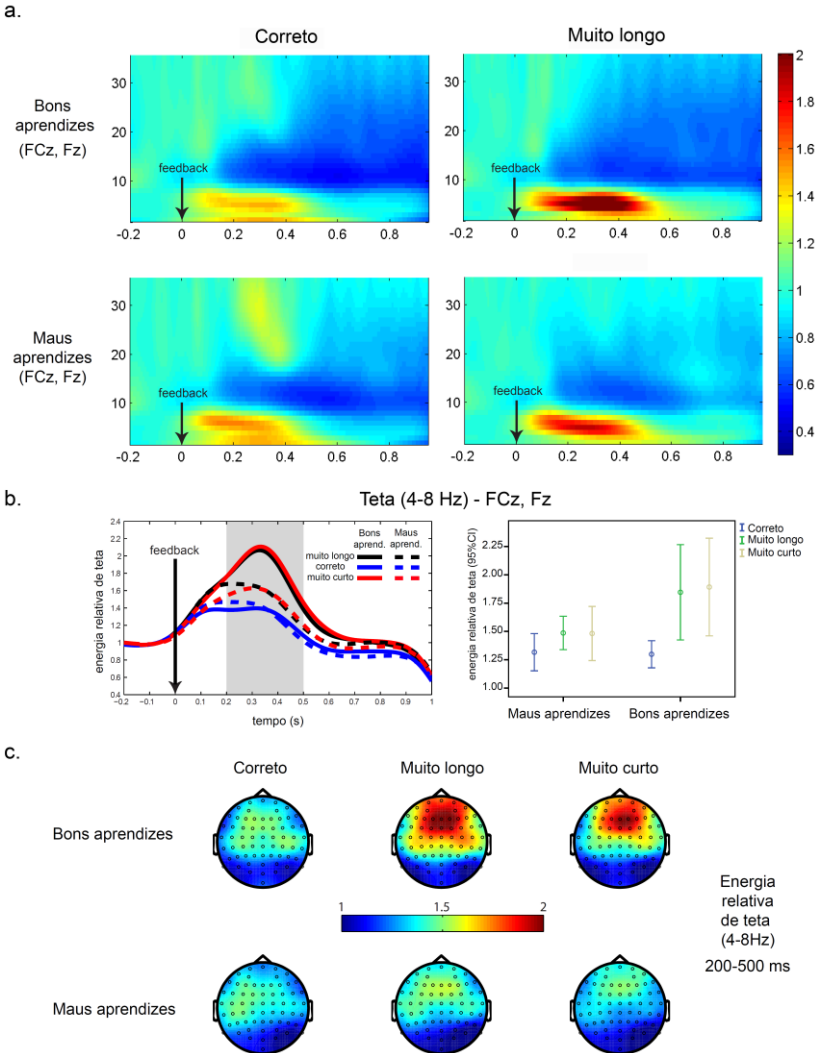


Figura 3. Resultados das TFRs. (a) TFRs após *feedback* indicando correto ou incorreto para bons e maus aprendizes; (b) lado esquerdo: curso temporal da energia relativa de teta em FCz e Fz para bons e maus aprendizes após os *feedbacks*: “muito longo” (preto), “muito curto” (vermelho) e “correto” (azul); lado direito: média e ICs da energia relativa de teta (FCz e Fz) na janela de tempo destacada em cinza na figura à esquerda; (c) topografia da energia relativa de teta na janela de tempo em cinza em ambos os grupos e condições.

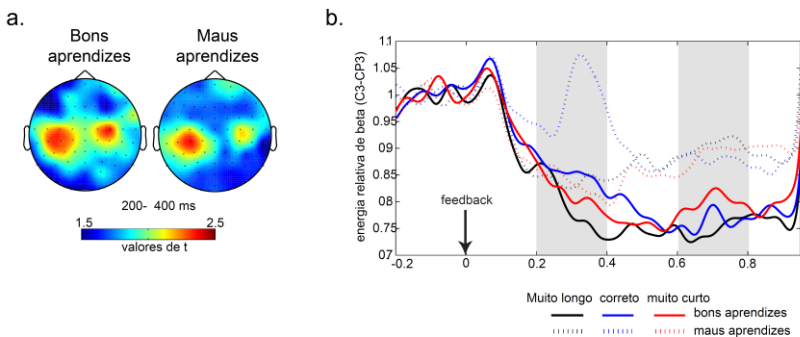
O efeito do *feedback* (“muito curto”, “muito longo” e “correto”) na energia relativa de teta em FCz entre 200 e 500 ms foi estatisticamente significativo ($F(1.25, 34) = 10.668, p = .001, \eta^2 = .239$), bem como a sua interação com **grupo de aprendizagem** ($F(1.25, 34) = 5.280, p = .020, \eta^2 = .134$). Não houve efeito significativo de **grupo de aprendizagem** sozinho ($F(1, 34) = 3.164, p = .084$). Contrastes indicaram que apenas o grupo dos bons aprendizes apresentou um aumento significativo na energia de teta em resposta ao *feedback* de erro (“muito longo” e “muito curto”) em comparação com o de acerto. Neste grupo, dos bons aprendizes, a energia relativa de teta durante 200 a 500 ms após o *feedback* incorreto foi significativamente mais alta do que para o “correto”, tanto quando o *feedback* incorreto foi “muito curto” ($t_{(17)} = 3.601, p = 0.002$) quanto quando foi “muito longo” ($t_{(17)} = 3.367, p = 0.004$). No grupo dos maus aprendizes, estas diferenças não foram estatisticamente significativas ($t_{(17)} < 1.5, p > 0.2$). Testes t para amostras independentes demonstraram que a diferença entre os grupos na energia relativa de teta entre 200 e 500 ms após o *feedback* foi estatisticamente significativa para ambas categorias, “muito longo” ($t_{(34)} = -2.053, p = .0480$) e “muito curto” ($t_{(34)} = -2.069, p = .046$), mas não após ter “correto” como *feedback* ($t_{(34)} = 0.321, p = .750$).

Foi encontrada uma dessincronização em beta (17-24 Hz) após a apresentação do *feedback*, sendo esta maior após *feedback* incorreto, tanto a categoria “muito longo” quanto a “muito curto”. Ao comparar a energia relativa de beta após *feedback* correto e incorreto em todos os eletrodos, foi verificado que esta diferença foi maior nas áreas centrais esquerdas, nos eletrodos frequentemente associados com o funcionamento sensoriomotor: C3 e CP3 (figura 4a). Nos gráficos de linha (figura 4b), é possível visualizar que as diferenças entre *feedback* correto e incorreto são maiores entre 200 e 400 ms após o mesmo. Após esse tempo, a diferença na energia relativa de beta entre *feedback* correto e incorreto reduz, mas a diferença entre bons e maus aprendizes se torna maior, uma vez que apenas os bons aprendizes sustentaram essa dessincronização de beta por mais tempo.

A energia relativa média de beta em C3 e CP3 entre 200 e 400 ms e entre 600 e 800 ms após o *feedback* foi inserida em uma 2 x 3 ANOVA com as variáveis **grupo de aprendizagem** (bons vs maus aprendizes) e *feedback* (“muito longo”, “muito curto” e “correto”), como fatores entre e intraparticipantes, respectivamente. Na primeira janela de tempo, 200-400 ms, houve um efeito significativo para o *feedback* ($F(1.24, 34) = 5.917, p = .014, \eta^2 = .148$); mas nenhuma

interação com **grupo** ($F(1.24, 34) = 1.178, p = .296$) nem tampouco efeitos para **grupo** ($F(1.24, 34) = 0.911, p = .347$) foram observados. Contrastes indicaram que a energia relativa de beta após feedback “correto” foi significativamente mais alta do que após “muito curto” ($t_{(35)} = 2.179, p = .036$) e “muito longo” ($t_{(35)} = 2.818, p = .008$). Por outro lado, na segunda janela de tempo (600-800 ms), houve um efeito significativo para **grupo** ($F(1, 34) = 6.326, p = .017, \eta^2 = .157$) e uma interação entre **feedback** e **grupo** ($F(1.52, 34) = 3.756, p = .041, \eta^2 = .099$), mas nenhum efeito para o **feedback** sozinho ($F(1.52, 34) = 0.956, p = .390$).

Além disso, foram analisadas as correlações entre a energia espectral relativa de beta (em C3 e CP3) e teta (em FCz e Fz) e o desempenho nos últimos três blocos sem *feedback*. Observou-se que apenas a energia relativa de beta foi linearmente correlacionada com o desempenho: quanto menor a energia relativa de beta (maior dessincronização) nas áreas sensoriomotoras, menor o erro absoluto médio nos três últimos blocos sem *feedback*. O curso temporal dessa correlação pode ser visualizado na figura 4c.



C. Correlações entre a energia espectral relativa e o desempenho

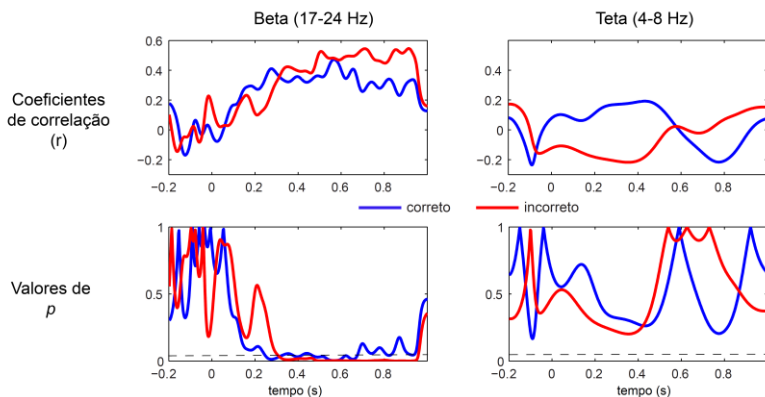


Figura 4. Correlações entre as oscilações beta e teta e o desempenho.

(a) Distribuição topográfica das diferenças (valores de t entre *feedback* correto e incorreto) na faixa de frequência beta (17-24 Hz) entre 200 e 500 ms após o *feedback*; (b) curso temporal da energia relativa de beta na média em C3 e CP3 para bons e maus aprendizes (linhas pontilhadas) em resposta ao *feedback* “muito longo” (preto), “muito curto” (vermelho) e “correto” (azul); (c) perfil temporal das correlações entre beta (figuras ao lado esquerdo), teta (ao lado direito), e o erro absoluto médio nos três últimos blocos sem *feedback* (segunda metade da tarefa). Os coeficientes de correlação para cada ponto no tempo são apresentados na primeira figura com os respectivos valores de significância estatística no segundo gráfico (a linha pontilhada marca o nível de alfa em 0.05).

4.3.4 Análise de conectividade

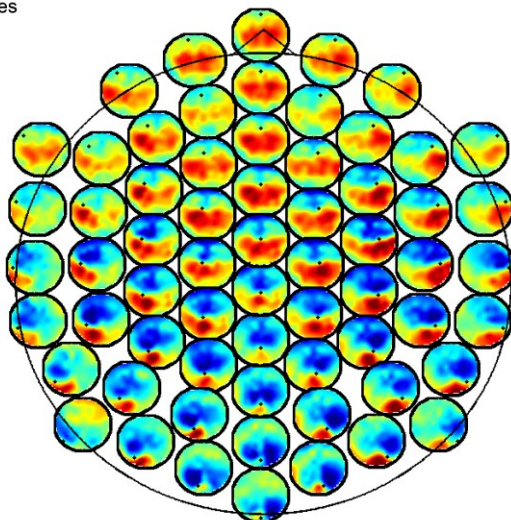
Foram analisadas as interações direcionadas em cada janela de tempo de 300 ms, iniciando da resposta (-600 ms antes do *feedback* ser apresentado). Na primeira (-600 a -300 ms), terceira (0 a 300 ms) e quarta (300 a 600 ms) janelas de tempo, houveram interações significativas na frequência teta (6.7 Hz). Foi analisada a frequência teta devido à mesma ter apresentado valores mais altos de PSI, conforme pode ser observado na figura 9b. De maneira importante, esta interação foi significativa (valores absolutos de PSI maiores que 2, na média) apenas no grupo dos bons aprendizes, para ambos os tipos de *feedback*: correto e incorreto. A distribuição topográfica das conexões na janela antes e depois do *feedback* nos bons aprendizes pode ser visualizada na figura 5, *heads-in-head*. Na figura 6, são apresentadas as conexões entre 300 e 600 ms após o *feedback* incorreto (“muito longo”) e correto, novamente, para os bons aprendizes. Na figura 7 e 8 são apresentados os resultados das mesmas análises no grupo dos maus aprendizes.

Imediatamente após a resposta (-600 a -300 ms), observou-se um aumento na conectividade direcionada das áreas médias-frontais às porções centrais e parietais, com pico em C3. Na janela de tempo seguinte (-300 ms até o *feedback*), a topografia permaneceu a mesma, mas os valores PSI reduziram. Após o *feedback*, no entanto, a direção dessas conexões reverteu, indicando que as áreas médias-frontais passaram a receber *inputs* das regiões centrais esquerdas e também médias (figura 5b). Na quarta janela de tempo (300 a 600 ms), a distribuição topográfica das conexões na frequência teta mudou: o fluxo foi das áreas médias centrais para as regiões pré-frontais, conforme pode ser observado na figura 6a. A janela de tempo seguinte mostrou um padrão similar com menores valores de PSI.

a. Bons aprendizes

$f = 6.7$ Hz

0 à 300 ms
após a
resposta



b. Bons aprendizes

$f = 6.7$ Hz

0 à 300 ms
após o
feedback
correto

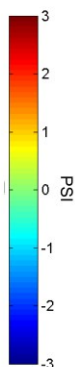
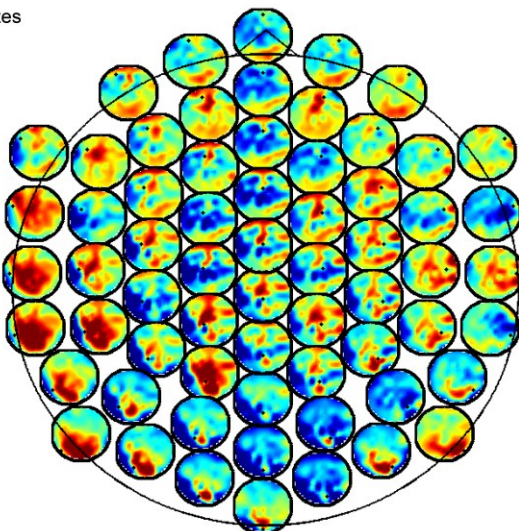


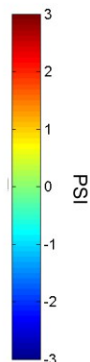
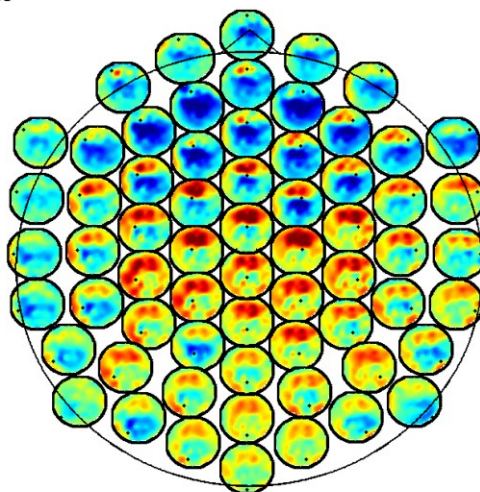
Figura 5. Conectividade PSI nos bons aprendizes 1.

PSI no grupo dos bons aprendizes na frequência teta: (a) de 0 a 300 ms após a resposta; e (b) de 0 a 300 ms após o *feedback* indicando “correto”. Nestas figuras, cada mini topomapa representa um canal de EEG, sendo que as cores dentro dos mesmos representam as conexões com o dado canal. Cores azuis indicam que este canal está sendo guiado pelas áreas nessa cor, enquanto que cores vermelhas indicam que este canal está guiando tais áreas. Em geral, valores *PSI* maiores que dois são considerados significativos.

a. Bons aprendizes

$f = 6.7 \text{ Hz}$

300 à 600 ms
após o
feedback
"muito curto"



b. Bons aprendizes

$f = 6.7 \text{ Hz}$

300 à 600 ms
após o
feedback
"correto"

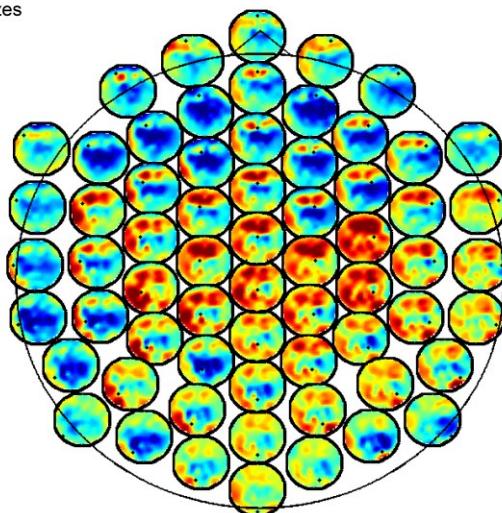
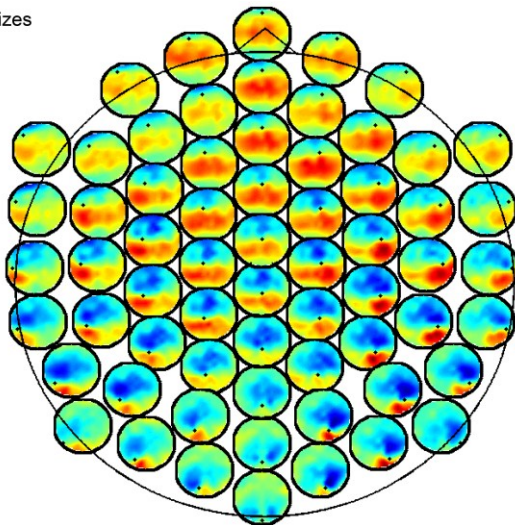


Figura 6. Conectividade PSI nos bons aprendizes 2. *Phase Slope Index (PSI)* para o grupo dos bons aprendizes (a) de 300 a 600 ms após o *feedback* indicando erro ("muito longo"); e (b) PSI na mesma janela de tempo, mas após o *feedback* indicando "correto". Observe que as conexões são das áreas médias centrais para as áreas pré-frontais, especialmente esquerdas.

a. Maus aprendizes

$f = 6.7 \text{ Hz}$

0 à 300 ms
após a
resposta



b. Maus aprendizes

$f = 6.7 \text{ Hz}$

0 à 300ms
após o
feedback
"correto"

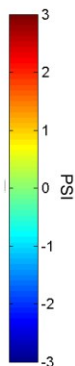
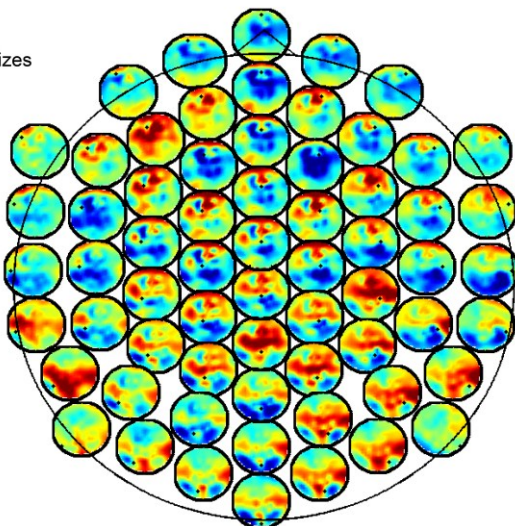


Figura 7. Conectividade PSI nos maus aprendizes 1. Essa figura mostra exatamente a mesma análise contida na figura 5, mas para o grupo dos maus aprendizes. Observe que os valores PSI são menores do que para os bons aprendizes (figura 5a), e que após o *feedback*, não há topografia ou padrão de conexão claro.

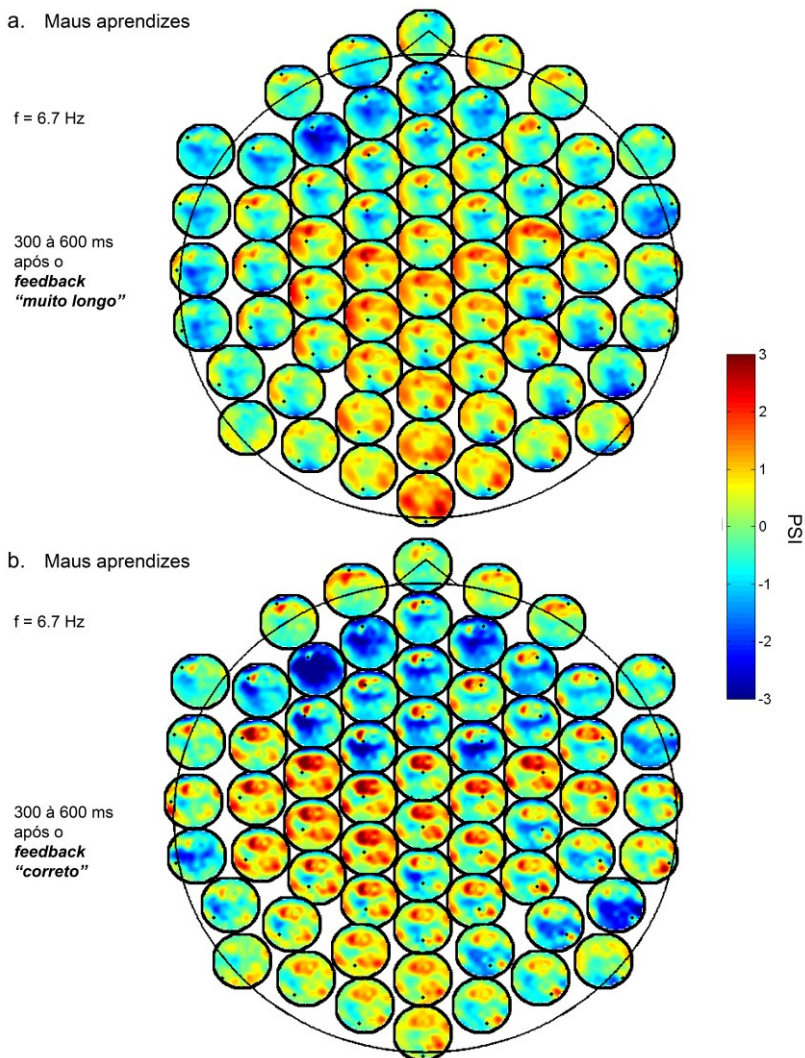


Figura 8. Conectividade PSI nos maus aprendizes 2. Essa figura mostra a mesma análise da figura 6, mas para o grupo dos maus aprendizes. Observe que o padrão de conexão é mais forte após o *feedback* "correto" (b) do que após o incorreto, ou "muito longo" (a). A topografia das conexões para o *feedback* "correto" é semelhante ao que foi apresentado pelos bons aprendizes.

Devido ao interesse nas conexões das regiões com FCz, que é frequentemente implicado nos processos de monitoramento do desempenho (Cavanagh, et al., 2010; van de Vijver, et al., 2011), foram analisados os valores de PSI em todas as conexões com FCz. O curso temporal da conectividade com esta área nos bons e maus aprendizes pode ser observada na figura 9a. É possível observar que a conectividade é maior para os bons aprendizes e com uma topografia diferente após o *feedback*. Na figura 9b, observa-se o fluxo para (PSI negativos) e de (PSI positivos) FCz em todas as frequências analisadas (a janela de tempo entre -300 a 0 ms não foi apresentada por ser similar a -600 e -300 ms, mas com valores inferiores).

