

Lucas Eduardo Antunes Bicalho

**GANHO DE AUTOMATICIDADE E APRENDIZAGEM MOTORA VIA
BIOFEEDBACK DO ESFORÇO MENTAL**

Belo Horizonte

Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG

2022

Lucas Eduardo Antunes Bicalho

**GANHO DE AUTOMATICIDADE E APRENDIZAGEM MOTORA VIA
BIOFEEDBACK DO ESFORÇO MENTAL**

Tese apresentada ao programa de pós-graduação em Ciências do Esporte da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências do Esporte.

Área de concentração: Treinamento Esportivo. Linha de pesquisa: Aspectos psicobiológicos do desempenho humano.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Menezes Lage

Belo Horizonte

Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG

2022

B583g Bicalho, Lucas Eduardo Antunes
2022 Ganho de automaticidade e aprendizagem motora via biofeedback do esforço mental. [manuscrito] / Lucas Eduardo Antunes Bicalho – 2022.
67 p.: il.

Orientador: Guilherme Menezes Lage

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional.

Bibliografia: p. 57-62

1. Aprendizagem cognitiva. 2. Olhos - Movimentos. 3. Aprendizagem motora. 4. Capacidade motora. I. Lage, Guilherme Menezes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional. III. Título.

CDU: 159.943:796

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Carla Cristina da Silva, CRB 6: n° 1753, da Biblioteca da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA, FISIOTERAPIA E TERAPIA OCUPACIONAL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO ESPORTE

ATA DE DEFESA DA TESE

Às 13:30 horas do dia 28 de setembro 2022, através da plataforma ZOOM, realizou-se a sessão pública para a defesa da Tese de LUCAS EDUARDO ANTUNES BICALHO. A presidência da sessão coube ao Guilherme Menezes Lage. Inicialmente, o presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora assim constituída: Herbert Ugrinowitsch (UFMG), Umberto Cesar Corrêa (USP), André Gustavo Pereira de Andrade (UFMG), Tercio Apolinário de Souza (UFRGS), e Guilherme Menezes Lage, UFMG, orientador. Em seguida, o candidato fez a apresentação do trabalho que constitui sua Tese de Doutorado, intitulada: "Ganho de automaticidade e aprendizagem motora via biofeedback do esforço mental". Seguiu-se a arguição pelos examinadores e logo após, a Comissão reuniu-se, sem a presença do candidato e do público e decidiu considerar **aprovado a Tese de Doutorado**. O resultado final foi comunicado publicamente o candidato pelo presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 28 de setembro de 2022.

Assinatura dos membros da banca examinadora:

- Guilherme Menezes Lage - **ORIENTADOR** (UFMG)
- Herbert Ugrinowitsch (UFMG)
- Umberto Cesar Corrêa (USP)
- André Gustavo Pereira de Andrade (UFMG)
- Tercio Apolinário de Souza (UFRGS)



Documento assinado eletronicamente por Tércio Apolinário de Souza, Usuário Externo, em 09/02/2023, às 13:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Umberto Cesar Corrêa, Usuário Externo, em 13/04/2023, às 13:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Herbert Ugrinowitsch, Professor do Magistério Superior, em 17/04/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Andre Gustavo Pereira de Andrade, Coordenador(a) de curso de pós-graduação, em 19/04/2023, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

20/04/2023 11:22

SEIUFMG - 2067671 - Ata de defesa de Dissertação/Tese



Documento assinado eletronicamente por Guilherme Menezes Lage, Professor do Magistério Superior, em 20/04/2023, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_organ_acesso_externo=0, informando o código verificador 2067671 e o código CRC F32FB125.

Referência: Processo nº 23072.206573/2023-00

SEI nº 2067671

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, amigo e conselheiro **Guilherme!** Serei eternamente grato pela confiança, pelas oportunidades, pela parceria e sobretudo pelos ensinamentos! Tenho a certeza de que saio um profissional muito melhor e que fui muito agraciado por ter sido seu aluno!

Aos meus pais, **Angélica** e **Dimas** os quais sou infinitamente grato! Vocês sempre foram a melhor base e inspiração que algum filho poderia ter! Obrigado pelo amor, carinho, conselhos e por toda a ajuda de sempre. Vocês são os principais presentes da minha vida!