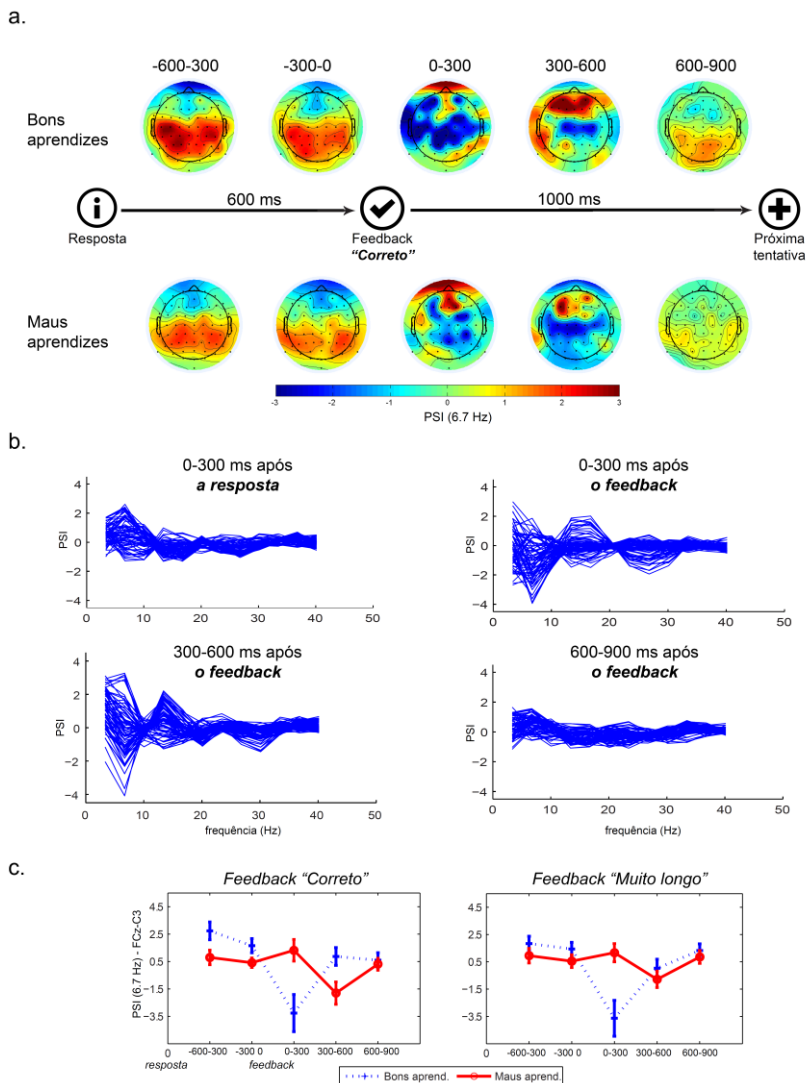


Figura 9. Conexões direcionadas (PSI): de e para FCz. (a) Distribuição topográfica do PSI referenciado à FCz para bons e maus aprendizes. Áreas com cores avermelhadas são guiadas por FCz enquanto que áreas em azul são as líderes de FCz; (b) os valores PSI em cada frequência analisada para a conexão entre FCz e todos os canais posteriores nas janelas de tempo especificadas; (c) Média e EP da média em todas as janelas de tempo após *feedback* "correto" e "muito longo" para bons e maus aprendizes.

A fim de comparar as condições e grupos de aprendizagem, extraiu-se os valores de PSI para o par FCz-C3/C5 (média) em todas as condições e janelas de tempo. Na figura 7c, é possível observar que, após o *feedback*, FCz começa a receber *inputs* de C3, mas apenas no grupo dos bons aprendizes. O par FCz-F5 foi também analisado, devido às conexões observadas nas janelas de tempo de 300 a 600 ms e 600 a 900 ms após o *feedback*. Considerando que foram encontrados três padrões de conectividade na frequência teta, e que na segunda (-300 até o *feedback*) e na última (600 a 900 ms) janelas de tempo nenhum padrão novo ou interessante foi encontrado, as análises estatísticas foram conduzidas nas seguintes janelas de tempo: 1) -600 a -300 ms antes *feedback* ou 0 a 300 ms após a resposta; 2) de 0 a 300 ms após o *feedback*; 3) de 300 a 600 ms após o *feedback*.

Na primeira janela de tempo, de 0 a 300 ms após a *resposta*, o PSI entre FCz e C3/C5 foi inserido como variável dependente em uma 2 x 3 ANOVA de desenho misto, com o fator **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) e **feedback** (“muito longo”, “muito curto” e “correto”) como fatores entre e intraparticipantes, respectivamente. Os resultados mostraram que não houve efeitos significativos para todas as comparações, incluindo **feedback** ($F(2, 34) = 1.001, p = .373$), **grupo** ($F(1, 34) = 2.447, p = .127$) e interação ($F(2, 34) = 1.583, p = .213$). Foram encontradas, no entanto, correlações significativas entre este valor de PSI e o desempenho nos blocos de *feedback*, independente da categoria do *feedback*. Desta forma, quanto maior o PSI em teta entre FCz e C3/C5 após o *feedback* “correto”, mais eficientes foram feitos os ajustes na primeira ($r = 0.421, p = .011$) e na segunda metade da tarefa ($r = 0.434, p = .008$). As mesmas correlações foram válidas para o após resposta incorreta: “muito longa” (1ª metade: $r = 0.451, p = .006$; 2ª metade: $r = 0.339, p = .043$) e “muito curta” (1ª metade: $r = 0.347, p = .038$; 2ª metade: $r = 0.364, p = .029$). Foi também verificado que quanto maior o PSI para essa conexão após tentativas corretas, menor o erro ($r = -.393, p = .018$) e a variabilidade ($r = -.425, p = .010$) nos blocos sem *feedback* da segunda metade da tarefa.

Após o *feedback*, a direção da conectividade entre FCz e C3/C5 reverteu, resultando em valores PSI negativos, que foram submetidos à uma 2 x 3 ANOVA de desenho misto com os mesmos fatores descritos no parágrafo anterior. Não foram encontrados efeitos significativos para **feedback** ($F(2, 34) = 1.035, p = .361$), bem como não houve interação entre **feedback** e **grupo** ($F(2, 34) = 0.781, p = .462$). Houve, no entanto, um efeito significativo para **grupo** ($F(2, 34) = 4.927, p = .033, \eta^2 =$

.127) que indicou maiores valores PSI (negativos) nos bons aprendizes, o que significa que estes participantes apresentaram um maior fluxo de sinais das áreas centrais esquerdas (C3 e C5) para FCz. Testes t-independentes demonstraram haver uma diferença significativa na PSI entre bons e maus aprendizes em resposta a todas as categorias de *feedback*: ‘correto’ ($t_{(34)} = 2.567, p = .015$), ‘muito longo’ ($t_{(34)} = 2.309, p = .027$) e ‘muito curto’ ($t_{(34)} = 2.205, p = .034$). Foram também encontradas correlações significativas entre o PSI deste par e a eficiência de ajuste na segunda metade da tarefa, em resposta a todas as categorias de *feedback*: “muito longo” ($r = -0.536, p = 0.001$), “muito curto” ($r = -0.558, p < .001$) e “correto” ($r = -0.439, p = .007$). Além disso, quanto mais negativos os valores de PSI entre FCz e C3/C5 em resposta ao *feedback*, menor o erro na segunda metade da tarefa nos blocos com *feedback*, novamente, para todas as categorias de *feedback*: “muito longo” ($r = 0.444, p = .007$), “muito curto” ($r = 0.438, p = .007$) e “correto” ($r = 0.398, p = .016$).

Com o objetivo de analisar se a conectividade entre FCz e C3/C5 mudou significativamente após o *feedback*, foram comparados os efeitos simples entre *antes* e *depois* do *feedback* por meio de testes-t pareados, para os bons e maus aprendizes separadamente. Os resultados indicaram que apenas o grupo dos bons aprendizes aumentou significativamente a conectividade nesse par em resposta ao *feedback*, quando comparado com a linha de base (de 0 a 300 ms após a resposta), para todas as categorias de *feedback*: “muito longo” ($t_{(17)} = 3.624, p = .002$), “muito curto” ($t_{(17)} = 3.277, p = .004$) e “correto” ($t_{(17)} = 3.551, p = .002$). Nenhuma diferença estatisticamente significativa foi observada no grupo dos maus aprendizes, para todas as categorias de *feedback*, incluindo “muito longo” ($t_{(17)} = 0.765, p = .455$), “muito curto” ($t_{(17)} = 0.656, p = .520$) e “correto” ($t_{(17)} = 0.307, p = .763$).

De 300 a 600 ms após o *feedback*, a análise foi focada na conexão entre FCz e F5. Resultados estatísticos com o PSI entre FCz-F5 como variável dependente e os mesmos fatores entre e intraparticipantes das ANOVAs anteriores, revelaram um efeito significativo para *feedback* ($F(1.67, 34) = 5.181, p = .012, \eta^2 = .132$) e uma interação significativa entre *feedback e grupo* ($F(1.67, 34) = 4.311, p = .024, \eta^2 = .113$). O efeito principal do *feedback* se deve à superior conectividade após o *feedback* “correto” do que incorreto, tanto o “muito longo” ($t_{(17)} = 2.037, p = .049$) quanto o “muito curto” ($t_{(17)} = -2.745, p = .009$). A interação está relacionada ao fato de que somente o grupo dos maus aprendizes demonstraram uma maior conectividade em resposta ao

feedback correto, comparado ao incorreto, incluindo ambos “muito curto” ($t_{(17)} = -2.917, p = .010$) e “muito longo” ($t_{(17)} = -2.917, p = .010$), enquanto que os bons aprendizes apresentaram uma conectividade aumentada neste par em resposta a todos os tipos de *feedback*, sem diferenças significativas entre os mesmos ($p > .3$). É importante ressaltar, no entanto, que os bons aprendizes mostraram maiores valores PSI em resposta a todas as categorias de *feedback*, não apenas ao *feedback* “correto”, como foi o caso dos maus aprendizes.

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Diferenças nos ERPs e desempenho entre bons e maus aprendizes

Os resultados comportamentais indicaram que os participantes aprenderam ou melhoraram as suas estimativas temporais ao longo da tarefa. As diferenças no desempenho durante os blocos com e sem *feedback* indicaram que esta informação teve um importante papel no desempenho da tarefa, permitindo aos participantes constantemente ajustar as suas estimativas na direção do alvo. Durante a segunda metade da tarefa, esta diferença no desempenho entre os blocos com e sem *feedback* reduziu, evidenciando que os participantes desenvolveram melhores representações internas da habilidade, que os ajudou a manter a *performance* mesmo quando o *feedback* não estava disponível. Além disso, bons aprendizes demonstraram menor diferença no desempenho entre blocos com e sem *feedback*, o que indica que eles desenvolveram melhor representação interna do intervalo. Vale destacar que, a principal interação entre grupo de aprendizagem e desempenho foi em relação à eficiência do ajuste: apenas os bons aprendizes mostraram uma melhora significativa na capacidade de realizar ajustes eficientes ao *feedback*. É importante ressaltar que esta tarefa, de produção temporal, tem sido utilizada para investigar o processamento de *feedback*, mas os processos de aprendizagem envolvidos nessa tarefa não foram referidos, com a exceção de um estudo (van de Vijver, et al., 2011), no qual uma tarefa de produção temporal modificada foi utilizada para investigar aprendizagem. Este é um destaque importante, pois o processo de aprendizagem envolvido na produção de um intervalo de tempo é procedural, enquanto que os processos de aprendizagem por reforço,

investigados em muitos estudos utilizando tarefas de tomada de decisão ou aprendizagem probabilística são explícitos e exigem que os participantes explorem diferentes opções por meio de um procedimento mental de teste de hipóteses. Aprendizagem procedural pode ser definida como uma forma específica de aprendizagem implícita, na qual a habilidade aumenta por meio da repetição de tentativas, sem o desenvolvimento concomitante do conhecimento explícito que poderia explicar tais melhoras (Krebs et al., 1998; Krebs, Hogan, Hening, Adamovich, & Poizner, 2001).

Os resultados dos ERPs replicaram os de outros estudos demonstrando que o FRN é provocado pelo *feedback* incorreto ou negativo (Bellebaum & Daum, 2008; Chase, et al., 2011; Heldmann, et al., 2008; Miltner, et al., 1997). Além disso, foi encontrado um maior P300 em resposta ao *feedback* “correto”, que vai ao encontro de outros estudos que verificaram um maior P300 após o *feedback* positivo, ou após a recompensa (Bellebaum & Daum, 2008; Hajcak, et al., 2007; Sailer, et al., 2010; van der Helden, et al., 2010). A diferença entre *feedback* indicando acerto e erro no P300 não pode ser explicada pela novidade ou pela frequência do *feedback* positivo uma vez que neste estudo, as três categorias de *feedback* foram igualmente prováveis; ademais, outro estudo encontrou maior P300 para *feedback* correto independente da probabilidade da recompensa (Bellebaum & Daum, 2008). Além disso, se os seres humanos têm de fato um viés superotimista, conforme foi sugerido por outro estudo (Oliveira, et al., 2007), o *feedback* positivo estaria associado a um menor P300, pois o seu viés otimista o tornaria mais esperado. Dessa forma, sugere-se que o *feedback* “correto” desperte o componente P300 que ativa a atenção para promover operações de memória nas áreas têmporo-parietais, como foi evidenciado ser a função do P3b (Polich, 2007).

Não foram encontradas diferenças significativas entre bons e maus aprendizes em relação ao FRN, o que está de acordo com outro estudo (Sailer, et al., 2010), que utilizou uma tarefa de tomada de decisão para testar a diferença entre participantes que aprenderam e que não aprenderam a regra da tarefa. Os autores verificaram que o FRN reduziu na segunda metade da tarefa, mas que esta redução foi similar para bons e maus aprendizes. Por outro lado, eles observaram que somente os bons aprendizes apresentaram uma redução significativa no P300 na segunda metade da tarefa, indicando que este componente de ERP foi mais sensível à aprendizagem da tarefa.

Por outro lado, outros estudos (Santesso et al., 2008; van der Helden, et al., 2010) encontraram que o FRN é relevante para a

aprendizagem. Santesso et al. (2008) demonstraram que os bons aprendizes apresentaram um menor e mais positivo FRN em resposta ao *feedback* incorreto em relação aos maus aprendizes, sugerindo que os aprendizes apresentaram sinais de reforço mais fortes na porção dorsal do ACC, que foi observada como a mais provável origem cerebral do FRN em tal estudo. Além disso, utilizando ressonância magnética funcional para investigar as diferenças individuais na aprendizagem por reforço, eles encontraram que os bons aprendizes apresentaram maior ativação nos gânglios basais em resposta à recompensa. No presente estudo, foi encontrada uma tendência para um FRN mais positivo nos bons aprendizes, como em Santesso et al. (2008), mas esta diferença não foi estatisticamente significativa. Uma diferença principal entre o presente estudo e o citado, é que os paradigmas empregados requeriam tipos diferentes de aprendizagem. Enquanto tarefas de tomada de decisão e aprendizagem probabilística requerem um processo de aprendizagem que envolve o teste de hipóteses ou processos explícitos, a tarefa de produção temporal requer que o participante aprenda repetindo e mapeando as associações entre resposta e resultados, como em um mapa sensoriomotor. Assim, no presente estudo, os participantes estavam constantemente tentando ajustar as suas estimativas, mapeando o quanto de mudança em tempo ou velocidade de resposta era necessário para ajustar e corrigir uma estimativa errada.

4.4.2 Sincronização de teta e dessincronização de beta em resposta ao feedback

O aumento na energia espectral de teta em resposta ao *feedback* incorreto está de acordo com outros estudos, pois demonstra que o *feedback* negativo ou de erro está associado com um aumento na energia de teta nas áreas médias-frontais (Cavanagh, et al., 2011; Cavanagh, et al., 2010; Cavanagh, et al., 2012; Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2009; Cohen, et al., 2007; van de Vijver, et al., 2011). Juntos, estes estudos sugerem que as oscilações na frequência teta refletem a atividade do sistema de monitoramento do desempenho. Evidências recentes (Cavanagh, et al., 2012) sugerem que as oscilações teta na área média-frontal são sensíveis à diversas características do *feedback*, como novidade, conflito, punição e erro.

Também foi encontrada uma interação entre *feedback* e aprendizagem: apenas os bons aprendizes apresentaram aumentos significativos na energia de teta após o *feedback* incorreto. Sugere-se que há diferenças individuais na reatividade média-frontal em resposta ao *feedback* que diferenciou os bons e maus aprendizes deste estudo. No entanto, a energia de teta não foi linearmente correlacionada com o desempenho nos blocos sem *feedback*, o que leva à hipótese de que este sinal pode servir mais para fins de monitoramento do que para o desenvolvimento de representações internas da habilidade aprendida. Cavanagh et al. (2011) encontrou que a energia de teta também reflete o grau de incerteza contido em cada opção ou *feedback*, e que a energia de teta após o *feedback* incorreto era maior em participantes que utilizaram esta incerteza para guiar a exploração de novas estratégias. Dessa forma, sugere-se que as oscilações em teta refletem aspectos do processamento de *feedback* que são importantes para a aprendizagem e para o monitoramento do desempenho, mas que as mesmas não se correlacionam com o desempenho se a tarefa requer uma estratégia de repetição, ou seja, tarefas procedurais que requerem a redução progressiva do erro, por meio de uma mesma estratégia, como na maioria das tarefas motoras.

A energia espectral relativa de beta, por outro lado, foi inversamente correlacionada com o desempenho durante os blocos sem *feedback*. Os resultados indicaram uma dessincronização sustentada de beta nas áreas sensoriomotoras esquerdas (eletrodos C3 e CP3) em resposta ao *feedback* incorreto e correto, dessincronização esta que é positivamente correlacionada com o desempenho: quanto mais beta dessincroniza nessas áreas, melhor o desempenho do participante nos blocos sem *feedback*. Este resultado vai ao encontro de outros estudos mostrando que o *feedback* correto (van de Vijver, et al., 2011) recompensas em tarefas de aposta (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares, et al., 2008; Marco-Pallares, et al., 2009) está associado com maior energia espectral de beta. A faixa de frequência de beta encontrada nos estudos utilizando tarefas de aposta foi mais alta (+/- 20-30 Hz) do que a encontrada na pesquisa utilizando *feedback* de desempenho (17-24 Hz) e do que a verificada no presente estudo (17-24 Hz).

Em um estudo utilizando tarefa de aposta (Marco-Pallares, et al., 2008) foi sugerido que esses aumentos na energia de beta servem como um marcador neural da recompensa que é originado no córtex ventromedial orbitofrontal (OFC). De fato, ao inspecionar visualmente as figuras publicadas no referido estudo, observa-se claramente uma sincronização ou um aumento na energia de beta na área média-frontal

em resposta ao *feedback* positivo. No entanto, na pesquisa com *feedback* de desempenho (van de Vijver, et al., 2011), bem como no presente estudo, a inspeção visual do curso temporal de beta revela que após uma breve sincronização de beta que dura até 200 ms, a energia espectral nessa frequência reduz, na janela de tempo na qual há diferença entre *feedback* correto e incorreto inicial. Dessa forma, sugere-se que o fenômeno observado nos estudos com *feedback* de desempenho é a dessincronização de beta e não a sincronização, e que tal redução de energia em beta é maior em resposta ao *feedback* incorreto. Além disso, a topografia de beta encontrada para a diferença entre *feedback* correto e incorreto nessa janela de tempo (200-500 ms) foi central e lateralizada à esquerda. Não é possível comparar a topografia de beta encontrada no presente estudo com àquela observada por van de Vijver et al. (2011) porque foram utilizadas janelas de tempo distintas para analisar a topografia. Dessa forma, três razões indicam que a resposta de beta encontrada nos estudos com recompensa utilizando tarefas de aposta (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares, et al., 2008) refletem um processo cognitivo diferente do encontrado em resposta ao *feedback* de desempenho (van de Vijver et al., 2011) e o presente estudo: 1) a faixa de frequência; 2) a topografia; 3) o curso temporal da energia de beta.

Considerando que a dessincronização de beta nas áreas centrais esquerdas estão associadas com a ativação de regiões cerebrais sensoriomotoras para diferentes propósitos, como imaginação motora, planejamento e preparação do movimento (Pfurtscheller & Neuper, 1997; Pfurtscheller, Pregenzer, & Neuper, 1994; Tombini et al., 2009; Velasques et al., 2007; Wheaton, Shibasaki, & Hallett, 2005; Yuan et al., 2010), propõe-se que o *feedback* indicando uma resposta incorreta possa despertar processos de recuperação e ajuste mental da tentativa passada a fim de corrigir o movimento para o futuro. Se este for o caso, seria importante dessincronizar beta, ou seja, ativar tais áreas para revisar tanto tentativas corretas quanto às incorretas, o que pode explicar porque as correlações foram significativas entre o desempenho e a dessincronização de beta em resposta a todas as categorias de *feedback*. Ainda não existe, no entanto, evidência suficiente para dar suporte a esta hipótese, fato que sinaliza a necessidade de cautela ao analisar esta interpretação; ademais, esses resultados indicam que são necessários mais estudos utilizando paradigmas de aprendizagem implícita ou de aprendizagem motora. Outra importante limitação é a falta de resolução espacial adequada do EEG, que não permite saber ao certo se os efeitos encontrados nos eletrodos sob as áreas centrais esquerdas refletem de fato a ativação das regiões sensoriomotoras. Dessa forma, sugere-se que

esta investigação seja replicada utilizando algoritmos avançados de localização de origem com base em imagens estruturais de ressonância (MRIs) individuais de cada sujeito, bem como a utilização de equipamentos com maior resolução espacial, como fMRI.

4.4.2 Conectividade direcionada de teta para o processamento de *feedback*

Um dos principais pressupostos do novo modelo proposto para a compreensão dos mecanismos cerebrais da aprendizagem guiada por *feedback* (Cohen, et al., 2011) é que a aprendizagem está associada com mudanças na sincronização da atividade cerebral que são moduladas de cima para baixo e refletidas nas diferenças intra e entressujeitos em relação à sincronização entre diferentes áreas cerebrais. Por exemplo, espera-se que participantes que aprendem melhor mostrem um aumento na sincronização entre áreas em resposta ao *feedback*. Cohen et al. (2011) destacam que o problema de condução de volume pode prejudicar a análise de sincronização entre áreas; os autores complementam afirmando que mesmo que algumas técnicas ajudem a minimizar o problema, é importante distinguir sincronização verdadeira de energia espectral correlacionada. No presente estudo, foi empregado um método de análise de conectividade que é insensível ao problema de condução de volume porque está baseado na parte imaginária da coerência (Nolte, et al., 2008). Além disso, a conectividade direcionada em resposta ao *feedback* não foi, até a presente data, investigada em humanos. O *phase slope index*, método utilizado neste estudo, permite inferir a direção da relação entre duas áreas, com a vantagem de ser menos sensível a ruído do que a Causalidade de Granger, outra técnica reconhecida para investigar conectividade direcionada (Nolte, et al., 2008).

Foram encontrados três padrões principais de conectividade direcionada em três momentos diferentes da tentativa: 1) imediatamente após a resposta (0 à 300 ms); 2) imediatamente após o *feedback* (0 à 300 ms); e 3) de 300 a 600 ms após o *feedback*. Após a resposta, foi observado um fluxo de sinais partindo da área média-frontal para as áreas centro-parietais, atingindo o seu máximo no eletrodo C3. Este padrão foi semelhante para bons e maus aprendizes e também, para tentativas corretas e incorretas. No entanto, esta conexão foi moderadamente correlacionada com o desempenho na tarefa, especialmente com a eficiência do ajuste, indicando que quanto maior o

fluxo de FCz para C3-C5, maior a eficiência da correção feita após o *feedback*. Não foram encontrados resultados comparáveis na literatura, mas especula-se que essa conexão reflita um processo de monitoramento de desempenho utilizando informação interna, ou seja, após a resposta motora, a área média-frontal se comunica com as regiões sensoriomotoras, a fim de checar o estado do sistema motor buscando por erros. Devido à ausência de diferenças relacionadas à acurácia da resposta (“correta”, “muito longa”, “muito curta”) e entre grupos, foi hipotetizado que este mecanismo acontece independentemente da qualidade da resposta, como uma checagem do *status quo* das áreas sensoriomotoras.

Após o *feedback*, observou-se uma reversão na direção desse padrão, com sinais advindos das áreas centrais esquerdas para a área média-frontal. Apenas os bons aprendizes apresentaram um fluxo significativo de informação da área central esquerda para a média-frontal. É possível que apenas os bons aprendizes desenvolvessem uma boa representação sensoriomotora que permitisse a comparação entre o resultado desejado e obtido nessa região. Além disso, esse padrão foi também correlacionado com o desempenho de forma que os participantes com maiores valores PSI (mais negativos) nessa conexão foram mais capazes de ajustar e manter o desempenho mesmo quando o *feedback* não estava disponível.

Na terceira janela de tempo (300-600 ms), foi encontrado outro padrão de conectividade: das áreas médias centro-frontais para a região pré-frontal, especialmente esquerda. Nesta análise, foi testado se há conexão entre o par FCz-F5, também investigado em outras pesquisas (Cavanagh, et al., 2009; van de Vijver, et al., 2011). Foram encontradas diferenças entre *feedback* correto e incorreto, mas estas só foram significativas para o grupo dos maus aprendizes. Sugere-se que este padrão reflita um processo de atualização das expectativas por meio da codificação desse *feedback* na memória, com base na avaliação realizada nas áreas médias-frontais da diferença entre o *feedback* obtido e o esperado. Com base no papel conhecido do córtex pré-frontal dorsolateral (DLPFC) no processo de desenvolvimento de mapas de expectativas (Rahnev, Lau, & de Lange, 2011), sugere-se que essa conexão reflita o processo de atualização das expectativas. Mesmo que não se tenha resolução espacial suficiente para afirmar a região cerebral específica responsável por essa conexão, existe um estudo (Rusjan et al., 2010) mostrando que o DLPFC é mais bem atingido por estimulação magnética transcraniana (TMS) posicionando a bobina magnética sob

eletrodo F5 no sistema de padronizado 10-20 (o mesmo que foi utilizando no presente estudo).

As janelas de tempo nas quais a sincronização em teta entre regiões foram encontradas difere da investigada nos estudos citados. A sincronização entre a área média frontal entre 0 e 300 ms após o *feedback* não havia sido encontrada antes, em nenhum estudo publicado. Cavanagh, et al. (2010) encontrou um aumento na sincronização entre FCz e F6 e entre FCz e F5 de 200 a 500 ms após o *feedback* de erro (Cavanagh, et al., 2010). Outro estudo (van de Vijver, et al., 2011) também encontrou aumento na sincronização de fase em teta entre FCz e F5 de 100 a 500 ms, após o *feedback* de erro. Este último estudo também encontrou aumento na sincronização entre a área média-frontal e as regiões sensoriomotoras. Ambos os estudos citados sugeriram que estas conexões entre áreas refletem a necessidade de aumentar o controle cognitivo após o *feedback* de erro.

No entanto, esta hipótese não é apoiada pelos resultados do presente estudo pois a sincronização entre estas áreas foi maior após *feedback* positivo do que negativo, o que é exatamente o oposto do que eles encontraram. Além disso, se esta conexão fosse um sinal para aumentar o controle cognitivo, seria esperada uma maior sincronização no grupo dos bons aprendizes, que foi o grupo que apresentou os maiores aumentos na energia de teta após o *feedback* de erro. Outro fator importante é que apenas o grupo dos maus aprendizes diferiram na força dessa conexão após *feedback* positivo e negativo, com maior ativação após *feedback* positivo. O grupo dos bons aprendizes, por outro lado, apresentou aumento da conectividade entre essas áreas em resposta a ambos os tipos de *feedback*. Assim, sugere-se que a conexão entre FCz e F5 reflita um processo geral de atualização de expectativas com base na codificação do *feedback* na memória de trabalho, processo importante para a aprendizagem implícita. Considerando que ambos os erros e acertos devem ser atualizados na memória, a força da conexão não deve diferir entre os mesmos. Assim, o fato dos maus aprendizes terem diferido talvez indique que os mesmos priorizam a atualização dos acertos, com processamento mais fraco dos erros.

4.5 CONCLUSÃO

No presente estudo, foi demonstrado que a atividade oscilatória na faixa de frequência teta e beta é sensível às diferenças individuais relacionadas à aprendizagem da tarefa (bons vs. maus aprendizes),

enquanto que o FRN e o P300 são sensíveis apenas à valência do *feedback* (correto vs. incorreto), não correlacionados com o desempenho e insensíveis às diferenças entre os grupos. Foi sugerido que, enquanto as oscilações em teta desempenham um papel importante no monitoramento de erros, as oscilações em beta nas áreas sensoriomotoras estão relacionadas com a aquisição e desenvolvimento de representações internas da habilidade sendo aprendida. Além disso, foram encontrados padrões distintos de conectividade direcionada entre áreas cerebrais que podem refletir a dinâmica do processamento de *feedback*, não específico à sua valência (correto e incorreto). Bons aprendizes apresentaram sincronização mais forte, independentemente da valência do *feedback*, sendo igualmente fortes antes e depois da apresentação de *feedback* correto e incorreto. Ressalta-se que as interpretações dos resultados da sincronização entre áreas devem ser tomadas com cautela, pois são necessários mais estudos utilizando métodos comparáveis.

5 ESTUDO 3 – DIFERENÇAS NEUROFISIOLÓGICAS ENTRE O PROCESSAMENTO DE *FEEDBACK* GRADUADO E CATEGÓRICO PARA A APRENDIZAGEM

Neste estudo foram utilizados os dados dos experimentos 1 e 2, descritos nos dois capítulos anteriores. O objetivo do estudo 3 foi analisar as diferenças nos correlatos neurofisiológicos do processamento de *feedback* contendo a informação graduada ou detalhada do *feedback* com o categórico. No entanto, ressalta-se que os dados não são exatamente os mesmos apresentados nos estudos anteriores, pois diferentes métodos de análise de dados, bem como classificação das tentativas (estudo 1) foram utilizados. Esses procedimentos são descritos com detalhes neste capítulo.

RESUMO

Aprender com *feedback* de alta qualidade é possivelmente mediado por circuitos neurais diferentes daqueles utilizados para aprender por meio de recompensas ou informação categórica (correto vs. incorreto). Neste estudo foram investigadas as diferenças nos potenciais relacionados ao evento e nas oscilações em resposta a *feedback* graduado (alta qualidade) e categórico (baixa qualidade) em bons e maus aprendizes durante a aprendizagem de uma tarefa de produção temporal. Os resultados indicaram que os participantes que realizaram a tarefa com *feedback* graduado apresentaram menor erro e variabilidade, além de uma maior eficiência para ajustar as suas estimativas, com base no *feedback*. O FRN foi maior em resposta ao *feedback* graduado do que para o categórico, enquanto que a energia de teta aumentou mais após o *feedback* categórico indicando erro. Essas diferenças na energia de teta em resposta ao *feedback* incorreto categórico foram maiores nos bons aprendizes. Utilizando uma abordagem *beamformer*, observou-se que a porção dorsal direita do córtex cingulado anterior foi a fonte mais provável da diferença na energia de teta em resposta ao *feedback* categórico incorreto em relação ao graduado. Conclui-se que aprender por meio de informação incompleta ou categórica está relacionado à maior ativação nos sistemas neurais associados com a aprendizagem por meio de recompensas, com maior nível de incerteza inerente às mesmas.

Palavras-chave: Aprendizagem. *Feedback* de alta qualidade. Erro. Recompensa.

5.1 INTRODUÇÃO

Seres humanos têm uma capacidade notável de aprendizagem que os permite não apenas adquirir conhecimento, mas também, o superar, criando e recriando conceitos com base no que foi aprendido. Diferentes tipos de habilidades são aprendidas ao longo da vida, desde simples movimentos até conceitos abstratos mais complexos. O processo de aprendizagem difere de acordo com a natureza do conhecimento a ser adquirido; por exemplo, não é possível aprender andar de bicicleta apenas entendendo uma explicação de como fazê-lo, pois o processo de aprendizagem desta habilidade é procedural e implícito, ou seja, não depende de verbalização ou conhecimento explícito, e sim, de uma grande quantidade de prática. Outras habilidades, como por exemplo, aprender a operar o controle remoto da TV, podem ser explicadas e memorizadas explicitamente, o que significa que uma vez que se sabe as regras, horas de prática apertando os botões não são realmente necessárias, mesmo que essa repetição possa ajudar na memorização e na velocidade dos comandos (mas apertar um botão rapidamente é outra habilidade, que requer aprendizagem implícita).

Tarefas motoras são implícitas por natureza, pois a sua execução não depende puramente de conhecimento explícito, verbalizável. Desde tarefas mais simples, como marcar o ritmo com a ponta dos dedos, até habilidades mais complexas, como acertar um alvo móvel, aprender envolve adquirir conhecimento das ações e os seus respectivos resultados sensoriais, permitindo o desenvolvimento de mapas probabilísticos dinâmicos entre ambos (um modelo projetado à frente ou *forward model*). Ao desenvolvê-lo é possível não somente planejar e agir com base nesse mapa, mas também atualizá-lo toda vez em que nova evidência é apresentada ou em que uma nova tentativa é feita (Wolpert, et al., 2011; Wolpert & Flanagan, 2010).

Independente da modalidade sensorial, o processo de aprendizagem envolvido no desenvolvimento destes mapas pode ser definido com base no tipo de informação utilizada pelo sistema motor. Wolpert et al. (2011) descrevem dois processos principais: 1) a aprendizagem baseada em erro, na qual o *feedback* informa não somente que o objetivo não foi atingido, mas também a maneira específica pela qual isso ocorreu, indicado pela magnitude do erro; e 2) a aprendizagem baseada em recompensa na qual o *feedback* comunica o sucesso ou falha relativa de uma ação, sem prover informação específica de quanta

correção é necessária, ou seja, a informação de recompensa é categórica e, portanto, incompleta. Na aprendizagem baseada em erro, o resultado de um movimento é comparado com o que foi previsto (com base no mapa de expectativas) ou desejado, resultando em um erro de predição sensorial que é utilizado pelo sistema para ajustar a ação e atualizar as crenças do sistema, ou seja, o mapa. Na aprendizagem com recompensa ou aprendizagem por reforço, a recompensa esperada e a obtida são comparadas, gerando um erro de predição de recompensa (*reward prediction error* – *RPE*) que é usado pelo sistema para buscar por uma solução e atribuir crédito ou culpa às ações que levaram à tal resultado (Sutton & Barto, 1998).

É importante salientar que, a aprendizagem motora envolve ambos os processos, uma vez que em todas as habilidades aprendidas, o erro obtido em qualquer tentativa tem um valor de recompensa associado (Izawa & Shadmehr, 2011). Por exemplo, quando se está jogando tênis, o resultado do *topspin* é avaliado em termos de erro sensorial, dado pela diferença exata entre o local que a bola atingiu em relação ao local esperado ou desejado, e também em termos de sucesso ou não da jogada, ou seja, se o golpe resultou ou não em um ponto na partida (sucesso vs. falha).

Um estudo recente (Izawa & Shadmehr, 2011) investigou como os erros sensoriais e de recompensa afetaram as mudanças nos comandos motores durante a aprendizagem. Os autores utilizaram um protocolo de adaptação de alcance no qual os participantes, segurando uma alça de um braço robótico, tiveram que mover um cursor, com diferentes graus de perturbação, a fim de encontrar um alvo na tela. Eles comparam o desempenho utilizando três tipos diferentes de *feedback*: 1) *feedback* sensorial de alta qualidade (ERR): os participantes tinham o *feedback* completo da posição do cursor na tela; 2) *feedback* sensorial de baixa qualidade (EPE): os participantes recebiam *feedback* parcial em apenas algumas posições específicas, incompleto; e 3) grupo de *feedback* de recompensa sem *feedback* sensorial (RWD): os participantes foram apenas informados se a tentativa foi ou não correta ao final da mesma. Os resultados indicaram que todos os grupos melhoraram o desempenho durante a tarefa com diferentes níveis de adaptação. Os participantes do grupo ERR apresentaram um amplo padrão de generalização, enquanto que o grupo RWD apresentou um padrão muito estreito. O grupo EPE apresentou resultados intermediários. Eles propuseram um modelo chamado “*the optimal learner*” (o aprendiz ideal), com base em dois componentes: 1) a aprendizagem por recompensa para a seleção da ação; e 2) a estimação

de estado para a identificação das consequências sensoriais dos comandos motores. Os resultados do estudo indicaram que a assinatura comportamental da aprendizagem com *feedback* de alta qualidade é diferente daquela com recompensa ou com informação de baixa qualidade ou resolução, sugerindo que tais processos são mediados por processos neurais distintos.

A atualização das predições sensoriais é possivelmente mediada pelo cerebelo, conforme foi sugerido por alguns estudos (Synofzik, Lindner, & Thier, 2008; Tseng, Diedrichsen, Krakauer, Shadmehr, & Bastian, 2007), mas uma pesquisa (Galea, Vazquez, Pasricha, de Xivry, & Celnik, 2011) sugeriu que o cerebelo trabalha com o córtex motor primário para a aprendizagem motora. Utilizando tDCS sob o cerebelo ou sob o córtex motor primário (M1), este estudo mostrou que enquanto o cerebelo é importante para a rápida adaptação motora inicial, o córtex motor é fundamental para a retenção da habilidade aprendida. Em contrapartida, os erros de predição de recompensa são processados no córtex cingulado anterior, que recebe projeções do sistema dopaminérgico mesoencefálico (Holroyd & Coles, 2002).

No entanto, é importante notar que os dois sistemas de aprendizagem são comumente investigados em áreas diferentes com objetivos distintos. A aprendizagem baseada em erro tem sido foco de investigação em estudos na área de aprendizagem motora, utilizando técnicas comportamental e de modelagem computacional, com raras pesquisas analisando os correlatos corticais dos erros de predição sensorial (Wolpert, et al., 2011). Por outro lado, a aprendizagem baseada em recompensas tem sido investigada em muitos estudos utilizando diversas técnicas de neuroimagem, incluindo EEG, MEG, fMRI, etc. A aprendizagem baseada em recompensa é frequentemente estudada no contexto da aprendizagem por reforço utilizando paradigmas de aprendizagem explícita, com estratégias do tipo teste de hipóteses, mas raramente no contexto da aprendizagem motora ou implícita.

Tirando proveito da resolução temporal do EEG, muitos estudos analisaram os potenciais relacionados ao evento (ERPs) e os correlatos oscilatórios do processamento de *feedback* em tarefas de aprendizagem por reforço (Cohen, 2008; Cohen, et al., 2011; Nieuwenhuis, et al., 2004). O principal componente de ERP investigado nessa área é chamado de negatividade relacionada ao *feedback* (FRN), que é uma deflexão negativa no ERP, iniciando cerca de 145 ms com o pico entre 230-330 ms após a apresentação de *feedback* indicando erro (Miltner, et al., 1997). O FRN tem uma topografia média frontal, sendo que estudos de localização de origem indicaram que o córtex cingulado

anterior (ACC), porção dorsal, é o seu mais provável gerador cerebral (Balconi & Scioli, 2011; Luu, et al., 2003; Potts, et al., 2010; Santesso, et al., 2011). Um estudo com registros intracranianos em macacos (Quilodran, Rothe, & Procyk, 2008) indicaram que o ACC discrimina entre resultados positivos e negativos dependendo do contexto (estágios de busca ou de repetição), com maiores reações ao *feedback* durante os períodos exploratórios da tarefa (estágios de busca). Os autores concluíram que o ACC é fundamental não somente para avaliar os resultados das ações, mas também para monitorar diferentes estágios da tarefa e para sinalizar a necessidade de modificação de estratégia, o que é um aspecto importante da aprendizagem.

Em relação aos correlatos oscilatórios, estudos utilizando decomposições de tempo-frequência demonstraram que o *feedback* de erro provoca um aumento na energia de teta (4-8 Hz) na mesma área média-frontal na qual o FRN é observado (Cavanagh, et al., 2011; Cavanagh, et al., 2010; Cavanagh, et al., 2012; Cohen, et al., 2007; Cohen, et al., 2011). As oscilações em teta nessa área são sensíveis à novidade, punição, conflito e erro (Cavanagh, et al., 2012). Um estudo recente (Cavanagh, et al., 2011) utilizou modelagem computacional os erros de predição de recompensa e o grau de incerteza, a fim de investigar como as oscilações teta na área média-frontal são moduladas pela incerteza e como isto está conectado com os estágios de busca e repetição em uma tarefa de aprendizagem por reforço na qual os participantes precisavam explorar as diferentes opções de resposta para encontrar o melhor padrão, e então repeti-lo. Três resultados principais apoiaram a hipótese de que a energia de teta na área média-frontal e frontopolar direita refletem o grau de incerteza da tentativa: 1) a incerteza relativa e a energia de teta apenas foram positivamente correlacionadas quando os participantes estavam escolhendo uma opção com maior incerteza associada; 2) estas correlações foram encontradas nas áreas associadas com a exploração de diferentes estratégias, tais como o córtex pré-frontal dorsomedial e o polo frontal direito, e foram válidas quando os participantes selecionavam opções mais incertas; 3) estes efeitos relacionados à exploração de diferentes estratégias foram maiores nos participantes que efetivamente utilizaram a incerteza para governar a exploração.

Um estudo recente (Christie & Tata, 2009) utilizando uma abordagem de localização de origem cerebral denominada *beamformer* encontrou que o córtex médio direito, possivelmente incluindo o ACC, foi a fonte mais provável das oscilações teta. A energia de teta foi modulada pelo grau de risco da aposta. Este estudo demonstrou que o

FRN e as oscilações teta foram geradas por regiões cerebrais anatomicamente distintas.

Existe, portanto, uma diferença fundamental de foco dos estudos sobre aprendizagem com recompensa e aprendizagem baseada em erro. Analisar as diferenças nos correlatos corticais entre *feedback* graduado de alta qualidade e informação categórica em uma tarefa que requer aprendizagem implícita parecem ser uma exploração inicial pertinente na área. Devido ao EEG não ser adequado à investigação de atividade em estruturas subcorticais como o cerebelo, espera-se que as principais diferenças encontradas no processamento desses dois tipos de *feedback* sejam nas áreas relacionadas ao processamento de recompensa, que são visíveis ao EEG, especialmente sinalizadas pelo FRN e pelas oscilações teta. No entanto, o *feedback* de alta qualidade tem também um valor de recompensa a ele inerente. Por exemplo, é recompensador conseguir reduzir o erro próximo ao zero. Assim, é esperado encontrar ativações relacionadas com o processamento de recompensa também após o *feedback* graduado, mas em menor força, especialmente em tentativas de baixo erro, ou seja, nas melhores tentativas. Por outro lado, o *feedback* categórico indicou o sinal do erro, o que significa que o mesmo informou não apenas que um erro foi cometido, mas também, qual foi a direção deste erro. Desta forma, em ambas as condições, os participantes foram informados da direção do erro, a fim de permitir o ajuste adequado, sendo a principal diferença, a qualidade ou a resolução desse *feedback*: alta (graduado) ou baixa (categórico). Além disso, foram testadas as diferenças no processamento de *feedback* de alta e baixa qualidade entre bons e maus aprendizes em uma tarefa de produção temporal, utilizada no presente estudo.

Assim, os objetivos deste estudo foram: 1) comparar o desempenho, os ERPs e as oscilações cerebrais de participantes que realizaram a tarefa com *feedback* (graduado vs. Categórico); 2) analisar as interações entre a resolução do *feedback* (graduado vs. categórico) e aprendizagem (bons vs. maus aprendizes) nos ERPs e respostas oscilatórias ao *feedback*; 3) investigar as possíveis origens cerebrais das oscilações teta em resposta ao *feedback* incorreto graduado e categórico. A principal hipótese foi que o *feedback* categórico estaria associado com maior aumento na energia espectral de teta e com maior FRN na área média-frontal. Outrossim, foi predito que os bons aprendizes apresentariam maior aumento nas oscilações teta em resposta ao *feedback* negativo (incorreto) do que os maus aprendizes e que esta diferença seria maior no grupo que realizou a tarefa com *feedback* categórico. Por fim, foi esperado encontrar diferenças nas origens

cerebrais das oscilações teta em resposta ao *feedback* graduado e categórico, com maiores ativações na porção dorsal do ACC após o *feedback* categórico incorreto.

5.2 MÉTODO

5.2.1 Participantes

Setenta e duas pessoas participaram deste estudo. A tarefa de produção temporal foi administrada a metade delas usando o *feedback* graduado ($n = 36$) e com *feedback* categórico a outra metade ($n = 36$). Ambos os grupos foram subdivididos em bons e maus aprendizes, com base em o quão bem eles executaram os últimos três blocos sem *feedback* da tarefa (o mesmo critério adotado nos estudos 1 e 2 desta tese). É importante notar que os participantes do *feedback* graduado deste estudo não eram exatamente os mesmos que no estudo 1, uma vez que dois canhotos foram excluídos e 6 outros participantes foram adicionados à amostra, totalizando 36 participantes. Os grupos foram equivalentes em termos de idade ($t(70) = 0,600, p = .551$) e sexo, com 25 mulheres e 11 homens, em ambos os grupos. Todos os participantes eram destros com visão normal ou corrigida e assinaram o consentimento livre e informado antes de tomar parte no estudo. Este estudo foi aprovado pelo comitê de ética local do Departamento de Psicologia da *Goldsmiths College, University of London*, e conduzido de acordo com a Declaração de Helsinki.

5.2.2 Tarefa Experimental

A tarefa de produção de tempo usada neste estudo foi descrita anteriormente na sessão Método dos estudos 1 e 2 da presente tese. A tarefa consiste em produzir o intervalo de tempo de 1.7 segundos ou 1700 ms, que iniciam com um sinal sonoro que começa aleatoriamente, 300-900 ms depois de uma cruz de fixação ser apresentada no centro da tela. O participante tem que pressionar um botão na caixa de resposta sempre que ele pensa que este intervalo se passou após o sinal auditivo. O *Feedback* de desempenho é, então, apresentado 600 ms após o botão ter sido pressionado e permanece na tela por um segundo.

Para o grupo de *feedback* graduado, a diferença exata entre a estimativa do participante e o alvo foi apresentada em milissegundos (por

exemplo: - 152), enquanto para o grupo de *feedback* categórico, essa diferença foi convertida a uma categoria apresentada como *feedback*: "muito longo", "muito curto" e "correto". No *feedback* categórico, os limites de tempo para cada categoria foram definidos com base em uma janela adaptativa que iniciava com um ponto de corte de 200 ms acima e abaixo da meta, ou seja, uma diferença de 0 a 200 ms ou de -200 ms a 0 era considerada correta. Depois de cada tentativa, esta janela de tempo era ajustada, aumentando em 20 ms cada lado depois de uma resposta incorreta ou reduzindo 20 ms após uma resposta correta. Esses ajustes foram necessários para manter uma quantidade similar de cada categoria de *feedback* ("muito longo", "muito curto" e "correto"). Os participantes foram informados sobre este procedimento e estavam conscientes que cada tentativa correta tornaria a próxima mais difícil e vice-versa. No entanto, as respostas com erro entre -50 a 50 ms foram sempre consideradas corretas, a fim de evitar induzir erro na avaliação dos participantes sobre o seu próprio desempenho. Este procedimento produziu cerca de 33% das tentativas em cada categoria de *feedback*.

Foram incluídos seis blocos de 20 tentativas cada, sem qualquer *feedback* válido (em vez de um *feedback*, a palavra 'OK' foi apresentada por 1 s no centro da tela). Havia seis blocos de *feedback* com 80 tentativas cada, intercalados com 6 blocos sem *feedback*, de 20 tentativas cada. Assim, houve um total de 480 tentativas com *feedback* e 120 tentativas sem *feedback*. A tarefa começou e terminou com um bloco sem *feedback*. Os participantes tiveram intervalos pequenos entre cada bloco e um intervalo mais longo no meio da tarefa. A tarefa experimental durou cerca de uma hora.

Da mesma forma que nos estudos 1 e 2, os participantes foram divididos em dois grupos com base em seu desempenho nos últimos 3 blocos sem *feedback*. Foram calculadas duas medidas para a avaliação da aprendizagem: (1) a magnitude do erro (o erro médio nos últimos três blocos sem *feedback*), e (2) a variabilidade da resposta (a média do desvio-padrão do erro dentro de cada bloco). Estas duas medidas foram normalizadas entre 0-1, combinadas e, em seguida, uma divisão mediana foi adotada para dividir os grupos. Os cálculos foram feitos separadamente para cada grupo de *feedback*, resultando em 18 bons e 18 maus aprendizes para o *feedback* graduado, e 18 bons e 18 maus aprendizes para o *feedback* categórico.

A eficiência de ajuste, introduzida no estudo 1, foi também analisada no presente estudo, a fim de testar se o *feedback* graduado é de fato importante para a realização de ajustes eficientes. A eficiência de ajuste (AE) foi definida como:

$$AE = \frac{e(i-1) - e(i)}{e(i-1)} = \frac{\Delta e}{e(i-1)}$$

(Eq.1, no estudo 1)

onde “ e ” é o erro absoluto na tentativa atual (i) ou precedente ($i-1$). O propósito desta medida é avaliar o quão bem os ajustes foram feitos, na média, por cada grupo (bons e maus aprendizes) e durante os blocos com e sem *feedback*.

5.2.3 Registro de EEG e análises

Contínuos sinais de EEG foram adquiridos usando 64 eletrodos ativos posicionados de acordo com o sistema 10-20 estendido de colocação dos eletrodos, e intensificados por um amplificador *ActiveTwo BioSemi*^(R). Eletrooculograma (EOG) vertical e horizontal foram registrados por meio de quatro eletrodos adicionais utilizados para monitorar as piscadas de olhos e movimentos oculares horizontais. Os sinais de EEG foram gravados com uma frequência de amostragem de 512 Hz, filtrados com passa-banda entre 0,16 Hz - 100 Hz. A tarefa foi apresentada em um PC usando o MATLAB com a *toolbox Cogent 2000* (<http://www.vislab.ucl.ac.uk/cogent.php>).

Os dados do EEG foram processados e analisados utilizando as seguintes *toolboxes* para MATLAB (*The MathWorks Inc.*, Natick, MA): *EEGLAB* (Delorme & Makeig, 2004) para o pré-processamento dos dados, incluindo as ICAs; e *Fieldtrip* (Oostenveld, et al., 2011) para análise de dados, comparações estatísticas e para a análise de *beamformer*.