Ao meu irmão, **Felipe**, que sempre me deu muito apoio, sempre muito companheiro e amigo! E, junto com minha cunhada **Maria**, deram um dos maiores presentes que eu podia ter: **Helena**. A você, minha sobrinha querida, agradeço pelas brincadeiras, luz e alegria que surgem só de pensar em você!

À **Beatriz** que esteve muito próximo de mim na etapa final do meu doutorado. Partilhou comigo um dos momentos mais difíceis e também mais alegres. Sua companhia, apoio e ajuda foi fundamental para mim! Obrigado xuxuzinha!

Aos professores da UFMG, prof. **André**, prof. **Herbert**, prof. **Maicon** e prof. **Rodolfo**: muito obrigado pela amizade e por todos ensinamentos e contribuições com minha formação! Também não posso deixar de agradecer àqueles que foram meus professores em outras instituições e também exerceram uma parcela na minha formação!

Agradeço aos grupos de pesquisa aos quais faço parte, **GEDAM**, **NNeuroM** e **Lanec**. Neles construí amizades e parcerias que foram muito importantes na construção deste projeto! Cresci e aprendi muito com todos vocês, muito obrigado!

E por fim, as demais pessoas que são difíceis de elencar, mas que fizeram parte deste processo e contribuíram com a minha formação ...

RESUMO

O ganho da automaticidade ocorre naturalmente à medida que um aprendiz avança na aquisição de habilidades motoras, tendo como principal característica a redução do esforço cognitivo. Entretanto, estudos têm demonstrado que é possível otimizar essa automaticidade manipulando recursos na tarefa como, por exemplo, ao direcionar o foco de atenção do aprendiz a um foco externo. No presente estudo, verificamos a possibilidade de um sistema de *biofeedback*, no qual os indivíduos aprendem a gerar estados mentais mais automáticos e com menor esforço cognitivo. A dinâmica pupilar surge como potencial candidato de medida de *biofeedback*, uma vez que a mesma compreende uma medida de esforço cognitivo e apresenta alta capacidade discriminativa entre tarefas com diferentes exigências e níveis de dificuldade. Para testar essa hipótese, um sistema integrado de quatro câmeras foi utilizado para fazer a leitura da dinâmica pupilar e desempenho na tacada curta do golfe. O *biofeedback* foi estimado a partir da prática de um grupo controle, que alimentou um algoritmo de *machine learning*, que conduz uma série de decisões para maximizar a interpretação dos dados sem a intervenção humana. O algoritmo foi selecionado devido às dificuldades inerentes em estimar a redução no diâmetro pupilar ideal em suas complexidades contextuais. Como forma de garantir a manutenção do estado ótimo, o grupo experimental foi condicionado a alcançar o estado mental calculado, a partir de um estímulo auditivo, para que pudessem dar início a cada tentativa. Os resultados demonstram que a redução ativa do esforço cognitivo favorece não somente a prática, mas também a aprendizagem motora. A redução do esforço cognitivo leva à automaticidade, favorecendo a redução de fatores que constroem a ação motora. O sistema de *biofeedback* via comportamento oculomotor, desenvolvido neste estudo, se mostrou sensível o bastante para promover mudanças no esforço cognitivo, abrindo um campo inédito de possibilidades e aplicação dessa tecnologia.

Palavras-chave: Esforço cognitivo. Eye-tracker. Comportamento motor. Comportamento oculomotor. Controle motor.

ABSTRACT

The gain in automaticity occurs naturally as the learner advances through the acquisition of motor skills, and its main characteristic comprises the reduction of cognitive effort. However, studies have shown that it is possible to optimize this automaticity by manipulating resources in the task, for example, directing the learner's attention to an external focus. In the present study, we verified the possibility of a biofeedback system, in which individuals learn to generate more automatic mental states with less cognitive effort. Pupillary dynamics appears as a potential candidate for biofeedback measurement since it comprises a measure of cognitive effort and has a high discriminative capacity in tasks with different requirements and levels of difficulty. To test this hypothesis, an integrated system of four cameras was used to read the pupil dynamics and golf putting performance. The threshold of cognitive effort was estimated from the practice of a control group, which fed a machine learning algorithm that drives a series of decisions to maximize the interpretation of data without human intervention. The algorithm was selected due to the inherent difficulties in estimating the ideal pupil diameter in its contextual complexities. As a way of guaranteeing the maintenance of the optimal state, the experimental group was conditioned to reach the calculated mental state, based on an auditory stimulus, so that they could start each trial. The results demonstrate that the active reduction of the cognitive effort favors not only the practice but also motor learning. The reduction of cognitive effort leads to automaticity, favoring the reduction of factors that constrain motor action. The biofeedback system via oculomotor behavior developed in this study, proved to be sensitive enough to promote changes in the cognitive effort, opening an unprecedented field of possibilities and applications of this technology.