Pré-processamento: Os dados de EEG foram re-referenciados para a média do sinal coletado nos lobos auriculares e filtrados com passa-alta de 0.5 Hz. As épocas foram extraídas com base no *feedback* (ponto zero) com uma duração total de 1600 ms, de -600 ms antes até 1000 ms após a apresentação do *feedback*. Para extrair às épocas, o *feedback* graduado teve que ser classificado nas mesmas categorias presentes no *feedback* categórico com aproximadamente a mesma distribuição, de 33% em cada categoria, a fim de torná-los equivalentes em termos de

expectativas. Primeiramente, foi calculado o percentual para a categoria “correto” no grupo com *feedback* categórico, quantidade esta que foi utilizada como referência para considerar os erros pequenos no *feedback* graduado. No *feedback* graduado, o número médio de tentativas em cada categoria foi: 157 (DP = 10.7, 32.7%) para “correto”, 166 (DP = 37.7, 34.6%) para “muito longo” e 157 tentativas (DP = 33, 32.7%) para “muito curto”. Por esta razão, tentativas com erro absoluto abaixo de 33% foram consideradas “corretas” no *feedback* graduado, sendo os percentuais calculados para cada indivíduo e bloco separadamente. Erros absolutos que foram maiores que 33% foram considerados incorretos, sendo que destes (*feedbacks* incorretos), os com sinal negativo foram classificados como “muito curto” e os com sinal positivo como “muito longo”. Dessa forma, para todas as comparações, houve um número similar de tentativas em cada categoria. Quando apropriado, as duas categorias de *feedback* negativo foram misturadas para uma seleção randômica subsequente de metade das mesmas, feita com a finalidade de evitar comparar *feedback* correto e incorreto utilizando um número muito diferente de tentativas em cada condição. Os artefatos foram tratados de maneira semiautomática: foi inicialmente aplicada inspeção visual visando remover artefatos musculares grandes, seguida por uma ICA utilizada para corrigir as piscadas e movimentos oculares. Após esta correção, as épocas contendo amplitudes maiores de 80 μV foram descartadas.

Uma 3 x 2 ANOVA de desenho misto foi aplicada visando comparar o número de tentativas nas três condições (“muito longo”, “muito curto”, “correto”) e entre os dois grupos (*feedback* graduado vs. categórico). Os resultados indicaram que não houve diferença significativa no número de tentativas entre as categorias de *feedback* ($F(1.3, 92.8) = 0.680, p = .451$), nem interações com o grupo de *feedback* ($F(1.3, 92.8) = 0.845, p = .391$). Não foram verificadas diferenças no número de tentativas em cada categoria entre os participantes do grupo de *feedback* graduado e categórico ($F(1, 70) = 0.063, p = .802$). O número mínimo de tentativas utilizado em cada condição foi: 70 e 81 para “muito curto”, 79 e 74 para “muito longo” e 84 e 92 para “correto” nos grupos de *feedback* graduado e categórico, respectivamente.

Análise dos ERPs: Os dados foram filtrados com passa-baixa de 35 Hz para o processo subsequente de análise, de -200 a 1000 ms após o *feedback*. A amplitude média no período pré-*feedback* ou na linha de base (entre -200 a 0) foi subtraída dos ERPs. O FRN foi mensurado

como a amplitude média entre 175 e 250 ms após o *feedback* no eletrodo FCz. O P300 foi definido como a amplitude média em Pz de 300 a 400 ms após a apresentação de *feedback*.

Decomposição de tempo-frequência: O conteúdo espectral variável no tempo dos dados de EEG foi estimado por meio do método de decomposição de tempo-frequência *Morlet Wavelet*. O sinal foi convolvido com *Morlet Wavelet* complexa com base em cada tentativa única, para então, o posterior cálculo da média de cada condição. A faixa de frequência analisada foi de 4 a 35 Hz em passos de 1 Hz, utilizando *wavelets* de quatro ciclos. A janela de tempo analisada foi de 600 ms antes à 1000 ms após o *feedback* (tamanho da época: 1600 ms). Para calcular a energia espectral relativa em cada frequência, a TFR foi normalizada dividindo a energia espectral em cada ponto no tempo, para cada frequência, pelo valor da energia média na respectiva linha de base, entre -200 ms e o *feedback*. Antes de normalizar, a média da energia espectral (FFT) no período da linha de base foi comparada entre condições e grupos na frequência teta e beta, mas nenhuma diferença significativa ou tendência emergiu, o que permitiu a realização da normalização.

Localização de origem com *Beamformers*: com o objetivo de localizar a mais provável origem cerebral das oscilações teta encontradas nas áreas médias-frontais, foram utilizados *beamformers* com técnica de filtro espacial adaptativo (Gross et al., 2001). O procedimento de localização de origem inclui, primeiramente, a construção de um modelo adiante (*forward model*) para a subsequente aplicação da solução inversa. O *forward model*, no presente estudo, foi desenvolvido com base em um modelo realista de cabeça (*Boundary Element Model – BEM*) e em uma imagem estrutural do modelo de ressonância magnética, o MNI (*The MNI – International Consortium for Brain Mapping, Montreal Neurological Institute, Canada*), utilizando SPM2 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>). As coordenadas tridimensionais dos eletrodos foram calculadas manualmente, a fim de adaptar ao modelo realista de cabeça e permitir o cálculo do *grid*. O volume da cabeça foi discretizado em um *grid* com resolução de um centímetro. A solução inversa adotada foi uma abordagem *beamforming* no domínio da frequência, conhecida como *the Dynamic Imaging of Coherent Sources* (DICS) que utiliza filtros espaciais para localizar a energia espectral no cérebro inteiro, ou seja, este método não limita o cálculo das origens a regiões de interesse determinadas *a priori* (Gross, et al., 2001). Para a

solução inversa, o espectro de Fourier foi calculado na linha de base (de -0.5 à -0.1 s antes do *feedback*) e durante o período pós-*feedback* (de 100 a 500 ms após o *feedback*), para cada condição (correto e incorreto) e para cada grupo (graduado e categórico). Com base nisto e no *grid*, um filtro espacial comum foi desenvolvido para cada sujeito, e subsequentemente, a distribuição espacial da energia de teta foi computada para cada condição. O parâmetro de regularização utilizado foi de 5%. A distribuição das ativações de origem durante a linha de base foi subtraída das obtidas no pós-*feedback*, para cada condição separadamente. Os valores resultantes nas origens, após a subtração da linha de base, foram utilizados no teste não-paramétrico de permutação de *cluster* conduzido no nível das origens (em cada ponto no *grid*). Com a finalidade de obter uma aproximação das diferenças encontradas em termos de estruturas anatômicas, as coordenadas MNI das origens com os valores mais altos foram convertidas para coordenadas Talairach e então, consultadas no *Atlas Talarach* (<http://www.talairach.org/>). Ressalta-se, entretanto, que esta foi uma abordagem exploratória com uma considerável margem de erro, dada a ausência de registros de pontos fiduciais ou registros estruturais individuais de cada sujeito que permitissem construir um *forward model* baseado na própria configuração anatômica e condutividades de cada participante (o que aumentaria muito a resolução espacial da análise). Mesmo assim, a utilização de localização de origem com *beamformers* é válida, especialmente porque não foram encontrados até então experimentos de EEG e MEG comparando os correlatos corticais de *feedback* graduado e categórico. Dessa forma, entende-se que os cálculos aqui descritos tem um objetivo de aproximação da área de origem provável das oscilações teta em resposta ao *feedback*, mas não representam uma medida exata do fenômeno.

5.2.4 Análise estatística

Considerando que não foram encontrados estudos com EEG comparando processamento de *feedback* graduado e categórico, optou-se pela utilização de uma abordagem mais guiada pelos dados (*data driven methods*) para encontrar as diferenças relevantes entre esses dois tipos de *feedback*. Assim como no estudo 1, foi utilizado um teste de não paramétrico de permutação de *clusters*, que é uma abordagem estatística designada para lidar com dados multidimensionais como de EEG e MEG (Maris & Oostenveld, 2007). Uma descrição mais detalhada deste processo pode ser encontrada no estudo 1 da presente tese. Foi realizado

o teste não paramétrico de permutação de *clusters* no tempo (ERPs) e domínio da frequência (oscilações). A distribuição de permutação foi derivada dos resultados estatísticos de testes t-independentes (*feedback* graduado vs. categórico) de 1000 permutações aleatórias. O nível de alfa foi de 0.05. Os eletrodos com distâncias inferiores a 5 cm foram considerados vizinhos, resultando em uma média de 4.2 eletrodos vizinhos por eletrodo. Esta abordagem estatística foi utilizada para comparar os ERPs e as TFRs de participantes que receberam *feedback* graduado com aqueles que realizaram a mesma tarefa com *feedback* categórico. Além disso, o teste não paramétrico de permutação de *cluster* foi conduzido no espaço das origens, utilizando também 1000 permutações aleatórias para testar as diferenças na ativação em teta das origens, comparando *feedback* gradual com categórico e também após *feedback* correto e incorreto.

Além destes testes, foram utilizadas análises de variância tradicionais para investigar os feitos intra e entre participantes, bem como possíveis interações entre *feedback* correto e incorreto e grupos de aprendizagem (bons e maus aprendizes). Em geral, cada variável dependente foi inserida em uma 3 x 2 x 2 ANOVA de desenho misto com o *feedback* (“muito longo”, “muito curto” e “correto”) como fator intraparticipantes e a **resolução do *feedback*** (graduado vs. categórico) e o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como fatores entressujeitos.

Para as comparações comportamentais, uma 2 x 2 x 2 x 2 MANOVA foi realizada com a **resolução do *feedback*** (graduado vs. categórico) e o **grupo de aprendizagem** (bons vs. maus aprendizes) como variáveis independentes, e com o **estágio** (primeira vs. segunda metade) e o **bloco** (com vs. sem *feedback*) como fatores intraparticipantes. As medidas comportamentais, incluindo erro absoluto, variabilidade média e eficiência de ajuste, foram inseridas nesta análise como variáveis dependentes.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Desempenho na tarefa

Os participantes que realizaram a tarefa com *feedback* graduado apresentaram melhor desempenho do que aqueles que tiveram apenas *feedback* categórico ($F(1, 66) = 6.815, p < .001, \eta^2 = .237$), mas houve uma interação entre a **resolução do feedback** e o **grupo de aprendizagem** ($F(1, 66) = 3.003, p = .037, \eta^2 = .120$), pois foi verificado que as diferenças entre no desempenho entre o feedback graduado e categórico foram maiores entre os bons aprendizes, conforme pode ser visualizado na figura 1. Houve um efeito para **grupo de aprendizagem** ($F(1, 66) = 35.682, p < .001, \eta^2 = .619$), uma vez que os bons aprendizes apresentaram um desempenho superior aos maus aprendizes em ambas resoluções de *feedback* (graduado e categórico). Os participantes melhoraram significativamente da primeira para a segunda metade da tarefa ($F(1, 66) = 18.231, p < .001, \eta^2 = .453$), mas esta melhora interagiu com o **grupo de aprendizagem** ($F(1, 66) = 6.086, p = .001, \eta^2 = .217$), porque somente os bons aprendizes melhoraram significativamente ao longo da tarefa. Não houve interação entre **estágio** e **resolução do feedback** ($F(1, 66) = 1.192, p = .320$), o que sugere que esta melhora esteve presente em ambas as condições, ou seja, os participantes melhoraram o desempenho tanto com feedback graduado quanto com o categórico.

Houve um efeito de **bloco** ($F(1, 66) = 47.211, p < .001, \eta^2 = .682$), resultante do fato de que os participantes desempenharam melhor a tarefa nos blocos com feedback em relação aos sem a apresentação do mesmo. Esta variável interagiu com o **grupo de aprendizagem** ($F(1, 66) = 9.229, p < .001, \eta^2 = .296$), pois os bons apresentaram diferenças menores no desempenho entre os blocos com e sem feedback em relação aos maus aprendizes. Houve também uma interação entre **estágio** e **bloco** ($F(1, 66) = 7.825, p < .001, \eta^2 = .262$), pois as melhoras no segundo bloco da tarefa foram maiores nos blocos sem feedback.

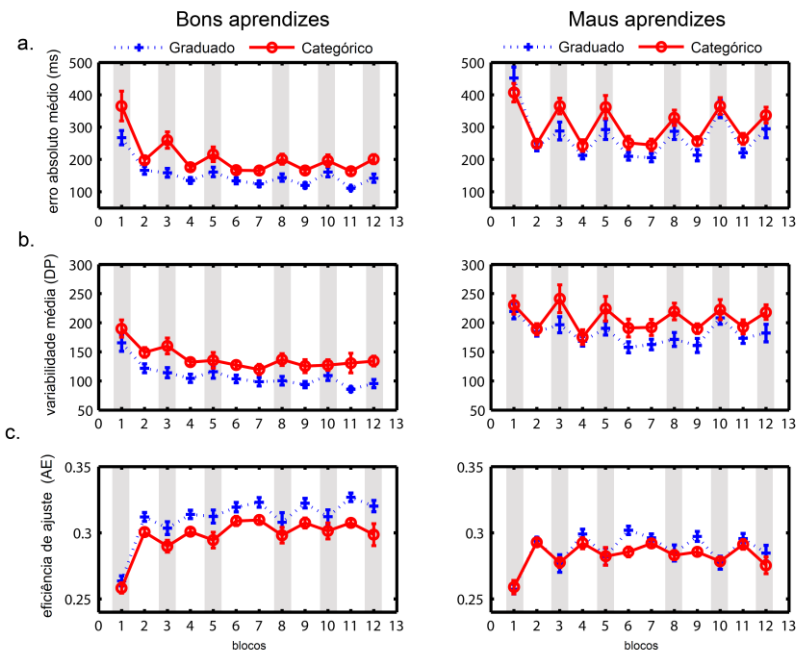


Figura 1. Desempenho na tarefa. (a) Erro absoluto médio nos 12 blocos da tarefa, incluindo aqueles com e sem *feedback* (áreas destacadas em cinza) para bons (lado esquerdo) e maus aprendizes (lado direito) e para os participantes que realizaram a tarefa com *feedback* graduado (linhas azuis) e categórico (linhas vermelhas); (b) A mesma figura, mas com a média do desvio-padrão do erro absoluto como medida de variabilidade; (c) A mesma figura mas com a média de eficiência de ajuste como variável no eixo y do gráfico.

Os resultados da análise univariada indicaram que todas as variáveis dependentes apresentaram o mesmo resultado multivariado. No entanto, ressalta-se que a eficiência do ajuste foi a variável dependente com os efeitos mais fortes para **estágio**, **bloco** e interações. Além disso, as comparações entre participantes indicaram que a eficiência do ajuste foi a variável que mais diferiu entre *feedback* graduado e categórico ($F(1, 68) = 20.876, p < .001, \eta^2 = .235$), seguido pelo erro absoluto médio ($F(1, 68) = 20.876, p < .001, \eta^2 = .235$) e pela variabilidade ($F(1, 68) = 12.090, p = .001, \eta^2 = .151$).

5.3.2 Potenciais Relacionados ao Evento

O teste não-paramétrico de permutação de cluster utilizado para comparar *feedback* graduado com categórico não revelou cluster significativo no domínio do tempo ($p > 0.05$). No entanto, a análise das diferenças relacionadas ao FRN apontou uma diferença significativa entre as condições no eletrodo FCz na janela de tempo entre 175 e 200 ms (Figura 2a). Observou-se que o FRN foi significativamente maior (mais negativo) após o *feedback* graduado quando comparado ao categórico ($F(1, 68) = 9.659, p = .003, \eta^2 = .124$). O FRN foi expressivamente maior após *feedback* indicando tentativa incorreta ($F(1.51, 102.9) = 81.989, p < .001, \eta^2 = .547$). Foi encontrada uma interação entre a **resolução do feedback** (graduado vs. categórico) e a **categoria** (“muito longo”, “muito curto” e “correto”) ($F(1.51, 102.9) = 29.479, p < .001, \eta^2 = .302$), pois a diferença no FRN em resposta ao feedback correto e incorreto foi maior no grupo que realizou a tarefa com informação categórica. Bons e maus aprendizes não diferiram em relação ao FRN ($F(1, 68) = 0.025, p = .875$).

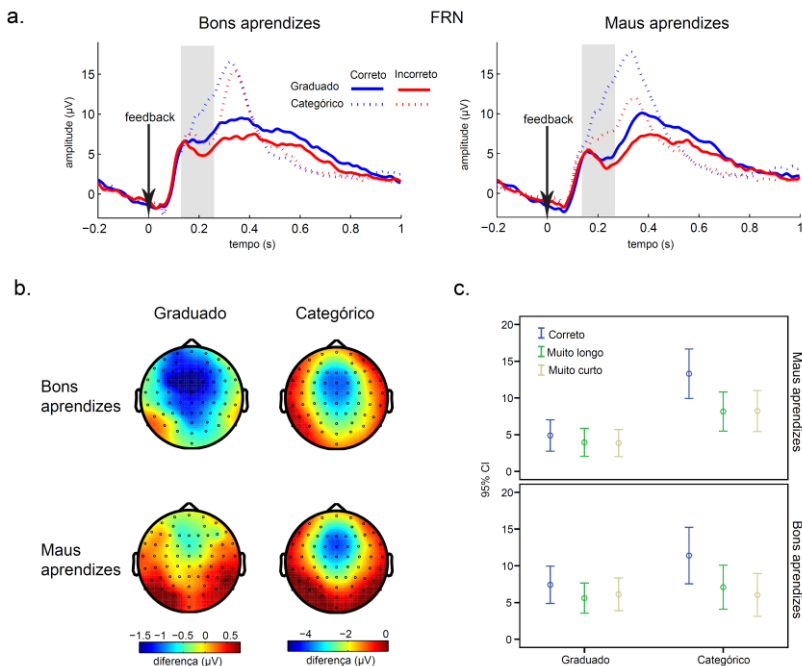


Figura 2. (a) ERPs em FCz para bons e maus aprendizes em resposta ao *feedback* correto (azul) e incorreto (vermelho) nos grupos com informação graduada (linhas sólidas) e categórica (linhas pontilhadas); (b) Distribuição topográfica da diferença na amplitude do FRN (FCz de 175 a 250 ms); (c) Médias e intervalos de confiança do FRN nos grupos com informação graduada e categórica após o *feedback* indicando “correto”, “muito curto” e “muito longo”.

5.3.3 Decomposições de Tempo-frequência

Ao visualizar as representações de tempo-frequência da energia espectral relativa em todas as frequências analisadas (figura 3a), observou-se que após o *feedback* houve um aumento na energia relativa na faixa de frequência teta (4-8 Hz). Esse aumento foi maior após *feedback* incorreto e categórico. A distribuição topográfica das diferenças estatísticas entre *feedback* incorreto graduado e categórico

indicam que essas diferenças são maiores na área média-frontal (figura 3b). Após o *feedback* correto, essa diferença foi mais concentrada na área pré-frontal esquerda (F3, F5 e AF3). O curso temporal destas ativações na frequência teta demonstraram que apenas os bons aprendizes no grupo do *feedback* categórico apresentaram um aumento na energia de teta após a informação de erro em relação ao acerto (figura 3d).

Um *cluster* significativo negativo foi encontrado para as comparações entre *feedback* graduado e categórico ($p < .0001$). Verificou-se que a energia relativa de teta aumentou mais após *feedback* categórico em relação ao graduado ($F(1, 68) = 31.394, p < .001, \eta^2 = .319$), mas sem diferenças entre bons e maus aprendizes ($F(1, 68) = 1.130, p = .292$) ou interações ($F(1, 68) = 1.172, p = .185$). A análise dos efeitos intraparticipantes indicou que a energia de teta foi maior após *feedback* incorreto em relação ao correto ($F(1.51, 102.3) = 3.605, p < .043, \eta^2 = .050$). Foi encontrada uma interação entre a **categoria do *feedback*** e a **resolução** do mesmo ($F(1.51, 102.3) = 4.281, p = .026, \eta^2 = .059$), pois a diferença na energia de teta entre correto e incorreto foi apenas significativa para o grupo com *feedback* categórico ($t(35) = 2.231, p = .032$). Além disso, houve um efeito interativo significativo entre **categoria do *feedback***, **grupo de aprendizagem** e **resolução** ($F(1.51, 102.3) = 4.713, p = .018, \eta^2 = .065$). Essa interação tripla se deve ao fato de que as diferenças na energia de teta entre bons e maus aprendizes e entre *feedback* correto e incorreto foram apenas significativas para o grupo com *feedback* categórico (essa interação pode ser visualizada na figura 3c).

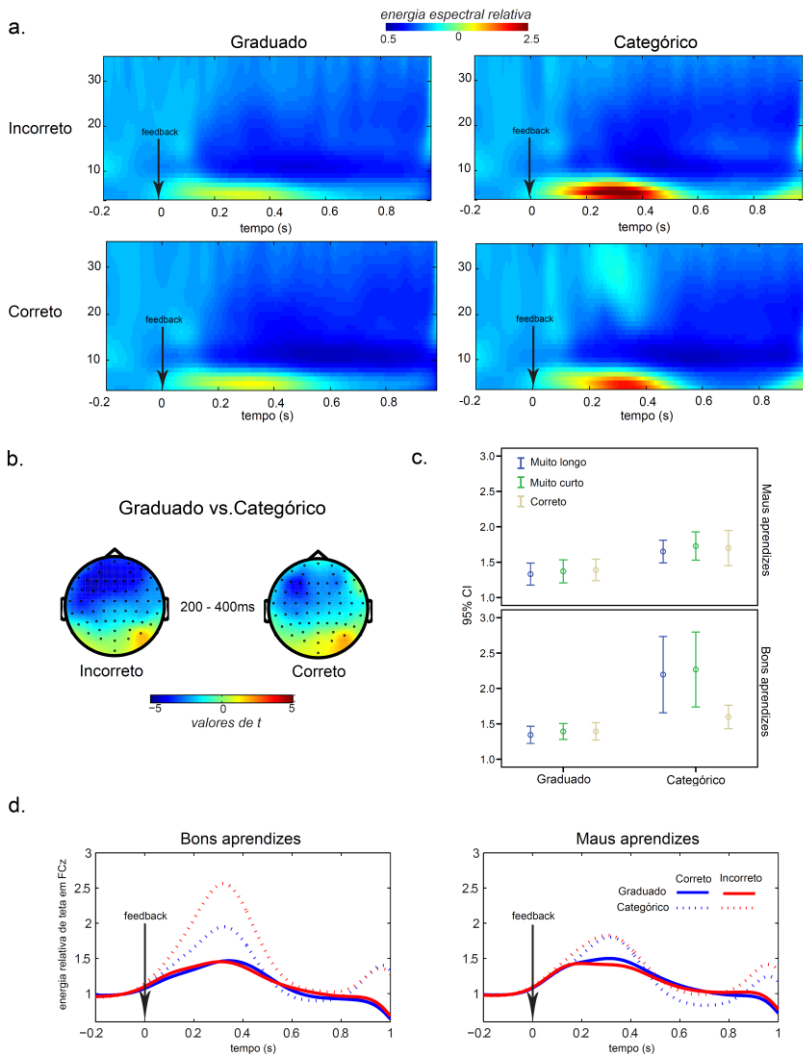


Figura 3. TFRs em resposta ao feedback graduado vs. categórico. (a) Representações de tempo-frequência da energia relativa de teta após *feedback* graduado e categórico, correto e incorreto; (b) Distribuições topográficas das diferenças na energia relativa de teta entre *feedback* graduado e categórico incorreto e correto; (c) Médias e respectivos ICs para a energia de teta entre 200 e 400 ms após os *feedbacks* “muito longo”, “muito curto” e “correto”; (d) Curso temporal da energia relativa de teta para bons e maus aprendizes após *feedback* correto e incorreto nas condições graduada e categórica.

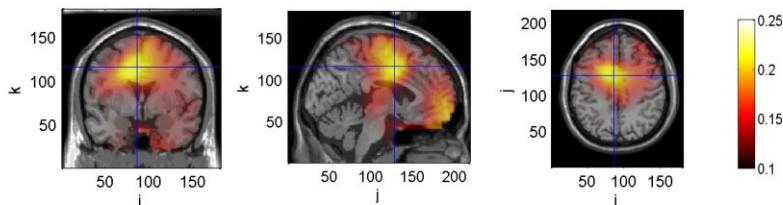
5.3.4 Localização da origem cerebral das oscilações em teta

Ressalta-se que para as análises com *beamformers* os dados foram re-referenciados em relação à média comum de todos os eletrodos (*common average reference*). Primeiramente, os dados foram transformados para o domínio da frequência utilizando transformada de Fourier, a fim de obter a matriz de densidade do espectro cruzado (CSD: *cross spectrum density matrix*), que foi utilizada na subsequente análise de *beamforming*. Para otimizar os resultados, foi necessária uma maior janela estacionária de tempo, especialmente para o cálculo da CSD (Gross, et al., 2001), assim, a transformada de Fourier foi aplicada no período pré-*feedback* (de 500 a 100 ms antes do *feedback*) e pós-*feedback* (de 100 a 500 ms após o *feedback*), ambos, portanto, com a mesma duração de 400 ms. Após escanear todo o volume cerebral e estimar os valores de cada possível origem cerebral em cada ponto no *grid*, os valores encontrados na linha de base foram subtraídos daqueles estimados para o período pós-*feedback*. Dessa forma, os valores de ativação em cada condição foram obtidos e comparados por meio do teste não-paramétrico de permutação de *clusters* no nível das origens cerebrais, com base em testes t para amostras independentes entre *feedback* graduado e categórico.

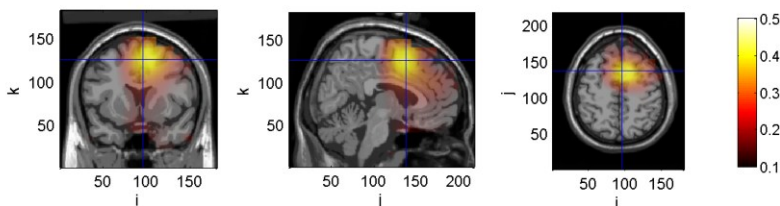
Os resultados das estimativas de atividades no cérebro podem ser visualizados na figura 4. Ressalta-se que as fontes analisadas foram em resposta ao *feedback* categórico e graduado incorreto. As coordenadas das três maiores origens para cada grupo e condição foram convertidas em coordenadas Tailarach e consultadas no respectivo atlas visando encontrar as áreas anatômicas das diferenças. Para o *feedback* graduado incorreto, a principal origem encontrada foi na área *Broadmann* (BA)24', na parte esquerda do ACC, incluindo as porções do giro cingulado e do lobo frontal (coordenadas Tailarach máximas: -5, 3, 38). Outra área com valores de origem altos foi o lobo pré-frontal direito, região frontopolar, encontrado na área BA 10 (figura 4a). Os valores das origens cerebrais de teta para *feedback* graduado foram mais baixos do que para o *feedback* categórico, que mostrou fontes mais fortes no giro cingulado direito (figura 4b). As coordenadas Tailarach (pico em 5, 9, 40) indicaram que a origem de teta mais provável é a área BA 32', no giro cingulado direito, também conhecido como porção dorsal do ACC.

Os resultados da permutação de *cluster* no nível das origens indicaram um *cluster* na área BA 32 (pico em 14, 12, 45), no giro médio-frontal, no ACC (figura 4c). A origem cerebral dessa diferença parece estar localizada na porção anterior e à direita do ACC do que a fonte encontrada para *feedback* categórico incorreto.

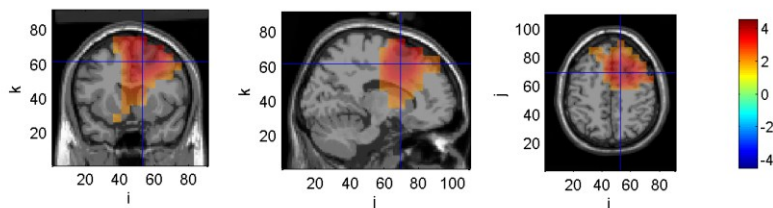
a. Feedback graduado - Incorreto



b. Feedback categórico - Incorreto



c. Feedback categórico vs. Graduado: testes t



d.

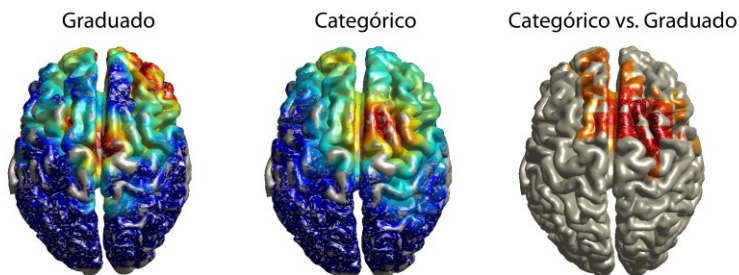


Figura 4. Origens cerebrais de teta após feedback incorreto. Reconstruções das origens cerebrais em resposta ao *feedback* incorreto graduado (a) e categórico (b); (c) Diferenças estatísticas entre as condições; (d) Visão de superfície das origens. As duas primeiras figuras de superfície estão baseadas nas mesmas escalas em (a) e (b), respectivamente. A terceira figura está na mesma escala de valores t apresentados na figura c.

5.4 DISCUSSÃO

Neste estudo, foi demonstrado que a aprendizagem é melhor quando o *feedback* contém informação graduada, ou seja, de alta qualidade. A tarefa proposta no presente estudo não é um paradigma frequentemente utilizado em pesquisas sensoriomotoras. No entanto, ao fornecer *feedback* graduado de alta resolução, o processo de aprendizagem envolvido assemelha-se ao investigado nas pesquisas sensoriomotoras por duas razões: 1) não é possível aprender a produzir um intervalo de tempo por meio de processos explícitos ou encontrando regras específicas; 2) os mapas entre a resposta motora e o respectivo resultado devem ser desenvolvidos progressivamente ao longo da tarefa, ou seja, os participantes tiveram que aprender o mapa entre o momento de apertar o botão e a escala em milisegundos do *feedback*. Isto significa que o participante teve que aprender a dimensionar o quanto de alteração no tempo da resposta motora era necessário para se ajustar à diferentes quantidades de erro em milisegundos. O sistema teve que utilizar a informação de erro e integrá-la ao seu mapa de expectativas ou previsões, a fim de reduzi-lo na próxima tentativa, de forma que cada repetição significasse uma atualização e talvez uma melhora no desempenho se este mapa é adequadamente estabelecido. Quanto mais tentativas, mais dados servem de referência para este mapa e, conseqüentemente, menor a margem de erro. Por meio deste processo, os participantes foram capazes de desenvolver uma representação interna da resposta, que os permitiu reproduzir o intervalo mesmo na ausência de *feedback*.

Outra implicação de ter um melhor mapa entre a ação e a resposta é que os ajustes no desempenho se tornam mais eficientes, pois o crédito ou o erro podem ser atribuídos adequadamente e, portanto, corrigidos. No presente estudo, este mapa foi relativamente fácil porque a habilidade aprendida tinha apenas uma dimensão de forma que um erro positivo representava a necessidade de encurtar o próximo intervalo em uma determinada proporção e vice-versa. Em outras habilidades, por exemplo, lançamento de dardos, o crédito e a culpa não são facilmente atribuídos: se o dardo atinge o lado direito do alvo, seria necessário saber se isso se deve ao fato da posição do punho no momento do lançamento, à força que estava inadequada, da posição do corpo, entre muitas outras possibilidades.

Foi encontrado apenas um estudo comparando *feedback* de diferentes níveis (Izawa & Shadmehr, 2011). Os autores verificaram que os grupos que realizaram uma tarefa de alcance visuomotor com

feedback visual de alta qualidade ou resolução aprenderam mais rápido e desenvolveram uma melhor função de generalização do que o grupo que teve apenas informação parcial ou mesmo categórica (certo e errado). O grupo com *feedback* de baixa qualidade (incompleto) apresentou resultados intermediários. Além disso, os autores constataram que o processo de aprendizagem apresentou assinaturas diferentes entre os três grupos, o que os levou a sugerir que a informação categórica serve para encontrar uma estratégia ou explorar diferentes planos de ação, algo importante na aprendizagem por reforço (função de valor, ver revisão de literatura). O *feedback* de alta resolução, por outro lado, serve para a redução progressiva no gradiente de erro, induzindo o desenvolvimento de predições sensoriomotoras mais acuradas, ou seja, permite o desenvolvimento de um mapa entre ações e resultados que pode também ser generalizado para outras tarefas. Por fim, foi sugerido que estes os dois processos de aprendizagem, o baseado em erro e o em recompensa, são mediados por diferentes mecanismos cerebrais, ou seja, possuem assinaturas neurais distintas e específicas.

Estudos utilizando *feedback* sensorial de alta qualidade sugerem um importante papel do cerebelo na adaptação motora inicial rápida (Synofzik, Lindner, & Thier, 2008; Tseng, Diedrichsen, Krakauer, Shadmehr, & Bastian, 2007). Eles encontraram que pacientes com lesões cerebelares apresentavam deficiências de aprendizagem motora específicas que eram consistentes com a ideia de que elas tinham uma capacidade prejudicada de atualizar as predições internas sobre as consequências sensoriais das suas ações. Enquanto que o cerebelo tem sido associado com a melhora rápida das predições sensoriais, o córtex motor primário tem sido associado com a consolidação dos comandos motores (Galea, et al., 2011). No entanto, mesmo em tarefas motoras, a informação de recompensa está sempre presente na forma de relativos sucesso e falha de cada tentativa, e, portanto, o sistema de monitoramento de desempenho deve também estar envolvido em atualizar os erros de predição de recompensa por meio em uma aprendizagem baseada em erro. Isso significa que é difícil isolar completamente o sistema de avaliação da recompensa em pesquisas com *feedback* de alta qualidade, uma vez que, enquanto existir um objetivo de reduzir o erro, o cérebro vai sempre buscar uma categoria para julgar o desempenho.

No presente estudo foi encontrado um maior FRN (mais negativo) para o *feedback* graduado em relação ao categórico. Este resultado foi contrário à hipótese de que o FRN seria maior para o

processamento de informação de recompensa. No entanto, o FRN foi mais sensível à valência do *feedback* (correto vs. incorreto) do que às diferenças relacionadas à sua resolução (graduado vs. categórico). Por outro lado, a energia de teta na área média-frontal foi mais sensível à resolução do *feedback* do que à sua valência (ver tamanho de efeitos na sessão resultados). Este resultado vai ao encontro de outros estudos sugerindo uma dissociação entre o FRN e a energia espectral de teta na área média-frontal (Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2007). Enquanto que o FRN tem sido consistentemente associado com a identificação de um erro de predição de recompensa (Bellebaum, Kobza, Thiele, & Daum, 2011; Bellebaum, et al., 2010; Chase, et al., 2011; Hajcak, et al., 2007; Holroyd & Krigolson, 2007; Holroyd, et al., 2009; Kobza, et al., 2011; Pfabigan, Alexopoulos, Bauer, & Sailer, 2011; Potts, et al., 2010) ou com erros de predição à *feedback* positivo ou negativo inesperado (Oliveira, et al., 2007; Pfabigan, et al., 2011), a energia de teta na área média-frontal tem sido associada com o processamento de *feedback* negativo ou incerto (Cavanagh, et al., 2011; Cavanagh, et al., 2012; van de Vijver, et al., 2011), embora exista um estudo demonstrando associação entre a energia de teta e os erros de predição (Cavanagh, et al., 2010).

Um estudo recente (Cavanagh, et al., 2011) verificou que a variação intratentativas de teta na área média-frontal após a resposta foi linearmente correlacionada com a incerteza relativa, e que essa energia foi maior em participantes que utilizaram a incerteza para guiar a exploração ou busca por novas estratégias. Ao conectar esses resultados e os do presente estudo, sugere-se que o aumento de teta, provavelmente originado na porção dorsal direita do ACC, decorra do processamento de *feedback* categórico incorreto que por sua vez induz à exploração de diferentes estratégias, à medida que, também, contém informação incerta ou incompleta. Especula-se que a informação graduada ou de alta resolução possa levar os participantes buscar a redução do erro progressiva, sem mudança de estratégia, o que é uma abordagem diferente da descrita anteriormente, conforme foi também sugerido em outro estudo (Izawa & Shadmehr, 2011). Além disso, a mudança de estratégia frequente em uma tarefa de aprendizagem implícita leva à uma maior variabilidade no desempenho, o que também foi verificado no presente estudo. Sugere-se, dessa forma, que aprender por meio de informações categóricas depende mais fortemente das estruturas cerebrais associadas ao sistema de monitoramento de *performance* e ao processamento de recompensa, especialmente na porção dorsal do ACC, do que aprender com *feedback* graduado.

Outra observação importante é que enquanto o FRN não foi diferente entre bons e maus aprendizes e não interagiu com o tipo de *feedback*, a energia de teta o fez. Foi demonstrado que somente com *feedback* categórico, os bons aprendizes apresentaram maiores aumentos na energia de teta em resposta ao erro, o que sugere que essa resposta é apenas associada com aprendizagem eficiente quando o *feedback* é categórico.

A hipótese de que aprender com *feedback* categórico depende mais de mecanismos cerebrais relacionados ao processamento de recompensas do que o graduado é também sustentada pelos resultados da análise de origens ou fontes de ativação cerebral. Os testes de permutação de *clusters* nas origens revelaram que durante o processamento de informação categórica incorreta, houve uma ativação em teta significativamente maior na porção dorsal direita do ACC, na área BA 32' em relação ao processamento de *feedback* graduado. Este resultado está de acordo com outro estudo indicando que a porção dorsal direita do ACC é a principal origem cerebral das oscilações teta observadas na área média-frontal (Christie & Tata, 2009). A fonte dessa ativação encontrada no presente estudo foi na porção dorsal do ACC, região essa considerada chave na integração de informação cognitiva (Bush, Luu, & Posner, 2000). Utilizando fMRI relacionada ao evento durante a execução de uma tarefa de nomeação de cores *Stroop*, foi verificado que o aumento na atividade do ACC aconteceu quando o conflito era alto e processos estratégicos estavam menos engajados, o que é consistente com a ideia de que o ACC não é responsável pela implementação de tais processos. Os autores sugeriram que o ACC avalia o conflito e representa os processos necessários para guiar o engajamento de processos estratégicos (Carter et al., 2000). Conforme foi também sustentado por outro estudo (Yoshida & Ishii, 2006), o ACC (BA24 e BA32) está envolvido na avaliação da informação necessária para tomar uma decisão ideal quando deparado com informações incompletas ou incertas. Uma revisão (Schultz et al., 2008) sobre a relação entre a incerteza e a atividade neural do sistema de recompensa revelou que o sistema cerebral de recompensa sinaliza a incerteza que é representada com a falta parcial de informação.

Em síntese, os resultados sugerem que a principal diferença entre o processamento de *feedback* categórico e graduado tem relação com a atividade neural nas áreas relacionadas ao processamento de informações de recompensa. Considerando que o *feedback* categórico representa informação incompleta, em comparação com o *feedback* graduado, sugere-se que as diferenças observadas ocorreram devido a

um funcionamento mais intenso do sistema neural de recompensa frente à incerteza, representada pelo *feedback* com informação incompleta (categórico).

5.5 CONCLUSÃO

Este estudo explorou as diferenças no processamento cerebral de *feedback* com alta e baixa resolução representados na forma de informação graduada e categórica, respectivamente. Os resultados sustentaram a noção de que *feedback* completo com alta qualidade promove uma aprendizagem mais eficiente, mas mostrando, por outro lado, que também é possível aprender uma habilidade implícita por meio de informação de baixa resolução ou incompleta. Foi encontrada maior ativação na frequência teta na área média-frontal em resposta ao *feedback* categórico incorreto; oscilações estas que foram possivelmente originadas na porção dorsal do ACC. Essa resposta foi mais forte nos bons aprendizes, mas apenas quando o *feedback* foi categórico. Sugere-se que aprender com informação incompleta está associado com maior ativação nas áreas relacionadas à recompensa e, que isto leva à uma abordagem mais exploratória durante a tarefa, o que pode prejudicar a aprendizagem implícita pois a mesma requer uma abordagem de melhora incremental, progressiva, obtendo a redução dos erros com base na mesma estratégia.

6 ESTUDO 4: É O MESMO INTERVALO? PROCESSAMENTO DE *FEEDBACK* ATRASADO VS. IMEDIATO E SUAS INTERAÇÕES COM A ATIVAÇÃO

Este estudo foi conduzido na Goldsmiths College, University of London com a ajuda a aluna de mestrado Segilola Jolaosho que coletou os dados deste experimento para a sua dissertação de mestrado.

RESUMO

O tempo passa devagar quando a ativação é alta. Este estudo teve como objetivo testar a negatividade relacionada ao *feedback* (FRN) e às respostas eletrodérmicas (EDA) ao *feedback* atrasado e imediato em uma tarefa de produção temporal, após induções de alta e baixa ativação mental. Os resultados demonstraram que quando a ativação estava alta, as diferenças no FRN, EDA e desempenho entre *feedback* imediato e atrasado foram maiores. Esses achados podem indicar que ao fazer o “relógio interno” pulsar mais rápido, a maior ativação fez com que esse atraso fosse percebido como mais longo, e, desta forma, amplificado o seu efeito em correlatos centrais (FRN), do sistema nervoso autônomo (EDA) e comportamentais do processamento de *feedback*.

Palavras-chave: *Feedback* atrasado. *Feedback* imediato. FRN. EDA. Ativação. Percepção de tempo.

6.1 INTRODUÇÃO

A habilidade de avaliar os resultados das ações ou decisões tem um papel fundamental na aprendizagem e na tomada de decisão: ela é utilizada para corrigir erros e ajustar o desempenho na fase de aprendizagem e também para monitorar e manter a *performance* na fase pós-aprendizagem. O correlato eletrofisiológico dessa avaliação é denominado negatividade relacionada ao *feedback* (FRN), um componente do potencial relacionado ao evento (ERP) com topografia média-frontal que inicia cerca de 145 ms após a apresentação de *feedback* de erro ou perda, quando comparado ao *feedback* positivo ou ganhos (Miltner, et al., 1997). Estudos indicam que o FRN é gerado no córtex cingulado anterior (ACC), especialmente na sua porção dorsal (Balconi & Scioli, 2011; Miltner, et al., 1997; Potts, et al., 2010), refletindo, supostamente, uma redução fásica de dopamina projetada a ele pelo sistema dopaminérgico mesoencefálico (Holroyd & Coles, 2002; Santesso, et al., 2009).

Estudos indicam que a diferença entre a recompensa esperada e a obtida é o principal fator responsável pela geração do FRN (Chase, et al., 2011; Holroyd, et al., 2009; Holroyd, et al., 2003; Kobza, et al., 2011). Essa diferença, entre *feedback* esperado e obtido, é denominada como “erro de predição de recompensa” (RPE). De fato, a dissonância entre recompensas esperadas e obtidas é um fator dominante na gênese do FRN, dado que um *feedback* positivo pode também provocá-lo, mas apenas quando este resultado é imprevisto ou inesperado (Oliveira, et al., 2007). Os resultados do último estudo citado sugerem que os seres humanos possuem um viés otimista que causa reações de maior intensidade ao *feedback* negativo, pois o viés o torna menos esperado (Oliveira, et al., 2007).

Junto à evidência de que o ACC é a origem mais provável do FRN (Luu, et al., 2003; Miltner, et al., 1997; Nieuwenhuis, Slagter, von Geusau, Heslenfeld, & Holroyd, 2005; Santesso, et al., 2011), tem sido proposto que os sinais de erro de predição advindos de recompensas ou *feedback* inesperados, são projetos do sistema dopaminérgico mesoencefálico ao ACC, que usa tais sinais como professores, para então, avisar e engajar as áreas relevantes para a execução da tarefa na correção ou ajuste para fins de aprendizagem (Holroyd & Coles, 2002). Além disso, foi demonstrado que a administração de um agonista de dopamina (DA) que reduz as respostas dopaminérgicas causou uma quebra da aprendizagem por reforço, aumentando o FRN (Santesso, et al., 2009). Este aumento foi verificado após o *feedback* correto,

indicando que essa substância prejudicou a liberação fásica de dopamina em resposta ao *feedback* positivo. Os autores argumentaram que uma possível explicação para isso é que devido ao agonista de DA prejudicar severamente a aprendizagem, o erro de predição foi maior para tal grupo, resultando em um maior FRN.

Embora o FRN tenha sido amplamente investigado com diversos paradigmas (for a review, see Nieuwenhuis, Holroyd, Mol & Coles, 2004; Simons, 2010), o efeito do tempo de atraso entre a resposta e o *feedback* não foi suficientemente investigado. Todos os estudos encontrados, exceto um (Opitz, Ferdinand, & Mecklinger, 2011), utilizaram *feedback* imediato apenas. Ressalta-se que o tempo do *feedback* tem um papel importante na aprendizagem, conforme foi demonstrado em estudos prévios que encontraram um efeito negativo no desempenho quando o *feedback* foi atrasado (Foerde & Shohamy, 2011; Lieberman, Vogel, & Nisbet, 2008), especialmente em tarefas de aprendizagem implícita (Maddox, Ashby, & Bohil, 2003; Maddox & Ing, 2005), e também em animais (Fiorillo, et al., 2008; Hollerman & Schultz, 1998; Kobayashi & Schultz, 2008). Além disso, estudos com animais demonstraram que a resposta dopaminérgica à recompensa é maior quando o *feedback* é atrasado em relação a quando é imediato. Especula-se que este aumento na resposta dopaminérgica a recompensas atrasadas ocorra devido ao enfraquecimento das associações ação-resultado ou estímulo-resposta, tornando o *feedback* menos previsível, ou seja, mais inesperado. O aumento da incerteza sobre o resultado da ação provoca uma maior resposta fásica dopaminérgica frente ao *feedback* e reduz a resposta ao estímulo (Fiorillo, et al., 2008).

Considerando estes resultados, espera-se que o *feedback* atrasado provoque um maior ou mais negativo FRN, pois o atraso enfraqueceria a associação ação-resultado, causando maior erro de predição. No entanto, um estudo recente (Opitz, et al., 2011) encontrou o oposto: *feedback* atrasado, quando comparado com o imediato, foi associado com um menor ou mais positivo FRN durante a realização de uma tarefa de aprendizagem de gramática artificial. Entretanto, uma variável interveniente neste estudo é a diferença pré-existente nas taxas de erros entre os grupos, pois o estudo contou com um desenho de comparação entre participantes. Assim, um estudo com desenho intraparticipantes é necessário para testar as diferenças no FRN entre *feedback* atrasado e imediato.

Atrasar o *feedback* envolve a manipulação da variável tempo, sendo uma consideração especial dos estudos de percepção de tempo também necessária. O tempo parece ser um aspecto crucial no sistema

dopaminérgico, pois este sistema codifica não apenas o valor das recompensas, mas também o tempo em que elas ocorrem (Schultz, 1998). Alguns estudos (Lewis & Miall, 2006; Meck, 1996; Rammsayer, 2008) demonstraram que a dopamina está também envolvida na percepção de tempo, sendo parte do que é referido como o hipotético “relógio interno”, utilizado para contar o tempo dos intervalos: a velocidade do marca-passo de relógio está positivamente relacionada ao nível efetivo de dopamina. Em geral, este relógio interno pode rodar mais rápido ou mais lento de acordo com uma série de fatores como emoções (Angrilli, Cherubini, Pavese, & Mantredini, 1997; Droit-Volet & Meck, 2007), atenção (Pouthas & Perbal, 2004) e ativação²² (Angrilli, et al., 1997; Droit-Volet, Fayolle, & Gil, 2011; Mella, Conty, & Pouthas, 2011). Estudos demonstraram que o nível de ativação induziu os participantes a superestimar o tempo, ou seja, o tempo parece passar mais devagar quando a ativação está alta. Ainda não foi investigado se o nível de ativação poderia também afetar as respostas psicofisiológicas ao *feedback* atrasado, uma vez que ele pode alterar a percepção de tempo ou o “relógio interno”.

Além disso, a interação entre o atraso no *feedback* e a ativação nas variáveis psicofisiológicas associadas ao processamento de erro está amplamente não caracterizada. Assim, o presente estudo teve como objetivo investigar as diferenças no FRN e nas respostas eletrodérmicas fásicas (EDA), uma medida também de ativação, e as diferenças entre o *feedback* atrasado e imediato, após induções de humor de alta e baixa ativação. A hipótese foi que haveria maior EDA em resposta ao *feedback* imediato, pois a significância do erro é maior nessa condição (Hajcak, McDonald, & Simons, 2003), o que é, em princípio, um processo diferente da predição de erro. Outra hipótese foi que o *feedback* atrasado estaria associado com maior FRN (menos positivo) após a indução de alta ativação em resposta ao *feedback* atrasado, pois a ativação pode fazer com que o “relógio interno” rode mais rápido, levando à lentificação mental do tempo que faz com que o atraso pareça mais longo do que realmente é (Droit-Volet, et al., 2011). Se essa hipótese estiver correta, as maiores diferenças nas respostas EDA em

²² O termo original é, em inglês, *arousal*, palavra que tem como significado o nível de ativação cerebral do sujeito. Estados de ansiedade ou excitação são conhecidos por aumentar o nível de ativação do cérebro. Nesse texto, ativação é a palavra utilizada para designar este estado mental de maior ativação, que pode ter valência positiva, como por exemplo, a empolgação e quanto negativa, como a ansiedade.

resposta ao *feedback* imediato e atrasado acontecerão após a indução de alta ativação. A lógica por trás deste argumento é que se a ativação faz o relógio interno rodar mais rápido, ela amplificará as diferenças introduzidas pelo atraso no *feedback*.