Keywords: Cognitive effort. Eye-tracker. Motor behavior. Oculomotor behavior. Motor control.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Média +DP da dilatação pupilar média (A) e pico (B) (I) e do Total Dwell Time (II) sobre Conhecimento de Resultados (A) e Metas (B) na fase de aquisição e nos testes de aprendizagem de indivíduos sujeitos a diferentes estruturas de prática (bl1 = Bloco 1; bl10 = Bloco 10; CP = Prática Constante; CR = Prática Constante e Dimensão Relativa; CA = Prática Constante e Dimensão Absoluta; RA = Prática Aleatória e Dimensão Absoluta; RP = Prática Aleatória; RR = Prática Aleatória e Dimensão Relativa; Rt = Teste de Retenção; Tt = Teste de Transferência). Adaptado de BICALHO et al. (2019).23
- Figura 2 - Framework do biofeedback. A figura traz uma representação esquemática do treinamento da manutenção de estados via biofeedback. Os métodos utilizados para o estabelecimento da interface e leitura contínua de sinais são variados e podem incluir diferentes métodos como por exemplo a eletroencefalografia (EEG), eletromiografia (EMG) e a eletrocardiografia (ECG). A transdução de sinais ocorre via unidade computacional que direciona os dados a serem retornados ao sujeito para o sistema de monitoramento.24
- Figura 3 - Representação esquemática da montagem das câmeras no HMD.28
- Figura 4 - Representação esquemática da segmentação pupilar. (A) Fotografia do olho e filtragem de bandas de imagem. A ilustração anatômica foi adaptada de SNELL e LEMP (2013). (B) Ilustra a segmentação com canais de cores “verde-magenta”, a qual representa uma opção de alto contraste que auxilia pessoas com vários tipos de problemas que afetam a visão de cores (R2012a, The Mathworks Inc). (C) Ilustra um cenário de acerto e erro do algoritmo de identificação automática que pode ser corrigido pelo usuário (se necessário) a partir do dropdown box-menu destacado. (D) Indica um segundo ajuste que pode ser utilizado pelo usuário para corrigir o algoritmo caso esteja ultrapassando o limiar pupilar (quando necessário). (E) Indica um terceiro ajuste que pode ser utilizado pelo usuário para corrigir a magnitude de transformação de pixels na imagem.....30
- Figura 5 - Exibição da aparência do software construído para estabelecer o biofeedback pupilar.33

Figura 6 - Representação esquemática do algoritmo de machine learning utilizado para a estimativa do ponto de controle pupilar.....	34
Figura 7 - Representação esquemática da tarefa experimental. Disposição e dimensões (cm) da pista, delimitação da posição da bola (0), taco (x), alvo (1), e instrumentação utilizada.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disposição do tamanho amostral e técnicas de machine learning utilizada para o fornecimento de biofeedback na área do comportamento motor.	27
Tabela 2 - Características demográficas do Grupo controle e Grupo <i>biofeedback</i>	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média e \pm DP do Erro Global sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 ao bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.....	43
Gráfico 2 - Média e \pm DP da Exposição sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 e bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.....	44
Gráfico 3 - Média e \pm DP da dilatação pupilar sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 e bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.....	45
Gráfico 4 - Associação entre Erro Global e Exposição dos grupos controle e biofeedback no primeiro (A) e último bloco de tentativas (B) da fase de aquisição.	47
Gráfico 5 - Associação entre Erro Global e Alcance de biofeedback (A), Erro Global e Alcance de treinamento bem-sucedido (B) e Erro Global e Intervalo de inicialização (C) no primeiro e último bloco de tentativas da fase de aquisição do grupo biofeedback.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Aprendizagem motora	17
2.2. Aprendizagem motora e automaticidade	18
2.3. Aprendizagem motora e análise do esforço cognitivo	21
2.4. Esforço cognitivo e <i>biofeedback</i>	23
3. OBJETIVOS	26
3.1. Objetivos específicos	26
4. HIPÓTESES DE ESTUDO	26
5. MÉTODO	27
5.1. Participantes	27
5.2. Instrumentação	28
5.2.1. Eye-tracker de baixo custo	28
5.2.2. Software para interface pupila- <i>biofeedback</i>	31
5.2.3. Tarefa motora	35
5.3. Delineamento experimental	36
5.4. Variáveis dependentes	38
5.4.1. Erro Global	38
5.4.2. Baseline pupilar	39
5.4.3. Dilatação pupilar	39
5.4.4. Exposição	39
5.4.5. Adesão ao <i>biofeedback</i>	40
5.5. Análise estatística	41
6. RESULTADOS	42
6.1. Análise da seleção amostral	42