6.2 MÉTODO

6.2.1 Participantes

Vinte adultos saudáveis com idade entre 21 e 32 anos participaram voluntariamente deste estudo (oito mulheres). Dois participantes foram descartados devido à presença excessiva de artefatos musculares e outro pela alta presença de ruído nos eletrodos de referência nos lobos auriculares. Isto resultou em dados de 17 participantes que foram utilizados para a análise. Todos os participantes assinaram o termo de consentimento livre e esclarecido antes do início da sessão experimental. O protocolo deste estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética do Departamento de Psicologia da *Goldsmiths College, University of London*.

6.2.2 Tarefa Experimental

Este estudo teve um desenho com dois fatores principais: a indução de ativação (alta vs. baixa) e o tempo do *feedback* (imediato vs. atrasado). A ativação foi induzida utilizando estímulos visuais e auditivos, apresentados simultaneamente como uma apresentação combinada de fotos e músicas específicas. Essa forma de indução de humor combinada (visual + auditiva) foi escolhida devido à mesma ser considerada um indutor de ativação mais poderoso do que a apresentação isolada dos estímulos (Baumgartner, Lutz, Schmidt, & Jancke, 2006). Para a estimulação visual, foram escolhidas 200 fotos de uma base de dados validada para a indução de diferentes estados emocionais, o *International Affective Picture System* (IAPS), que pode ser traduzido como o Sistema Internacional de Fotos Emocionais (Lang, Bradley, & Cuthbert, 1997). Esse Sistema possui um esquema validado de classificação de cada foto em relação ao seu respectivo nível de ativação, que varia de 1 a 9 (menor até maior ativação). Cem fotos com média de ativação com 5.5 ou mais pontos foram utilizadas para a indução de alta ativação. Outras 100 fotos com média de ativação abaixo de 3.5 foram utilizadas para a indução de baixa ativação. A valência foi

equivalente nos dois grupos (alta e baixa ativação), sendo que os conjuntos de estimulação foram equiparados em relação ao número de fotos com valência positiva e negativa. Cinquenta fotos selecionadas aleatoriamente entre as 100 e foram utilizadas para cada conjunto de ativação, totalizando quatro conjuntos.

Como estímulo auditivo, quatro músicas foram utilizadas. Para a indução de alta ativação, utilizou-se: *Georges Bizet – Carmen Overture*, e *Mozart – Sonata for two pianos in D major K. 448*. Para a indução de baixa ativação, foram utilizadas: *Samuel Barber – Adagio for strings op.11* e *Albioni – Adagio in G minor*. A duração de cada indução de humor foi de cinco minutos. Cada peça musical foi tocada em conjunto com a apresentação de 50 fotos do mesmo conjunto de indução (alta ou baixa ativação) de forma sincronizada. Cada foto permaneceu na tela por seis segundos, sendo as mesmas apresentadas em ordem aleatória. No total foram utilizados dois conjuntos de indução de alta ativação e dois conjuntos de baixa ativação.

Após cada indução de humor, os participantes eram solicitados a realizar uma tarefa de produção temporal, que é tradicionalmente utilizada para provocar o FRN (Holroyd & Krigolson, 2007; Miltner, et al., 1997). Neste estudo o participante era instruído a pressionar um botão assim que ele ou ela pensasse que o intervalo de 1700 ms havia passado a partir de um aviso sonoro. O *feedback* era apresentado após a resposta indicando a exata diferença entre o intervalo produzido pelo participante e o alvo em unidades de milissegundos (*feedback* graduado).

Houve quatro condições experimentais: indução de alta (1) e baixa (2) ativação combinadas com as condições de *feedback* imediato (1) e atrasado (2), cada uma destas consistindo em 75 tentativas. O intervalo entre tentativas foi mantido o mesmo em todas as condições (4500 ms). Observe na figura 1 a descrição do desenho experimental com os detalhes dos tempos entre resposta e *feedback* e as tentativas.

A fim de evitar que a ordem das condições interferisse com os resultados, a ordem foi alternada entre os participantes de forma semialeatória. As condições de *feedback* atrasado e imediato foram sempre alternadas, sendo que metade dos participantes iniciaram a tarefa com *feedback* atrasado e a outra metade com o imediato. A indução de humor foi aleatorizada, mas as condições de *feedback* (atrasado e imediato) foram realizadas duas vezes: uma precedida por indução de alta ativação e outra por baixa ativação.

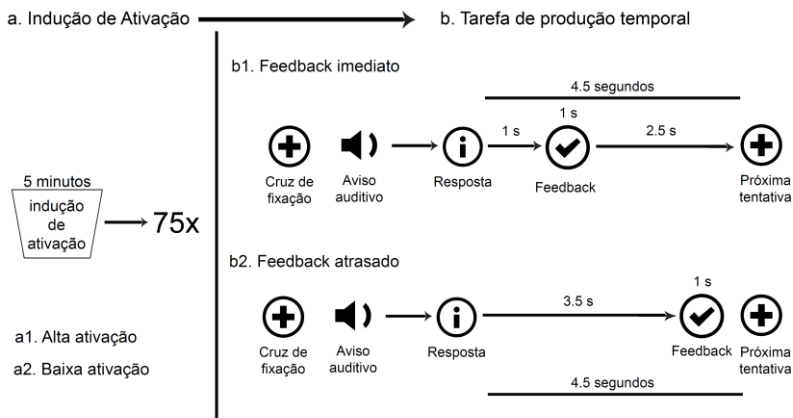


Figura 1. Visão esquemática do paradigma experimental; (a) Cinco minutos de indução de humor com alta (a1) e baixa (a2) ativação emocional; (b) Tarefa de produção temporal com *feedback* imediato (b1) ou atrasado (b2). Observe que o intervalo entre tentativas, ou seja, o intervalo entre a resposta do participante e o início da próxima tentativa, foi fixado em 4.5 segundos para ambas as condições.

6.2.3 Atividade eletrodérmica (EDA)

A EDA foi mensurada em *Ohms* utilizando o equipamento de resposta galvânica da pele acoplado ao *Biosemi (ActiveTwo, Biosemi Inc)*, com uma corrente de excitação de 512 Hz. A excitação desse aparelho é sincronizada com a taxa amostral do EEG com a finalidade de evitar qualquer possível interferência. Os dois eletrodos de prata clorada (*Ag-AgCl*) foram posicionados nas superfícies palmares das falanges distais da mão esquerda dos participantes, que foram instruídos a responder com a mão direita apenas. Antes de fixar os eletrodos, os participantes eram instruídos a lavar as mãos. Após o registro, o sinal de EDA foi filtrado utilizando um filtro *Butterworth* passa-banda entre 0.5 e 5 Hz de ordem 8. O processamento dos dados de EDA foi realizado em MATLAB^(R) (*The MathWorks Inc., Natick, MA*) com programas personalizados e desenvolvidos pela própria autora da tese.

6.2.4 Registro de EEG

Os sinais de EEG foram adquiridos por meio de um sistema de EEG (*Biosemi ActiveTwo*, *Biosemi Inc.*) com 64 canais (sistema 10-20 estendido) coletados por meio de eletrodos ativos em um cubículo eletricamente isolado. As piscadas foram monitoradas por meio de eletrodos posicionados acima e abaixo do olho direito (EOG vertical) e os movimentos oculares horizontais observados por meio de outros dois eletrodos posicionados ao lado do olho direito e esquerdo (EOG horizontal). Eletrodos externos adicionais foram posicionados nos lobos auriculares direito e esquerdo para servirem como referências. A taxa amostral foi de 512 Hz, sendo os dados banda-passa filtrados entre 0.16 e 100 Hz durante os registros. A tarefa foi programada e apresentada em um PC utilizando a *toolbox Cogent 2000* (<http://www.vislab.ucl.ac.uk/cogent.php>) em MATLAB.

Os sinais de EEG foram algebricamente re-referenciados à média aritmética dos sinais coletados nos lobos auriculares direito e esquerdo. Além disso, os dados foram filtrados utilizando um filtro passa-alta de 0.5 Hz e um passa-baixa de 35 Hz. As épocas foram extraídas centradas no *feedback* (-0.6 s a 1 s). Os artefatos foram tratados de maneira semiautomática: após uma inspeção visual com a finalidade de remover artefatos de atividade muscular, procedeu-se a Análise dos Componentes Independentes (ICA) para a correção dos artefatos de piscada. Feita esta correção, foram excluídas as épocas contendo amplitudes maiores de 80 μV (< 11% das épocas). O pré-processamento do EEG foi realizado em MATLAB utilizando a *toolbox EEGLAB* (Delorme & Makeig, 2004), e os ERPs analisados utilizando a *toolbox Fieltrip* (Oostenveld, et al., 2011). A amplitude média durante os 200 ms precedentes ao *feedback* foi utilizada como linha de base, sendo subtraída dos ERPs.

6.2.5 Análise Estatística

Cada variável dependente (EDA, FRN e desempenho) foi inserida em uma 2 x 2 ANOVA de medidas repetidas com os fatores **tempo do feedback** (imediate vs. atrasado) e **ativação** (alta e baixa ativação) como variáveis independentes, intraparticipantes. Com o objetivo de testar as diferenças específicas entre **feedback imediato** e **atrasado** em cada condição, testes t pareados foram utilizados. O FRN foi obtido extraído-se a média da amplitude nos eletrodos médios-

frontais (Fz e FCz) entre 200 e 300 ms após o *feedback*. Os valores de resistência da pele foram normalizados dividindo-se os seus respectivos valores em cada ponto no tempo pela média da resistência da pele em todas as tentativas e condições (média de todas condições). Isto foi feito porque o período pré-*feedback* poderia diferir entre as condições, dado que o tempo entre a resposta e o *feedback* foi diferente. Para as comparações utilizou-se os valores médios da tentativa inteira e também a média entre .5 e 1.5 segundos após o *feedback*.

Para as variáveis comportamentais, o erro absoluto médio (diferença entre a estimação do participante e o alvo) foi utilizado. Adicionalmente, foram analisadas as diferenças entre as condições em relação ao quão eficientemente os participantes ajustaram as suas estimativas com base no *feedback*. A eficiência do ajuste foi mensurada de acordo com a seguinte equação:

$$AE = \frac{e(i-1) - e(i)}{e(i-1)} = \frac{\Delta e}{e(i-1)}$$

(mesma equação descrita no estudo 1)

Nessa equação, o erro absoluto (e) da tentativa atual (i) é subtraído da anterior ($i-1$), o que fornece uma medida geral de redução do erro na tentativa atual, ou seja, o quanto melhor ela foi. Após essa subtração, divide-se este valor pelo erro total obtido na tentativa anterior, de forma que a eficiência do ajuste é proporcional à quantidade de ajuste necessária. Essa normalização foi feita com base no pressuposto de que ajustes feitos após erros grandes são mais fáceis de serem feitos do que aqueles ajustes finos, de erros pequenos.

6.3 RESULTADOS

6.3.1 Resultados comportamentais

Em relação ao desempenho na tarefa de produção temporal, mensurado como a diferença absoluta entre os intervalos produzidos pelos participantes e o alvo (1700 ms), conforme pode-se observar na figura 2a (lado esquerdo), não foram encontradas diferenças significativas entre as condições, nem para a variável **tempo do feedback** ($F(1, 16) = 2.711, p = .119, \eta^2 = .145$), nem para **ativação** ($F(1, 16) = 0.207, p = .655, \eta^2 = .013$), bem como não foram encontrados efeitos interativos entre estas variáveis ($F(1, 16) = 0.032, p = .861, \eta^2 = .002$). Testes t pareados entre as duas condições de *feedback* (imediate vs. atrasado) também não indicaram diferenças significativas ($p > .1$ para todas as comparações).

No entanto, houve uma diferença significativa em relação ao quanto bem os participantes ajustaram o seu desempenho (figura 2 – lado direito). Houve um efeito principal da variável **tempo do feedback** na eficiência de ajuste ($F(1, 16) = 6.25, p = .024, \eta^2 = .281$), que indicou que os ajustes foram feitos mais eficientemente quando o *feedback* foi imediato. Não houve efeito significativo para a **ativação** ($F(1, 16) = 0.118, p = .735, \eta^2 = .007$), bem como não foi encontrada interação entre a ativação e o tempo do *feedback* ($F(1, 16) = 0.274, p = .608, \eta^2 = .017$). Testes t pareados indicaram que o ajuste foi significativamente mais eficiente quando o *feedback* foi imediato apenas na condição de alta ativação ($t_{(16)} = 2.78, p = .013$), mas não quando a baixa ativação foi induzida ($t_{(16)} = 1.34, p = 0.199$).

6.3.2 Resultados da Atividade Eletrodérmica

Com a finalidade de verificar se a indução de ativação foi eficaz a ponto de provocar um aumento na atividade do sistema nervoso simpático, os níveis de EDA foram analisados durante tais estimulações. As condições foram comparadas por meio de uma 2 x 2 ANOVA para medidas repetidas com a variável **ativação** (alta vs. baixa) e o conjunto de indução (conjunto 1 vs. conjunto 2) como fatores intraparticipantes. Cada conjunto de indução foi composto pela combinação de fotos e música (dois conjuntos para alta e dois para indução de baixa ativação).

Os resultados indicaram um efeito significativo da **ativação** na EDA ($F(1, 16) = 18.036, p = .001, \eta^2 = .530$), mas não para o conjunto de indução ($F(1, 16) = 1.521, p = .235, \eta^2 = 0.087$), nem interação ($F(1, 16) = 0.425, p = .524, \eta^2 = .026$). A EDA (resistência da pele) foi menor, ou seja, maior atividade simpática, para as induções de alta ativação, independente do conjunto de indução (1 ou 2).

Durante a tarefa de produção temporal, o nível de EDA, na época inteira, foi mais baixo para a condição de alta ativação (figura 2b, lado esquerdo), mas essa tendência não foi estatisticamente significativa ($t_{(16)}=1.229, p=0.237$). Ao comparar o nível de EDA entre todas as condições (2x2 ANOVA para medidas repetidas), não foram encontrados efeitos significativos nem para **ativação** ($F(1, 16) = 1.511, p = .237, \eta^2 = .012$) nem para **tempo do feedback** ($F(1, 16) = 0.193, p = .666, \eta^2 = .086$). No entanto, houve uma interação marginalmente significativa entre **ativação e tempo do feedback** ($F(1, 16) = 4.238, p = .056, \eta^2 = .209$), pois a EDA foi menor (maior atividade nervosa simpática) para *feedback* imediato, mas apenas na condição de alta ativação (figura 2b, lado direito).

Foram também investigadas as respostas eletrodérmicas fásicas para cada condição. A partir da inspeção da trajetória temporal da resposta média de EDA para cada condição, extraiu-se o valor médio de EDA entre 0.5 e 1.5 segundos após a apresentação de *feedback* para análise estatística com os mesmos fatores intraparticipantes, **tempo do feedback** e **ativação**. Embora não tenham sido encontrados efeitos para essas variáveis separadamente, observou-se uma interação significativa entre as mesmas ($F(1, 16) = 5.998, p = .026, \eta^2 = .273$). Essa interação se deve ao fato de que o *feedback* imediato esteve associado com maior redução da resistência da pele na condição de alta ativação, sendo esse efeito oposto após indução de baixa ativação (figura 2c).

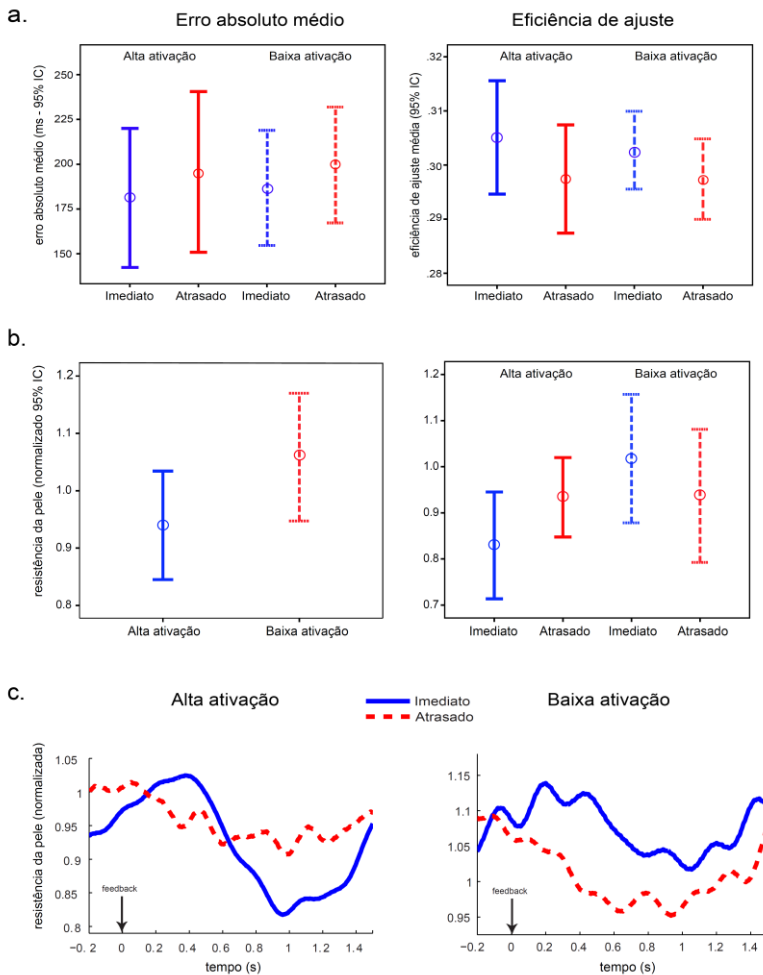


Figura 2. Desempenho na tarefa e respostas eletrodérmicas. (a) Lado esquerdo: média do erro absoluto e intervalos de confiança para as tentativas com *feedback* imediato e atrasado precedidas por induções de alta (linha sólida) e baixa ativação (linha pontilhada). Lado direito: média da eficiência do ajuste nas quatro condições. (b) Lado esquerdo: média e intervalos de confiança da EDA durante as induções de alta e baixa ativação. Observe que valores mais baixos representam maior ativação. Lado direito: EDA média entre 0.5 e 1.5 s após o *feedback* para as quatro condições. (c) Curso temporal da EDA durante o período entre -0.2 a 1.5 s após a apresentação de *feedback* imediato (linhas sólidas) e atrasado (linha pontilhada) após a indução de alta (lado esquerdo) e baixa (lado direito) ativação.

6.3.3 Resultados dos ERPs

Em relação aos ERPs relacionados ao *feedback*, foi encontrado um componente semelhante ao FRN (figura 3a). Os ERPs foram mais negativos na janela de tempo do FRN (200 a 300 ms após o *feedback*) para o *feedback* atrasado, quando comparado ao imediato, na condição de alta ativação (figura 3a). O impacto do tempo do *feedback* nos ERPs foi mais proeminente quando se observa as linhas de diferença (lado direito da figura 3a). A topografia da diferença (*feedback* atrasado menos imediato) assemelha-se à do FRN, com uma distribuição predominantemente média-frontal, enquanto que o mapa da diferença entre *feedback* atrasado e imediato após a indução de baixa ativação mostra uma diferença frontal menor.

A seguir foram extraídas as médias da amplitude dos ERPs nos eletrodos FCz e Fz na janela de tempo do FRN (200 a 300 ms) e utilizadas como variável dependente em uma 2x2 ANOVA para medidas repetidas com os fatores: **tempo do *feedback*** e **ativação** como variáveis independentes. Os resultados indicaram que houve um efeito significativo do **tempo do *feedback*** na amplitude do FRN ($F_{(1)}=15.37$, $p=0.001$, $\eta_p^2 = 0.490$), mas não para a **ativação** ($F_{(1)}=0.005$, $p=0.945$). Houve uma interação marginalmente significativa entre **tempo do *feedback*** e **ativação** ($F(1, 16) = 0.005$, $p = .945$). Testes t pareados revelaram que a diferença na amplitude deste componente semelhante ao FRN em resposta ao *feedback* imediato e atrasado foi apenas significativa após a indução de alta ativação ($t_{(16)} = 5.643$, $p < .001$), mas não quando a mesma foi baixa ($t_{(16)} = 1.612$, $p = .126$).

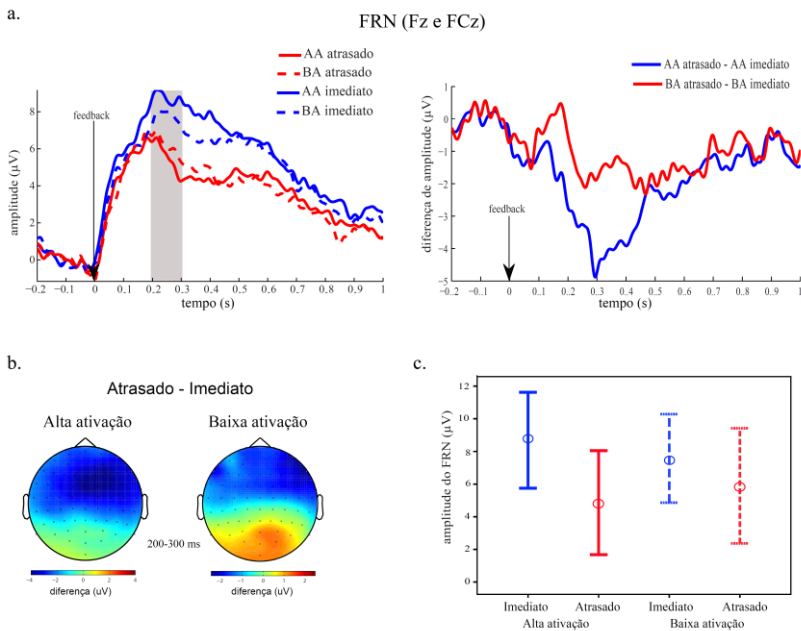


Figura 3. Diferença nos ERPs: feedback imediato vs. atrasado. (a) Lado esquerdo: a média dos ERPs nos eletrodos da linha média-frontal (Fz e FCz) para as quatro condições. Lado direito: as diferenças nos ERPs em resposta ao *feedback* atrasado e imediato após as induções de alta (AA) e baixa (BA) ativação. (b) Mapas topográficos da diferença nos ERPs do *feedback* atrasado e imediato entre 200 e 300 ms após o mesmo. (c) Médias e intervalos de confiança da amplitude do FRN nos eletrodos FCz e Fz entre 200 e 300 ms após o *feedback* nas quatro condições do estudo.

6.4 DISCUSSÃO

O objetivo deste estudo foi compreender as possíveis interações entre a ativação e o processamento de *feedback* atrasado. Para endereçar essa questão, foram registrados os ERPs e a EDA durante a indução de alta e baixa ativação nos participantes e durante a realização subsequente de uma tarefa de produção temporal, na qual eles receberam *feedback* imediato e atrasado sobre o seu desempenho em cada tentativa. A hipótese principal foi que se a ativação afeta a percepção de tempo dos indivíduos (Angrilli, et al., 1997; Droit-Volet, et al., 2011; Droit-Volet & Meck, 2007), as diferenças psicofisiológicas entre a resposta ao *feedback* imediato e atrasado seriam maiores quando a ativação fosse alta, uma vez que a alta ativação aceleraria o pressuposto “relógio interno”.

Os resultados sustentaram esta hipótese, pois foi verificado que as diferenças no FRN e nas respostas eletrodérmicas foram maiores após a indução de alta ativação. Ressalta-se que o FRN não foi analisado como a diferença entre *feedback* correto e incorreto, mas como uma resposta ao *feedback* de erro de diferentes magnitudes. Isto foi necessário porque a tarefa teve que ser programada com o número mínimo de tentativas possível por bloco, considerando que a indução de humor não dura por um longo período. No entanto, o FRN não definido como uma onda de diferença, mesmo sendo este muitas vezes estudado como tal, mas como uma deflexão negativa no ERP que inicia cerca de 145 ms após o *feedback* de erro (Miltner, et al., 1997), conceito que está de acordo com o que foi feito no presente estudo.

Devido ao fato de que o atraso no *feedback* enfraquece a associação entre a resposta e o resultado, se torna mais difícil resgatar e corrigir a ação que gerou a resposta. Este parece ter sido o caso neste estudo, pois a eficiência de ajuste foi significativamente menor durante os blocos com *feedback* atrasado, mas a diferença foi apenas significativa quando esta condição foi precedida por indução de alta ativação. Além disso, o erro absoluto médio não diferiu entre as condições, indicando que este efeito não pode ser explicado puramente pela diferença no desempenho resultante da manipulação do tempo do *feedback*.

Estudos com análise de célula única em animais sugerem que atrasar o *feedback* faz com que as respostas dopaminérgicas aumentem frente à recompensa, enquanto que o *feedback* imediato promove uma aprendizagem mais rápida, tornando estas respostas maiores para os estímulos e menores para as recompensas (Fiorillo, et al., 2008;

Kobayashi & Schultz, 2008). Se o FRN representa a respostas fásicas dopaminérgicas (projetadas ao ACC), como sugerido por outros estudos (Holroyd & Coles, 2002; Santesso, et al., 2009), seria esperado que atrasos no *feedback* causassem maior FRN, conforme foi observado no presente estudo. Verificou-se que esta resposta foi maior após a indução de alta ativação, o que sugere a possibilidade de que o atraso no *feedback* tenha sido percebido como mais longo do que ele realmente foi. A relação explícita entre percepção de tempo e ativação foi demonstrada em outros estudos (Angrilli, et al., 1997; Droit-Volet, et al., 2011; Droit-Volet & Meck, 2007) e vai ao encontro dos resultados encontrados, pois tais estudos observaram que quanto maior o nível de ativação dos sujeitos, mais eles tendiam a superestimar o tempo, o que significa que o tempo passa mais devagar quando a ativação está alta.

As respostas fásicas eletrodérmicas foram associadas ao processamento de estímulos relevantes à realização da tarefa sendo aprendida (Bernstein, Taylor, & Weinstein, 1975; Bernstein, Taylor, Weinstein, & Riedel, 1985). No entanto, no campo de processamento de *feedback* e recompensas, as respostas eletrodérmicas fásicas têm sido amplamente negligenciadas (Hajcak, et al., 2003; Lole, Gonsalvez, Blaszczynski, & Clarke, 2011; Wilkes, Gonsalvez, & Blaszczynski, 2010). Estudos analisando o processamento de recompensas durante a aposta em jogos de azar encontraram respostas eletrodérmicas mais altas (maiores em ativação simpática) em respostas aos ganhos em relação as perdas (Lole, et al., 2011; Wilkes, et al., 2010). Por outro lado, estudos analisando as respostas eletrodérmicas ao *feedback* encontraram maior ativação em resposta aos erros (Hajcak, et al., 2003) (O'Connell, Bellgrove, Dockree, & Robertson, 2004). Crianças com transtorno do déficit de atenção e hiperatividade apresentaram respostas eletrodérmicas mais baixas aos erros do que as crianças do grupo controle (O'Connell, et al., 2004). Os autores argumentaram que isto pode indicar um problema no sistema de monitoramento do desempenho destas crianças, sugerindo que a relevância dos erros parece ser menor para os portadores do transtorno. Tais resultados oferecem também suporte à hipótese de que, quanto mais relevante a informação que o *feedback* contém, maior as respostas eletrodérmicas fásicas a ele. No presente estudo foi observado maiores respostas EDA ao *feedback* imediato, o que pode indicar que ao atrasar a informação reduz-se também a sua relevância para o monitoramento do desempenho. Esta pode ter sido a razão pela qual foi observada uma reduzida eficiência de ajuste durante os blocos com *feedback* atrasado.

O FRN foi maior (mais negativo) para o *feedback* atrasado, mas a diferença foi mais significativa após a indução de alta ativação. Foi encontrado apenas um estudo comparando os ERPs entre *feedback* imediato e atrasado (Opitz, et al., 2011). Os autores deste estudo encontraram um menor FRN (mais positivo) em resposta ao *feedback* atrasado, o que é o oposto do que foi encontrado no presente estudo. Existem duas razões associadas com o desenho do estudo de Opitz et al. (2011) que pode ter causado o resultado oposto. A primeira razão é que o grupo com *feedback* atrasado apresentou um pior desempenho do que o grupo com *feedback* imediato, o que pode ter influenciado no valor motivacional do mesmo, e conseqüentemente, no FRN, uma vez que estas variáveis estão associadas (van Meel, Heslenfeld, Oosterlaan, Luman, & Sergeant, 2011). A segunda razão, e talvez a mais importante, é que o erro foi significativamente mais frequente para o grupo que realizou a tarefa com *feedback* atrasado, o que pode ter tornado o *feedback* de erro mais esperado, e, conseqüentemente, reduzido o FRN em resposta ao mesmo, uma vez que quanto maior a probabilidade de um erro, menor o FRN em resposta a ele (Chase, et al., 2011; Holroyd, et al., 2009; Oliveira, et al., 2007; Potts, et al., 2010).

No presente estudo, o atraso de 2.5 s foi relativamente pequeno quando comparado a outros estudos com atrasos de até 10 s e que mostraram um efeito negativo deste atraso no desempenho (Ell, Ing, & Maddox, 2009; Foerde & Shohamy, 2011). No entanto, atrasos curtos como o utilizado no presente estudo podem prejudicar o desempenho quando a habilidade a ser aprendida é complexa ou implícita (Lieberman, et al., 2008). Adicionalmente, o intervalo entre tentativas foi mantido o mesmo em todas as condições, o que é diferente de outros estudos nos quais o *feedback* atrasado foi acompanhado de um maior intervalo entre uma tentativa e outra (Foerde & Shohamy, 2011; Opitz, et al., 2011). Ao manter o mesmo intervalo entre tentativas pode se ter reduzido as diferenças esperadas no desempenho com *feedback* atrasado e imediato.

6.5 CONCLUSÃO

Em síntese, sugeriu-se que a ativação pode influenciar implicitamente o processamento de *feedback*, de forma a amplificar as diferenças induzidas pelo atraso ou pelo aumento do intervalo de tempo entre a resposta e o *feedback*. Os resultados sugerem uma ligação entre percepção de tempo, ativação e processamento de *feedback*. Esta

associação foi sustentada tanto pelos resultados comportamentais (eficiência de ajuste) quanto pelos correlatos psicofisiológicos de respostas centrais (FRN) e periféricas (EDA). Novos estudos são necessários para elucidar como o atraso no *feedback* poderia impactar na aprendizagem em sujeitos com altos e baixos níveis de ativação. Além disso, pesquisas sobre como se pode manipular o *feedback* e o tempo com a finalidade de aprimorar o desempenho ou acelerar o processo de aprendizagem seriam também importantes.

7 DISCUSSÃO GERAL E COMENTÁRIOS FINAIS

Considerando que as discussões relacionadas aos resultados específicos desta tese foram apresentadas junto a cada estudo Este capítulo tem como foco destacar a relação entre o que foi encontrado nestes quatro diferentes estudos. É importante ressaltar que o estudo 4 teve o propósito de introduzir novas discussões, mas que a relação do mesmo com os demais é limitada. No entanto, algumas novas hipóteses conectando os resultados dos três primeiros estudos com os resultados preliminares do estudo 4 são propostas, assim como, perspectivas para novos estudos na área de aprendizagem guiada por *feedback* e aprendizagem sensoriomotora são delineadas. Listas extensivas de citações foram evitadas neste texto, a fim de tornar a discussão mais objetiva e fluída. Para maiores referências ou discussão detalhada em tópicos específicos, sugere-se a leitura de outras seções, como a, introdução, a revisão de literatura e a discussão de cada estudo. No último tópico desta seção, o novo modelo proposto no campo da aprendizagem guiada por *feedback* (Cohen, et al., 2011) é discutido e analisado em relação aos resultados desta tese.

7.1 O FRN E A ENERGIA RELATIVA DE TETA SÃO SENSÍVEIS A ASPECTOS DISTINTOS DO *FEEDBACK*

Os resultados dos estudos 1, 2 e 3 sustentam a hipótese de que o FRN e as oscilações teta na área média frontal são sensíveis a diferentes características do processamento de *feedback*. Observou-se que o FRN é maior após a apresentação de *feedback* indicando erros grandes em relação aos pequenos, o que demonstra que este componente de ERP é sensível à magnitude do erro cometido. Por outro lado, as oscilações em teta foram semelhantes após erros grandes e pequenos, o que sugere que as mesmas não são sensíveis à magnitude do erro comunicada pelo *feedback*. No estudo 2 foi encontrado que ambos FRN e oscilações em teta aumentaram em resposta ao *feedback* indicando resposta incorreta no grupo dos bons aprendizes (note que no estudo 2 o *feedback* era categórico). Este resultado pode indicar que a energia de teta está relacionada ao desempenho apenas quando o *feedback* é categórico, enquanto que o FRN não parece estar relacionado à aprendizagem da tarefa de produção temporal, tanto com *feedback* graduado quanto com

feedback categórico. No terceiro estudo evidenciou-se que as oscilações teta na área média-frontal são uma assinatura da aprendizagem com *feedback* categórico, mas não com a informação graduada. O FRN foi maior em resposta ao *feedback* graduado, o que é exatamente o oposto dos encontrados para a energia de teta. Enquanto a energia de teta aumentou após o *feedback* categórico, o FRN respondeu com maiores amplitudes (mais negativas ou menores) ao *feedback* graduado, sugerindo que estes dois correlatos são sensíveis a aspectos distintos do *feedback*.

Tem sido sugerido que o FRN está envolvido na codificação de erros de predição de recompensa (Holroyd & Coles, 2002), e que o mesmo é sensível à magnitude da mesma. Poucos estudos estão disponíveis sobre as oscilações teta relacionadas ao processamento de *feedback*, mas os encontrados indicam que as respostas oscilatórias nesta frequência estão associadas com uma série de características do *feedback*, incluindo: incerteza (Cavanagh, et al., 2011; Christie & Tata, 2009), *feedback* de erro ou negativo (van de Vijver, et al., 2011), perdas (Cohen, et al., 2007), novidade e punição (Cavanagh, et al., 2012). Alguns estudos sugeriram que o FRN e a energia de teta refletem aspectos diferentes do processamento de *feedback* (Christie & Tata, 2009; Cohen, et al., 2007), mas em geral, nenhum estudo havia encontrado tendências opostas para estes dois sinais, como foi verificado na presente tese.

Com base nos resultados dos estudos apresentados e na literatura, sugere-se que as oscilações teta na área média-frontal sejam sensíveis à incerteza presente no *feedback* categórico (incompleto), servindo para sinalizar a necessidade de exploração de novas estratégias de resposta. Por outro lado, sugere-se que o FRN seja mais sensível à magnitude do erro comunicado pelo *feedback*, tanto a magnitude do erro de predição, como a do erro em si mesmo (muito ou pouco errado), dado que este componente de ERP foi mais sensível às diferentes magnitudes comunicadas pelo *feedback* graduado (pequeno vs. grande) e também ao certo e errado (*feedback* categórico). Um estudo sugeriu que mesmo sendo gerados no ACC, estes correlatos neurais (ondas teta e FRN) são originados em diferentes subdivisões do mesmo e, portanto, representam fenômenos distintos (Christie & Tata, 2009). van de Vijver et al. (2011) verificaram que enquanto o FRN não foi preditivo do ajuste correto na tentativa seguinte, a energia de teta o foi, mas apenas após *feedback* incorreto. Assim, sugere-se que enquanto o FRN é parte de um sistema de detecção de erros que sinaliza a presença e relevância dos mesmos, as oscilações médias-frontais na frequência teta refletem a atividade de

partes do ACC que são responsáveis pela identificação de incerteza com o objetivo de provocar a exploração de novas estratégias, função esta pertencente ao escopo de finalidades do ACC (Quilodran, et al., 2008). No estudo 3 observou-se que a energia de teta em resposta ao *feedback* categórico incorreto é provavelmente gerada na porção dorsal direita do ACC (BA 32). Além disso, verificou-se que esta origem foi significativamente mais ativa em resposta ao *feedback* categórico do que ao graduado. Juntos, estes resultados permitem sugerir que as oscilações em teta são uma assinatura da aprendizagem baseada em recompensas (discutida na revisão de literatura), e que este processo serve para detectar e resolver a incerteza presente na informação incompleta (categórica), a fim de guiar a exploração (para mais informações sobre este tópico, ler a discussão do estudo 3).

7.2 DESSINCRONIZAÇÃO DE BETA NAS ÁREAS MOTORAS CONTRALATERAIS

Estudos prévios sugeriram que o *feedback* positivo está associado com uma maior energia na faixa de frequência de beta nos eletrodos centrais esquerdos, ou seja, nas áreas motoras contralaterais à mão de resposta (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares, et al., 2008; van de Vijver, et al., 2011). Os autores destes estudos sugeriram que este aumento, ou sincronização local, reflete um sinal para manter o *status quo* do sistema motor após uma tentativa correta (van de Vijver, et al., 2011). No entanto, nesta tese foram reunidas evidências (estudos 1 e 2) de que beta dessincroniza após o *feedback*, e que esta redução de energia espectral é maior após o *feedback* indicando erros pequenos (estudo 1) ou resposta incorreta (estudo 2). Se uma maior energia de beta nas áreas motoras resultasse de um sinal para manter o *status quo* do sistema motor após o *feedback* correto, seria esperado encontrar um aumento nas oscilações beta após pequenos erros em comparação aos grandes, uma vez que é os erros pequenos se assemelham mais aos acertos do que os erros grandes. No estudo com *feedback* categórico, foi demonstrado que beta dessincroniza mais em resposta ao erro. Além disso, observou-se que participantes com maior dessincronização em beta nas áreas centrais esquerdas apresentaram melhor desempenho nos blocos sem *feedback*, tanto na condição categórica quanto na graduada. Na discussão do estudo 2, argumentou-se que beta dessincroniza em resposta ao *feedback* de desempenho e que a maior energia de beta após as recompensas em estudos com jogos de azar (Cohen, et al., 2007; Marco-Pallares, et al.,

2008) é de natureza diferente da encontrada na presente tese (ver a discussão do estudo 2 para maiores detalhes) e no outro estudo com *feedback* de *performance* (van de Vijver, et al., 2011). Além do mais, o estudo 1 demonstrou que houve uma sincronização em gama na área motora esquerda, acompanhada por um aumento no índice de lateralização (LI), que é frequentemente associado com processos de imaginação motora.

Dessa forma, sugere-se que a dessincronização de beta nas áreas motoras esquerdas encontradas nos estudos 1 e 2 reflitam processos relacionados ao resgate e correção mental da resposta prévia (que gerou o *feedback*). Isto poderia explicar o porquê foi encontrada uma dessincronização em resposta ao *feedback* graduado contendo erros pequenos e também ao categórico indicando resposta incorreta, uma vez que ambos os tipos de informação requerem um alto nível de resgate e reestruturação da resposta (ajustes pequenos são mais difíceis do que os grandes, da mesma forma que *feedback* incorreto categórico exige mais esforço do que o correto). É senso comum a noção de que é mais difícil melhorar algo que já está bom do que corrigir um erro grosseiro. Por exemplo, quando se joga tênis, é muito mais difícil resgatar e aprimorar um *topspin* que foi muito bom (como planejar desviar a bola um pouco mais para a esquerda da próxima vez), do que colocar a bola na quadra do oponente após perder um ponto por batê-la muito longe. Além disso, para o sistema motor, chegar perto do objetivo é provavelmente mais informativo, considerando que se aprende repetindo e reduzindo o erro incrementalmente, e resgatando e reforçando as tentativas corretas. No entanto, algum nível de erro é necessário, pois se observou que o *feedback* correto não provocou maior dessincronização do que o incorreto. Esse último resultado reforça a hipótese de que essa dessincronização em resposta aos erros pequenos não reflete um processo de reforço simples, mas sim, uma reelaboração ou reestruturação da tentativa.

Assim, sugere-se que a ativação das áreas motoras refletidas na dessincronização de beta, na sincronização de gama e no aumento do índice de lateralização, tem um papel importante na aprendizagem por meio de *feedback* de desempenho. No entanto, é difícil determinar se uma maior dessincronização nas áreas motoras após o *feedback* facilita a aprendizagem ou se é facilitada por ela, ou seja, se pessoas que aprendem melhor mostram maior dessincronização como resultado de melhores representações motoras da habilidade. Esta é ainda uma questão aberta. Um estudo utilizando estimulação transcraniana por corrente direta (tDCS) demonstrou que a estimulação da área motora

primária promoveu melhor retenção da habilidade motora, sugerindo que a maior ativação dessa área facilita a aprendizagem. Mesmo que os resultados até então apontem que os processos relacionados à imaginação motora para o resgate e correção das tentativas facilitem a aprendizagem, esta ainda é uma questão a ser investigada em novos estudos.

7.3 CONECTIVIDADE ENTRE ÁREAS CEREBRAIS DISTINTAS NAS FREQUÊNCIAS BETA E TETA ESTÃO RELACIONADAS À APRENDIZAGEM COM DIFERENTES TIPOS DE *FEEDBACK*

No estudo 1, com *feedback* graduado, foi encontrado que uma maior sincronização de fase na frequência beta (17-24 Hz) entre a área média-frontal e a motora está associada com a aprendizagem na tarefa de produção temporal. No estudo 2 com *feedback* categórico, observou-se que a conectividade em teta entre essas mesmas áreas foi mais relevante para a aprendizagem. Os poucos estudos encontrados analisando a conectividade entre áreas encontraram resultados significativos na frequência teta entre as áreas média-frontal e o córtex pré-frontal dorsolateral (eletrodos F5 e F6). Os autores destes estudos sugeriram que estas duas áreas sincronizam como resultado da detecção de erro na área média-frontal que sinaliza ao córtex pré-frontal dorsolateral a necessidade de aumentar o controle cognitivo.

Em ambos os estudos 1 e 2, o principal resultado de conectividade foi entre FCz e C3/CP3 (área média frontal e sensoriomotora) que possivelmente reflete uma operação cognitiva de comparação entre o *feedback* esperado e o obtido nas áreas motoras para uma subsequente atualização das expectativas (realizadas nas áreas pré-frontais dorsolaterais). Foi encontrado, no estudo 2, um aumento na conectividade entre a área média-frontal (FCz) e o córtex pré-frontal dorsolateral, especialmente o esquerdo (F5), na frequência teta, mas apenas mais tarde, entre 300 e 600 ms após o *feedback*. Surpreendentemente, a sincronização foi mais forte em resposta ao *feedback* correto para os maus aprendizes, mas com igual força para o grupo de bons aprendizes. Estes resultados não oferecem suporte à hipótese de que esta conexão reflete um sinal de aumento de controle cognitivo. Ao contrário, sugere-se que esta comunicação está relacionada ao processo de atualização e integração da história recente de reforço na memória de trabalho, o que deve acontecer independentemente do *feedback* ser correto ou incorreto. O fluxo de

informação encontrado indica que primeiramente as áreas motoras mandam sinais para a área média-frontal, que por sua vez envia esta informação ao córtex pré-frontal dorsolateral, a fim de atualizar as expectativas na memória de trabalho. Ressalta-se, no entanto, que é necessário ter cautela na interpretação destes resultados, pois a conectividade direcionada ainda não foi testada em outros estudos com aprendizagem.

7.4 APRENDER COM *FEEDBACK* ATRASADO INTERAGE COM O NÍVEL DE ATIVAÇÃO

No estudo 4 observou-se que o *feedback* atrasado está associado com maior amplitude de FRN. Além disso, verificou-se que o *feedback* imediato está associado à uma resposta eletrodérmica fásica (EDA) mais intensa ao *feedback* graduado de erro. Foram encontrados poucos estudos analisando as respostas fásicas ao *feedback* (Hajcak, et al., 2003; O'Connell, et al., 2004) ou à recompensa (Lole, et al., 2011), mas de maneira geral, os estudos indicam que quanto mais relevante a informação é, tanto cognitivamente (erros) quanto afetivamente (recompensas), maior as respostas eletrodérmicas. No estudo 4, observou-se uma dissociação entre os efeitos encontrados no FRN e nas EDAs, mas ambas apresentaram interações na mesma direção: maiores diferenças entre *feedback* imediato e atrasado após a indução de alta em comparação à de baixa ativação. Esta dissociação se deve ao fato de que a EDA aumentou mais após o *feedback* imediato enquanto que o FRN foi maior em resposta ao atrasado. Argumenta-se que se o FRN codifica erros de predição de recompensa, este seria maior após o *feedback* atrasado, pois existe um intervalo maior entre a resposta e o *feedback* que enfraquece tal associação, e que se a EDA reflete a relevância do *feedback*, esta seria maior em resposta ao imediato, uma vez que o mesmo é mais eficiente e relevante para aprender. Além disso, os resultados permitiram especular que o nível de ativação afeta o intervalo percebido entre a resposta e o *feedback*, possivelmente fazendo o mesmo parecer mais longo do que realmente é. Sugere-se a realização de um estudo replicando o que foi feito no estudo 4, mas com a utilização de *feedback* categórico na forma de “correto” e “incorreto”. Isto porque se o *feedback* categórico depende mais das áreas cerebrais associadas ao processamento de recompensas, espera-se que a interação com o nível de ativação seja mais forte com o mesmo.

7.5 COMENTÁRIO FINAL

Nesta tese, foram investigadas algumas características do processamento de *feedback* para a aprendizagem. Por meio de uma série de estudos reuniu-se evidências de que a análise dos aspectos neurofisiológicos do processamento de *feedback* podem render *insights* sobre a complexidade dos processos cognitivos envolvidos na aprendizagem implícita. Partindo de resultados sobre como o ser humano lida com erros pequenos e grandes, ou sobre os diferentes sistemas neurais responsáveis por processar informação completa e incompleta, até a análise de como o estado de ativação influencia na percepção de tempo e conseqüentemente no processamento de *feedback* atrasado, foi observada apenas uma pequena parcela da complexa dinâmica envolvida na aprendizagem com *feedback*. Dessa forma, esta tese acaba abrindo mais questões do que encontrando respostas a um antigo problema: como nós aprendemos?

REFERÊNCIAS

- Agam, Y., Hamalainen, M. S., Lee, A. K., Dyckman, K. A., Friedman, J. S., Isom, M., et al. (2011). Multimodal neuroimaging dissociates hemodynamic and electrophysiological correlates of error processing. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *108*(42), 17556-17561.
- Angrilli, A., Cherubini, P., Pavese, A., & Mantredini, S. (1997). The influence of affective factors on time perception. *Percept Psychophys*, *59*(6), 972-982.
- Ashby, F. G., Alfonso-Reese, L. A., Turken, A. U., & Waldron, E. M. (1998). A neuropsychological theory of multiple systems in category learning. *Psychol Rev*, *105*(3), 442-481.
- Balconi, M., & Scioli, S. (2011). Error monitoring functions in response to an external feedback when an explicit judgement is required ERP modulation and cortical source localisation. *Int J Psychophysiol*.
- Baumgartner, T., Lutz, K., Schmidt, C. F., & Jancke, L. (2006). The emotional power of music: how music enhances the feeling of affective pictures. *Brain Res*, *1075*(1), 151-164.
- Bellebaum, C., & Daum, I. (2008). Learning-related changes in reward expectancy are reflected in the feedback-related negativity. *Eur J Neurosci*, *27*(7), 1823-1835.
- Bellebaum, C., Kobza, S., Thiele, S., & Daum, I. (2011). Processing of expected and unexpected monetary performance outcomes in healthy older subjects. *Behav Neurosci*, *125*(2), 241-251.
- Bellebaum, C., Polezzi, D., & Daum, I. (2010). It is less than you expected: the feedback-related negativity reflects violations of reward magnitude expectations. *Neuropsychologia*, *48*(11), 3343-3350.
- Bernstein, A. S., Taylor, K. W., & Weinstein, E. (1975). The phasic electrodermal response as a differentiated complex reflecting stimulus significance. *Psychophysiology*, *12*(2), 158-169.
- Bernstein, A. S., Taylor, K. W., Weinstein, E., & Riedel, J. (1985). The effect of stimulus significance on relatively sustained (tonic-like) and relatively transient (phasic-like) aspects of electrodermal, heart rate, and eyeblink response. *Biol Psychol*, *21*(3), 183-228.
- Brunia, C. H., Hackley, S. A., van Boxtel, G. J., Kotani, Y., & Ohgami, Y. (2011). Waiting to perceive: reward or punishment? *Clin Neurophysiol*, *122*(5), 858-868.
- Burkhard, D. G., Patterson, J., & Rapue, R. (1967). Effect of film feedback on learning the motor skills of karate. *Percept Mot Skills*, *25*(1), 65-69.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends Cogn Sci*, *4*(6), 215-222.
- Carp, J., & Compton, R. J. (2009). Alpha power is influenced by performance errors. *Psychophysiology*, *46*(2), 336-343.