6.2. Pré-teste.....	43
6.2.1. Análise do Erro Global.....	43
6.2.2. Análise da Exposição	43
6.2.3. Análise da dilatação pupilar	44
6.3. Fase de aquisição	45
6.3.1. Análise do Erro Global.....	45
6.3.2. Análise da dilatação pupilar.....	46
6.3.3. Análise da Exposição	46
6.3.4. Análise da associação entre Erro Global e adesão ao <i>Biofeedback</i> 47	
6.4. Testes de aprendizagem.....	48
6.4.1. Análise do Erro Global.....	48
6.4.2. Análise da Exposição	49
6.4.3. Análise da dilatação pupilar.....	49
7. DISCUSSÃO.....	50
8. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A	64
APÊNDICE B	67

1 INTRODUÇÃO

A aprendizagem motora vem sendo estudada e definida por meio de diferentes mecanismos, seja a partir de mudanças no comportamento (ex: mudanças a nível da estrutura ou parametrização de uma habilidade) (LAGE, 2007) ou atividade neurobiológica (ex: mudanças na comunicação cortical) (NOGUEIRA *et al.*, 2020) que são avaliadas em uma condição pós-prática. Ao praticar uma habilidade motora o aprendiz passa por diferentes estágios e transita de um estágio cognitivo a um estágio autônomo (ADAMS, 1971; FITTS; POSNER, 1967). O estágio autônomo, particularmente, é caracterizado pela automaticidade e por um menor esforço mental (WULF *et al.*, 2001).

Atualmente, estudos têm demonstrado que essa automaticidade alcançada em uma tarefa pode ser influenciada por parâmetros controlados pelo professor/experimentador ao direcionar o foco de atenção do aprendiz a um foco externo, por exemplo (WULF *et al.*, 1998). Estudos de foco de atenção tem indicado que o foco externo é mais efetivo que o foco interno por induzir estratégias comportamentais que reduzem o uso de recursos explícitos e esforço mental (LOHSE *et al.*, 2014), e conseqüentemente, levam a um processamento menos deliberado, menos consciente e mais automático. Dessa forma, o foco externo pode favorecer a redução do esforço cognitivo e, como consequência, a uma maior automaticidade.

O esforço cognitivo gerado em uma tarefa, por sua vez, pode ser inferido a partir de diferentes medidas biológicas e estas, apresentam o potencial de fazerem parte de um treinamento de autorregulação. A autorregulação durante a prática de uma habilidade motora vem sendo estabelecida a partir de um procedimento chamado de *biofeedback* no qual um sinal biológico é repassado a um aprendiz (MAGILL, 2000). Dentre os diferentes sinais biológicos representativos do esforço cognitivo (exemplos: medidas eletroencefalográficas, eletrocardiográficas, etc.) a dinâmica pupilar foi apontada uma revisão de literatura recente como a medida mais representativa dentre mais de 70 medidas inferidas (TAO *et al.*, 2019). De forma geral, os estudos têm demonstrado que conforme o aumento do nível de dificuldade

imposta por uma tarefa cognitiva, maior o diâmetro pupilar (KLINGNER *et al.*, 2011).