- Carter, C. S., Macdonald, A. M., Botvinick, M., Ross, L. L., Stenger, V. A., Noll, D., et al. (2000). Parsing executive processes: strategic vs. evaluative functions of the anterior cingulate cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *97*(4), 1944-1948.
- Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. (2009). Prelude to and resolution of an error: EEG phase synchrony reveals cognitive control dynamics during action monitoring. *J Neurosci*, *29*(1), 98-105.
- Cavanagh, J. F., Figueroa, C. M., Cohen, M. X., & Frank, M. J. (2011). Frontal Theta Reflects Uncertainty and Unexpectedness during Exploration and Exploitation. *Cereb Cortex*.
- Cavanagh, J. F., Frank, M. J., Klein, T. J., & Allen, J. J. (2010). Frontal theta links prediction errors to behavioral adaptation in reinforcement learning. *Neuroimage*, *49*(4), 3198-3209.
- Cavanagh, J. F., Zambrano-Vazquez, L., & Allen, J. J. (2012). Theta lingua franca: A common mid-frontal substrate for action monitoring processes. *Psychophysiology*, *49*(2), 220-238.
- Chase, H. W., Swainson, R., Durham, L., Benham, L., & Cools, R. (2011). Feedback-related negativity codes prediction error but not behavioral adjustment during probabilistic reversal learning. *J Cogn Neurosci*, *23*(4), 936-946.
- Christie, G. J., & Tata, M. S. (2009). Right frontal cortex generates reward-related theta-band oscillatory activity. *Neuroimage*, *48*(2), 415-422.
- Cohen, M. X. (2008). Neurocomputational mechanisms of reinforcement-guided learning in humans: a review. *Cogn Affect Behav Neurosci*, *8*(2), 113-125.
- Cohen, M. X., Elger, C. E., & Fell, J. (2009). Oscillatory activity and phase-amplitude coupling in the human medial frontal cortex during decision making. *J Cogn Neurosci*, *21*(2), 390-402.
- Cohen, M. X., Elger, C. E., & Ranganath, C. (2007). Reward expectation modulates feedback-related negativity and EEG spectra. *Neuroimage*, *35*(2), 968-978.
- Cohen, M. X., & Ranganath, C. (2007). Reinforcement learning signals predict future decisions. *J Neurosci*, *27*(2), 371-378.
- Cohen, M. X., Wilmes, K., & Vijver, I. (2011). Cortical electrophysiological network dynamics of feedback learning. *Trends Cogn Sci*, *15*(12), 558-566.
- Damen, E. J., & Brunia, C. H. (1987). Precentral potential shifts related to motor preparation and stimulus anticipation: a replication. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, *40*, 13-16.
- Dayan, P., & Niv, Y. (2008). Reinforcement learning: the good, the bad and the ugly. *Curr Opin Neurobiol*, *18*(2), 185-196.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods*, *134*(1), 9-21.

- Diedrichsen, J., White, O., Newman, D., & Lally, N. (2010). Use-dependent and error-based learning of motor behaviors. *J Neurosci*, *30*(15), 5159-5166.
- Donamayor, N., Marco-Pallares, J., Heldmann, M., Schoenfeld, M. A., & Munte, T. F. (2011). Temporal dynamics of reward processing revealed by magnetoencephalography. *Hum Brain Mapp*, *32*(12), 2228-2240.
- Droit-Volet, S., Fayolle, S. L., & Gil, S. (2011). Emotion and time perception: effects of film-induced mood. *Front Integr Neurosci*, *5*, 33.
- Droit-Volet, S., & Meck, W. H. (2007). How emotions colour our perception of time. *Trends Cogn Sci*, *11*(12), 504-513.
- Ell, S. W., Ing, A. D., & Maddox, W. T. (2009). Criterial noise effects on rule-based category learning: the impact of delayed feedback. *Atten Percept Psychophys*, *71*(6), 1263-1275.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *78*(6), 447-455.
- Fiorillo, C. D., Newsome, W. T., & Schultz, W. (2008). The temporal precision of reward prediction in dopamine neurons. *Nat Neurosci*.
- Foerde, K., & Shohamy, D. (2011). Feedback timing modulates brain systems for learning in humans. *J Neurosci*, *31*(37), 13157-13167.
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., de Xivry, J. J., & Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: the motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cereb Cortex*, *21*(8), 1761-1770.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1990). The error-related negativity: an event-related brain potential accompanying errors. [abstract]. *Psychophysiology*, *27*(S34).
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A Neural System for Error Detection and Compensation. *Psychological Science*, *4*(6), 385-390.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, *295*(5563), 2279-2282.
- Goyer, J. P., Woldorff, M. G., & Huettel, S. A. (2008). Rapid electrophysiological brain responses are influenced by both valence and magnitude of monetary rewards. *J Cogn Neurosci*, *20*(11), 2058-2069.
- Gregorios-Pippas, L., Tobler, P. N., & Schultz, W. (2009). Short-term temporal discounting of reward value in human ventral striatum. *J Neurophysiol*, *101*(3), 1507-1523.
- Gross, J., Kujala, J., Hamalainen, M., Timmermann, L., Schnitzler, A., & Salmelin, R. (2001). Dynamic imaging of coherent sources: Studying

- neural interactions in the human brain. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98(2), 694-699.
- Gruendler, T. O., Ullsperger, M., & Huster, R. J. (2011). Event-related potential correlates of performance-monitoring in a lateralized time-estimation task. *PLoS One*, 6(10), e25591.
- Haber, S. N., & Fudge, J. L. (1997). The primate substantia nigra and VTA: integrative circuitry and function. *Crit Rev Neurobiol*, 11(4), 323-342.
- Hajcak, G., Holroyd, C. B., Moser, J. S., & Simons, R. F. (2005). Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes. *Psychophysiology*, 42(2), 161-170.
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2003). To err is autonomic: error-related brain potentials, ANS activity, and post-error compensatory behavior. *Psychophysiology*, 40(6), 895-903.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biol Psychol*, 71(2), 148-154.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2007). It's worse than you thought: the feedback negativity and violations of reward prediction in gambling tasks. *Psychophysiology*, 44(6), 905-912.
- Handy, T. C. (2005). *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge: The MIT Press.
- Heldmann, M., Russeler, J., & Munte, T. F. (2008). Internal and external information in error processing. *BMC Neurosci*, 9, 33.
- Herrmann, C. S., Grigutsch, M., & Busch, N. A. (2005). EEG Oscillations and Wavelet Analysis. In T. C. Handy (Ed.), *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge: The MIT Press.
- Hewig, J., Trippe, R., Hecht, H., Coles, M. G., Holroyd, C. B., & Miltner, W. H. (2007). Decision-making in Blackjack: an electrophysiological analysis. *Cereb Cortex*, 17(4), 865-877.
- Hirsh, J. B., & Inzlicht, M. (2008). The devil you know: neuroticism predicts neural response to uncertainty. *Psychol Sci*, 19(10), 962-967.
- Hollerman, J. R., & Schultz, W. (1998). Dopamine neurons report an error in the temporal prediction of reward during learning. *Nat Neurosci*, 1(4), 304-309.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 109(4), 679-709.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neurosci Lett*, 242(2), 65-68.
- Holroyd, C. B., & Krigolson, O. E. (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, 44(6), 913-917.

- Holroyd, C. B., Krigolson, O. E., Baker, R., Lee, S., & Gibson, J. (2009). When is an error not a prediction error? An electrophysiological investigation. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 9(1), 59-70.
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., & Cohen, J. D. (2003). Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *Neuroreport*, 14(18), 2481-2484.
- Izawa, J., & Shadmehr, R. (2011). Learning from sensory and reward prediction errors during motor adaptation. *PLoS Comput Biol*, 7(3), e1002012.
- Jessup, R. K., Busemeyer, J. R., & Brown, J. W. (2010). Error effects in anterior cingulate cortex reverse when error likelihood is high. *J Neurosci*, 30(9), 3467-3472.
- Kawashima, R., Tajima, N., Yoshida, H., Okita, K., Sasaki, T., Schormann, T., et al. (2000). The effect of verbal feedback on motor learning--a PET study. Positron emission tomography. *Neuroimage*, 12(6), 698-706.
- Kobayashi, S., & Schultz, W. (2008). Influence of reward delays on responses of dopamine neurons. *J Neurosci*, 28(31), 7837-7846.
- Kobza, S., Thoma, P., Daum, I., & Bellebaum, C. (2011). The feedback-related negativity is modulated by feedback probability in observational learning. *Behav Brain Res*, 225(2), 396-404.
- Krebs, H. I., Brashers-Krug, T., Rauch, S. L., Savage, C. R., Hogan, N., Rubin, R. H., et al. (1998). Robot-aided functional imaging: application to a motor learning study. *Hum Brain Mapp*, 6(1), 59-72.
- Krebs, H. I., Hogan, N., Hening, W., Adamovich, S. V., & Poizner, H. (2001). Procedural motor learning in Parkinson's disease. *Exp Brain Res*, 141(4), 425-437.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). *International affective picture system (IAPS): Instruction manual and affective ratings*. Florida: The Centre for Research in Psychophysiology, University of Florida.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41(12), 1583-1592.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2006). Remembering the time: a continuous clock. *Trends Cogn Sci*, 10(9), 401-406.
- Lieberman, D. A., Vogel, A. C., & Nisbet, J. (2008). Why do the effects of delaying reinforcement in animals and delaying feedback in humans differ? A working-memory analysis. *Q J Exp Psychol (Hove)*, 61(2), 194-202.
- Lindsen, J. P., Jones, R., Shimojo, S., & Bhattacharya, J. (2010). Neural components underlying subjective preferential decision making. *Neuroimage*, 50(4), 1626-1632.
- Lole, L., Gonsalvez, C. J., Blaszczynski, A., & Clarke, A. R. (2011). Electrodermal activity reliably captures physiological differences between wins and losses during gambling on electronic machines. *Psychophysiology*.

- Luck, S. J. (2005). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. Cambridge: The MIT Press.
- Luu, P., Tucker, D. M., Derryberry, D., Reed, M., & Poulsen, C. (2003). Electrophysiological responses to errors and feedback in the process of action regulation. *Psychol Sci*, *14*(1), 47-53.
- Luu, P., Tucker, D. M., & Makeig, S. (2004). Frontal midline theta and the error-related negativity: neurophysiological mechanisms of action regulation. *Clin Neurophysiol*, *115*(8), 1821-1835.
- Maddox, W. T., Ashby, F. G., & Bohil, C. J. (2003). Delayed feedback effects on rule-based and information-integration category learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, *29*(4), 650-662.
- Maddox, W. T., & Ing, A. D. (2005). Delayed feedback disrupts the procedural-learning system but not the hypothesis-testing system in perceptual category learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, *31*(1), 100-107.
- Marco-Pallares, J., Cucurell, D., Cunillera, T., Garcia, R., Andres-Pueyo, A., Munte, T. F., et al. (2008). Human oscillatory activity associated to reward processing in a gambling task. *Neuropsychologia*, *46*(1), 241-248.
- Marco-Pallares, J., Cucurell, D., Cunillera, T., Kramer, U. M., Camara, E., Nager, W., et al. (2009). Genetic variability in the dopamine system (dopamine receptor D4, catechol-O-methyltransferase) modulates neurophysiological responses to gains and losses. *Biol Psychiatry*, *66*(2), 154-161.
- Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *J Neurosci Methods*, *164*(1), 177-190.
- Masters, R. S., Maxwell, J. P., & Eves, F. F. (2009). Marginally perceptible outcome feedback, motor learning and implicit processes. *Conscious Cogn*, *18*(3), 639-645.
- Meck, W. H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Brain Res Cogn Brain Res*, *3*(3-4), 227-242.
- Mella, N., Conty, L., & Pouthas, V. (2011). The role of physiological arousal in time perception: psychophysiological evidence from an emotion regulation paradigm. *Brain Cogn*, *75*(2), 182-187.
- Miller, K. J., Schalk, G., Fetz, E. E., den Nijs, M., Ojemann, J. G., & Rao, R. P. (2010). Cortical activity during motor execution, motor imagery, and imagery-based online feedback. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *107*(9), 4430-4435.
- Miltner, W. H. R., Braun, C., & Coles, M. G. H. (1997). Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a generic neural system for error detection. *J Cognitive Neuroscience*, *9*(6), 788-798.
- Miltner, W. H. R., Lemke, U., Weiss, T., Holroyd, C., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. (2003). Implementation of error-processing in the human anterior cingulate cortex: a source analysis of the magnetic equivalent of the error-related negativity. *Biol Psychol*, *64*(1-2), 157-166.

- Muller, S. V., Moller, J., Rodriguez-Fornells, A., & Munte, T. F. (2005). Brain potentials related to self-generated and external information used for performance monitoring. *Clin Neurophysiol*, *116*(1), 63-74.
- Neuper, C., Schlogl, A., & Pfurtscheller, G. (1999). Enhancement of left-right sensorimotor EEG differences during feedback-regulated motor imagery. *J Clin Neurophysiol*, *16*(4), 373-382.
- Neuper, C., Wortz, M., & Pfurtscheller, G. (2006). ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *Prog Brain Res*, *159*, 211-222.
- Nieuwenhuis, S., Holroyd, C. B., Mol, N., & Coles, M. G. (2004). Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: origins and functional significance. *Neurosci Biobehav Rev*, *28*(4), 441-448.
- Nieuwenhuis, S., Slagter, H. A., von Geusau, N. J., Heslenfeld, D. J., & Holroyd, C. B. (2005). Knowing good from bad: differential activation of human cortical areas by positive and negative outcomes. *Eur J Neurosci*, *21*(11), 3161-3168.
- Nolte, G., Bai, O., Wheaton, L., Mari, Z., Vorbach, S., & Hallett, M. (2004). Identifying true brain interaction from EEG data using the imaginary part of coherency. *Clin Neurophysiol*, *115*(10), 2292-2307.
- Nolte, G., & Muller, K. R. (2010). Localizing and estimating causal relations of interacting brain rhythms. *Front Hum Neurosci*, *4*, 209.
- Nolte, G., Ziehe, A., Nikulin, V. V., Schlogl, A., Kramer, N., Brismar, T., et al. (2008). Robustly estimating the flow direction of information in complex physical systems. *Phys Rev Lett*, *100*(23), 234101.
- O'Connell, R. G., Bellgrove, M. A., Dockree, P. M., & Robertson, I. H. (2004). Reduced electrodermal response to errors predicts poor sustained attention performance in attention deficit hyperactivity disorder. *Neuroreport*, *15*(16), 2535-2538.
- Oliveira, F. T., McDonald, J. J., & Goodman, D. (2007). Performance monitoring in the anterior cingulate is not all error related: expectancy deviation and the representation of action-outcome associations. *J Cogn Neurosci*, *19*(12), 1994-2004.
- Olsson, C. J., Jonsson, B., Larsson, A., & Nyberg, L. (2008). Motor representations and practice affect brain systems underlying imagery: an fMRI study of internal imagery in novices and active high jumpers. *Open Neuroimag J*, *2*, 5-13.
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J. M. (2011). FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comput Intell Neurosci*, *2011*, 156869.
- Opitz, B., Ferdinand, N. K., & Mecklinger, A. (2011). Timing matters: the impact of immediate and delayed feedback on artificial language learning. *Front Hum Neurosci*, *5*, 8.

- Osipova, D., Rantanen, K., Ahveninen, J., Ylikoski, R., Happola, O., Strandberg, T., et al. (2006). Source estimation of spontaneous MEG oscillations in mild cognitive impairment. *Neurosci Lett*, *405*(1-2), 57-61.
- Papo, D., Douiri, A., Bouchet, F., Bourzeix, J. C., Caverni, J. P., & Baudonniere, P. M. (2007). Modulation of late alpha band oscillations by feedback in a hypothesis testing paradigm. *Int J Psychophysiol*, *63*(1), 110-116.
- Pereda, E., Quiroga, R. Q., & Bhattacharya, J. (2005). Nonlinear multivariate analysis of neurophysiological signals. *Prog Neurobiol*, *77*(1-2), 1-37.
- Pfabigan, D. M., Alexopoulos, J., Bauer, H., & Sailer, U. (2011). Manipulation of feedback expectancy and valence induces negative and positive reward prediction error signals manifest in event-related brain potentials. *Psychophysiology*, *48*(5), 656-664.
- Pfurtscheller, G., & Neuper, C. (1997). Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans. *Neurosci Lett*, *239*(2-3), 65-68.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., Flotzinger, D., & Pregenzer, M. (1997). EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, *103*(6), 642-651.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., Ramoser, H., & Muller-Gerking, J. (1999). Visually guided motor imagery activates sensorimotor areas in humans. *Neurosci Lett*, *269*(3), 153-156.
- Pfurtscheller, G., Pregenzer, M., & Neuper, C. (1994). Visualization of sensorimotor areas involved in preparation for hand movement based on classification of mu and central beta rhythms in single EEG trials in man. *Neurosci Lett*, *181*(1-2), 43-46.
- Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol*, *118*(10), 2128-2148.
- Potts, G. F., Martin, L. E., Kamp, S. M., & Donchin, E. (2010). Neural response to action and reward prediction errors: Comparing the error-related negativity to behavioral errors and the feedback-related negativity to reward prediction violations. *Psychophysiology*.
- Pouthas, V., & Perbal, S. (2004). Time perception depends on accurate clock mechanisms as well as unimpaired attention and memory processes. *Acta Neurobiol Exp (Wars)*, *64*(3), 367-385.
- Quilodran, R., Rothe, M., & Procyk, E. (2008). Behavioral shifts and action valuation in the anterior cingulate cortex. *Neuron*, *57*(2), 314-325.
- Rahnev, D., Lau, H., & de Lange, F. P. (2011). Prior expectation modulates the interaction between sensory and prefrontal regions in the human brain. *J Neurosci*, *31*(29), 10741-10748.
- Rammsayer, T. H. (2008). Neuropharmacological approaches to human timing. In S. Grondin (Ed.), *Psychology of Time* (pp. 295-320). Bingley: Emerald Publishing.
- Reis, J., Schambra, H. M., Cohen, L. G., Buch, E. R., Fritsch, B., Zarahn, E., et al. (2009). Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill

- acquisition over multiple days through an effect on consolidation. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 106(5), 1590-1595.
- Rusjan, P. M., Barr, M. S., Farzan, F., Arenovich, T., Maller, J. J., Fitzgerald, P. B., et al. (2010). Optimal transcranial magnetic stimulation coil placement for targeting the dorsolateral prefrontal cortex using novel magnetic resonance image-guided neuronavigation. *Hum Brain Mapp*, 31(11), 1643-1652.
- Sailer, U., Fischmeister, F. P., & Bauer, H. (2010). Effects of learning on feedback-related brain potentials in a decision-making task. *Brain Res*, 1342, 85-93.
- Santesso, D. L., Bogdan, R., Birk, J. L., Goetz, E. L., Holmes, A. J., & Pizzagalli, D. A. (2011). Neural responses to negative feedback are related to negative emotionality in healthy adults. *Soc Cogn Affect Neurosci*.
- Santesso, D. L., Dillon, D. G., Birk, J. L., Holmes, A. J., Goetz, E., Bogdan, R., et al. (2008). Individual differences in reinforcement learning: behavioral, electrophysiological, and neuroimaging correlates. *Neuroimage*, 42(2), 807-816.
- Santesso, D. L., Evins, A. E., Frank, M. J., Schetter, E. C., Bogdan, R., & Pizzagalli, D. A. (2009). Single dose of a dopamine agonist impairs reinforcement learning in humans: evidence from event-related potentials and computational modeling of striatal-cortical function. *Hum Brain Mapp*, 30(7), 1963-1976.
- Schultz, W. (1998). Predictive reward signal of dopamine neurons. *J Neurophysiol*, 80(1), 1-27.
- Schultz, W. (1999). The Reward Signal of Midbrain Dopamine Neurons. *News Physiol Sci*, 14, 249-255.
- Schultz, W. (2002). Getting formal with dopamine and reward. *Neuron*, 36(2), 241-263.
- Schultz, W., Preuschoff, K., Camerer, C., Hsu, M., Fiorillo, C. D., Tobler, P. N., et al. (2008). Explicit neural signals reflecting reward uncertainty. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 363(1511), 3801-3811.
- Sheth, B. R., Sandkuhler, S., & Bhattacharya, J. (2009). Posterior Beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *J Cogn Neurosci*, 21(7), 1269-1279.
- Simons, R. F. (2010). The way of our errors: theme and variations. *Psychophysiology*, 47(1), 1-14.
- Stam, C. J., Nolte, G., & Daffertshofer, A. (2007). Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Hum Brain Mapp*, 28(11), 1178-1193.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

- Synofzik, M., Lindner, A., & Thier, P. (2008). The cerebellum updates predictions about the visual consequences of one's behavior. *Curr Biol*, *18*(11), 814-818.
- Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Henaff, M. A., Isnard, J., & Fischer, C. (2005). Attention modulates gamma-band oscillations differently in the human lateral occipital cortex and fusiform gyrus. *Cereb Cortex*, *15*(5), 654-662.
- Tombini, M., Zappasodi, F., Zollo, L., Pellegrino, G., Cavallo, G., Tecchio, F., et al. (2009). Brain activity preceding a 2D manual catching task. *Neuroimage*, *47*(4), 1735-1746.
- Trujillo, L. T., & Allen, J. J. (2007). Theta EEG dynamics of the error-related negativity. *Clin Neurophysiol*, *118*(3), 645-668.
- Tseng, Y. W., Diedrichsen, J., Krakauer, J. W., Shadmehr, R., & Bastian, A. J. (2007). Sensory prediction errors drive cerebellum-dependent adaptation of reaching. *J Neurophysiol*, *98*(1), 54-62.
- Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2006). How does error correction differ from error signaling? An event-related potential study. *Brain Res*, *1105*(1), 102-109.
- van de Vijver, I., Ridderinkhof, K. R., & Cohen, M. X. (2011). Frontal oscillatory dynamics predict feedback learning and action adjustment. *J Cogn Neurosci*, *23*(12), 4106-4121.
- van der Helden, J., Boksem, M. A., & Blom, J. H. (2010). The importance of failure: feedback-related negativity predicts motor learning efficiency. *Cereb Cortex*, *20*(7), 1596-1603.
- van Ede, F., de Lange, F., Jensen, O., & Maris, E. (2011). Orienting attention to an upcoming tactile event involves a spatially and temporally specific modulation of sensorimotor alpha- and beta-band oscillations. *J Neurosci*, *31*(6), 2016-2024.
- van Meel, C. S., Heslenfeld, D. J., Oosterlaan, J., Luman, M., & Sergeant, J. A. (2011). ERPs associated with monitoring and evaluation of monetary reward and punishment in children with ADHD. *J Child Psychol Psychiatry*, *52*(9), 942-953.
- Velasques, B., Machado, S., Portella, C. E., Silva, J. G., Basile, L. F., Cagy, M., et al. (2007). Electrophysiological analysis of a sensorimotor integration task. *Neurosci Lett*, *426*(3), 155-159.
- Vinck, M., Oostenveld, R., van Wingerden, M., Battaglia, F., & Pennartz, C. M. (2011). An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias. *Neuroimage*, *55*(4), 1548-1565.
- Vocat, R., Pourtois, G., & Vuilleumier, P. (2011). Parametric modulation of error-related ERP components by the magnitude of visuo-motor mismatch. *Neuropsychologia*, *49*(3), 360-367.
- Waelti, P., Dickinson, A., & Schultz, W. (2001). Dopamine responses comply with basic assumptions of formal learning theory. *Nature*, *412*(6842), 43-48.

- Wheaton, L. A., Shibasaki, H., & Hallett, M. (2005). Temporal activation pattern of parietal and premotor areas related to praxis movements. *Clin Neurophysiol*, *116*(5), 1201-1212.
- Wilkes, B. L., Gonsalvez, C. J., & Blaszczynski, A. (2010). Capturing SCL and HR changes to win and loss events during gambling on electronic machines. *Int J Psychophysiol*, *78*(3), 265-272.
- Wise, R. A., & Rompre, P. P. (1989). Brain dopamine and reward. *Annu Rev Psychol*, *40*, 191-225.
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nat Rev Neurosci*, *12*(12), 739-751.
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2010). Motor learning. *Curr Biol*, *20*(11), R467-472.
- Wu, W. F., Young, D. E., Schandler, S. L., Meir, G., Judy, R. L., Perez, J., et al. (2011). Contextual interference and augmented feedback: Is there an additive effect for motor learning? *Hum Mov Sci*.
- Wu, Y., & Zhou, X. (2009). The P300 and reward valence, magnitude, and expectancy in outcome evaluation. *Brain Res*, *1286*, 114-122.
- Wulf, G., Shea, C. H., & Matschiner, S. (1998). Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *J Mot Behav*, *30*(2), 180-192.
- Yasuda, A., Sato, A., Miyawaki, K., Kumano, H., & Kuboki, T. (2004). Error-related negativity reflects detection of negative reward prediction error. *Neuroreport*, *15*(16), 2561-2565.
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *J Neurosci*, *24*(28), 6258-6264.
- Yoshida, W., & Ishii, S. (2006). Resolution of uncertainty in prefrontal cortex. *Neuron*, *50*(5), 781-789.
- Yu, R., & Zhou, X. (2006). Brain potentials associated with outcome expectation and outcome evaluation. *Neuroreport*, *17*(15), 1649-1653.
- Yuan, H., Liu, T., Szarkowski, R., Rios, C., Ashe, J., & He, B. (2010). Negative covariation between task-related responses in alpha/beta-band activity and BOLD in human sensorimotor cortex: an EEG and fMRI study of motor imagery and movements. *Neuroimage*, *49*(3), 2596-2606.
- Zirnheld, P. J., Carroll, C. A., Kieffaber, P. D., O'Donnell, B. F., Shekhar, A., & Hetrick, W. P. (2004). Haloperidol impairs learning and error-related negativity in humans. *J Cogn Neurosci*, *16*(6), 1098-1112.