A partir do exposto acima, uma possível forma de alcançar a redução do esforço cognitivo durante a execução de uma habilidade motora pode ser a partir de um treinamento via *biofeedback* da dinâmica pupilar. Neste treinamento, os indivíduos podem engajar-se em uma regulação ativa do próprio esforço mental gerando maior automaticidade na prática. Para confirmar esta hipótese, a presente tese objetivou investigar o ganho de automaticidade na aprendizagem motora via *biofeedback* pupilar. É esperado que o *biofeedback* da dinâmica pupilar favoreça uma maior automaticidade e, conseqüentemente, um melhor desempenho e aprendizagem motora.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aprendizagem motora

Afim de investigar questões relacionadas à mudanças alcançadas com a prática de uma habilidade motora, estudos vêm destacando a importância em distinguir as diferenças existentes entre aprendizagem e desempenho (KANTAK; WINSTEIN, 2012). O conceito de desempenho motor está atrelado à análise da execução de uma habilidade em um momento específico e em uma situação específica, a qual pode ser mensurada e especificada quantitativamente ou de forma qualitativa (EDWARDS, 2010). Em cada caso, a análise do desempenho é baseada na observação do nível de execução da habilidade. Por outro lado, a alteração na habilidade em realizar uma ação motora, sendo essa associada a uma melhoria no desempenho o qual é verificada em uma condição pós-prática ou experiência, é reconhecida como aprendizagem motora (LOHSE *et al.*, 2014).

A distinção sobre o desempenho e aprendizagem, particularmente, tem sido considerado um marco teórico em diferentes áreas de estudo da aprendizagem como por exemplo, no estudo do fornecimento de *feedback* e da estruturação da prática (SALMONI *et al.*, 1984; WINSTEIN; SCHMIDT, 1990). Portanto, uma questão importante e por vezes negligenciada é que em alguns casos, os efeitos diferenciais promovidos em uma condição de prática podem não ser visíveis durante a prática. Para explicar essas questões, diferentes hipóteses têm sido propostas na literatura (LAGE *et al.*, 2011; SCHMIDT, 1991), e, como ilustrado acima, estudos vêm adotando o emprego de diferentes testes para fazer as devidas inferências. O teste de retenção e o teste de transferência compreendem os principais testes utilizados e ambos se baseiam na avaliação do desempenho da habilidade em um nível comum de variável dependente que é inferido após a prática (KANTAK; WINSTEIN, 2012). Por outro lado, os testes diferem entre si quanto ao tipo de avaliação conduzida, bem como quanto às informações relacionadas às mudanças que podem ser inferidas pelo pesquisador. Enquanto o teste de transferência

fornece informações sobre a preparação do aprendiz para realizar uma tarefa em uma condição pós-prática que difere daquela a qual foi adquirida (KANTAK; WINSTEIN, 2012), o teste de retenção busca reproduzir o que foi praticado e avaliar o que foi aprendido.

À medida que o processo de aprendizagem de uma habilidade motora avança, diferentes características são passíveis de serem observadas, por exemplo (i) a consistência, (ii) a adaptabilidade e (iii) a automaticidade (MAGILL, 2000). A consistência, está relacionada à capacidade do aprendiz em reproduzir um padrão ao longo do tempo ou de tentativas (LAI; SHEA, 1998). Por exemplo, a manutenção de uma estrutura temporal (padrão) constante durante a execução de uma tarefa de sequenciamento. A adaptabilidade, está relacionada à capacidade do aprendiz em realizar mudanças paramétricas na estrutura da habilidade sem que ocorra a descaracterização da mesma (LAI; SHEA, 1998). E por fim, a automaticidade que vem sendo associada a mudanças que ocorrem a nível cognitivo, ou mais especificamente à redução do esforço cognitivo (WULF, 2013) e à manutenção de processos menos conscientes durante a prática de uma habilidade motora (WULF *et al.*, 2015).

2.2. Aprendizagem motora e automaticidade

A promoção de automaticidade, particularmente, tem sido alvo de diferentes modelos teóricos (ADAMS, 1971; FITTS; POSNER, 1967) que sugerem que os aprendizes passem por diferentes estágios durante a aquisição de uma habilidade. Um dos modelos mais utilizados pela literatura de aprendizagem motora foi proposto por Fitts e Posner (1967) e sugere a existência de três estágios na aquisição de habilidades motoras: (i) um estágio cognitivo, (ii) um associativo e (iii) um autônomo. De forma sucinta, esse modelo de estágios preconiza que a aprendizagem motora progrida de uma fase inicial cognitiva a uma fase autônoma a qual a habilidade vai se tornando automatizada e o aprendiz apresenta um controle menos consciente da execução de seus próprios movimentos (ANDERSON, 1982). Embora o ganho da automaticidade compreenda um processo que ocorre naturalmente à

medida que o aprendiz avança nos estágios da aprendizagem, evidências têm indicado que a automaticidade alcançada em uma tarefa possa ser influenciada por fatores manipulados pelo professor/experimentador (WULF, 2013). E um exemplo no qual a automaticidade pode ser trabalhada é a partir do direcionamento do foco de atenção do aprendiz para um foco externo (ex: focar na ação de um implemento ao invés de focar na ação muscular do membro) na aquisição de uma habilidade motora (WULF *et al.*, 1998).

Para auxiliar aprendizes no processo de aprendizagem motora, é usual o fornecimento de informações direcionadas ao posicionamento correto de um membro ou da dinâmica corporal (WULF *et al.*, 1998). Normalmente, as instruções e o *feedback* fornecido na prática têm o objetivo de tornar o aluno ciente de sua coordenação motora, presumindo que o mesmo seja necessário para o desenvolvimento da habilidade (WULF *et al.*, 1998). Entretanto, a eficácia dessa prática tem sido alvo de muito questionamento (WULF, 2013) e as evidências têm indicado que direcionar o foco de atenção aos movimentos corporais, por exemplo, induzir um foco interno (FI) de atenção, possa não promover benefício ou mesmo a piora na aprendizagem em comparação ao não fornecimento de instruções (MCNEVIN *et al.*, 2003).

O primeiro estudo que propôs distinguir os efeitos promovidos por direcionar o foco de atenção de um aprendiz para um FI em comparação a um foco externo (FE) foi conduzido por Wulf *et al.*, (1998) em uma tarefa de simulador de ski. Neste estudo, foi observado que direcionar o foco de atenção do executor externamente para o efeito que seu movimento teve no implemento promoveu um desempenho superior ao longo da aprendizagem e no teste de retenção em relação à instrução de focar na parte externa do pé (foco interno) e condição controle (nenhuma instrução de atenção). Em um segundo experimento, a superioridade em direcionar o foco de atenção externamente foi confirmada em uma tarefa de controle postural.

Diversos estudos realizados nos últimos anos indicaram de forma consistente que os benefícios do FE podem ser observados em uma variedade de habilidades, em diferentes faixas etárias e níveis de expertise (WULF, 2013). Embora seja intuitivo de que várias horas de prática possam ser

necessárias para que um FE possa exercer algum efeito, estudos têm demonstrado que aprendizes no estágio inicial da aprendizagem se beneficiam mais de um FE do que um FI (HODGES; FRANKS, 2000; LOHSE *et al.*, 2010; LOHSE *et al.*, 2014; WULF *et al.*, 1998). Portanto, os estudos indicam que uma prática extensa não é necessária para que o FE seja efetivo. Tem sido hipotetizado que o FE induza um comportamento ótimo ao tirar o máximo de vantagem por utilizar menos recursos explícitos e esforço mental (WULF *et al.*, 2001).

Para justificar os efeitos do direcionamento do foco de atenção, McNevi *et al.*, (2003) propuseram a hipótese da ação restrita (*Constrained action hypothesis*). A hipótese sugere que adotar um FI induz um controle mais deliberado e consciente do movimento, restringindo ou interrompendo processos de controle automático. Em outras palavras, quando os aprendizes são direcionados a adotar um FE, processos automáticos são mais beneficiados em comparação quando aprendizes focam a atenção ao corpo ou na biomecânica do próprio movimento (KAL *et al.*, 2018).

Para testar a hipótese da automaticidade, Wulf *et al.*, (2001) investigaram uma dupla-tarefa entre controle postural e tempo de reação de escolha para inferir as demandas de atenção em aprendizes com foco externo e interno. Foi hipotetizado que o tempo de reação de escolha sob FI fosse maior pela necessidade de processar as informações conscientemente. O desempenho superior observado por um menor tempo de reação foi confirmado nos aprendizes que receberam FE, sugerindo que o grupo de foco interno dependeu da disponibilidade de recursos mentais o que corroborou com a hipótese da ação restrita. Dessa forma, os achados, de uma forma geral, indicam que manipular o direcionamento do foco de atenção pode acelerar a aprendizagem, promovendo um controle menos consciente e mais automático com um menor envolvimento de esforço cognitivo.

2.3. Aprendizagem motora e análise do esforço cognitivo

Embora parâmetros eletroencefalográficos sejam pensados comumente como a principal forma de analisar o esforço cognitivo, uma recente revisão sistemática apontou que as variações presentes no diâmetro pupilar representam a medida de maior capacidade discriminativa do esforço exercido em diferentes tarefas, dentre mais de 70 parâmetros investigados (TAO *et al.*, 2019). Isso significa que uma condição de maior exigência mental pode ser mais facilmente discriminada com medidas pupilares. De forma geral, tem sido observado que uma condição de maior exigência induz uma maior dilatação pupilar do que uma condição de menor exigência (SIMPSON; PAIVIO, 1968). À nível pupilar, o esforço cognitivo atua (i) excitando a via simpática do dilatador da pupila, (ii) inibindo o complexo Edinger-Westphal do núcleo oculomotor, (iii) provocando o relaxamento do esfíncter e, conseqüentemente, contribuindo com a dilatação pupilar (GRANHOLM; STEINHAEUER, 2004; SAMUELS; SZABADI, 2008). A inferência do esforço cognitivo a partir de respostas pupilares é reconhecida como “pupilometria” e vem sendo estudada desde o início dos anos 60 (HESS; POLT, 1964; KAHNEMAN; BEATTY, 1966).

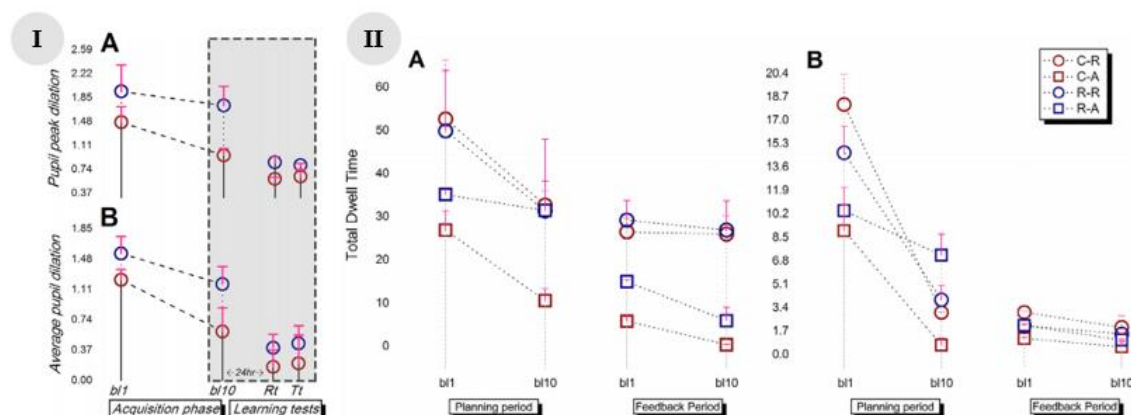
A primeira evidência pupilométrica em tarefas motoras surgiu a partir do estudo de Simpson e Paivio (1968) no qual foi observado uma maior dilatação pupilar em indivíduos que deveriam reagir a um estímulo auditivo iniciando uma tarefa motora (pressionamento de tecla). Uma segunda evidência da discriminação do esforço cognitivo em tarefas motoras a partir da pupilometria foi concedido por Kahya *et al.* (2018) que demonstraram que a dinâmica pupilar não somente discriminou as exigências impostas por diferentes tarefas de controle postural, mas também demonstrou estar significativamente associada às medidas de oscilação corporal nas tarefas.

Recentemente, Saeedpour-Parizi *et al.* (2020) confirmaram os resultados de Tao *et al.* (2019) indicando que a pupilometria compreende a medida mais discriminativa da carga cognitiva imposta na marcha dentre diferentes medidas oculomotoras (duração de fixação, proporção da duração da piscada, número de fixações e durações de movimentos sacádicos). Já White e French (2017)

foram os primeiros a demonstrar que o diâmetro pupilar reduz ao longo da prática de uma habilidade motora, sendo esta prática real ou imaginária e ainda, que a redução e a dilatação pupilar são acentuadas nas condições de maior exigência em ambos os tipos de prática. Neste estudo, a dinâmica pupilar foi investigada durante a prática real e mental de uma tarefa de adaptação visuomotora sob diferentes níveis de exigência.

Bicalho *et al.* (2019) foram os primeiros a trazerem evidências da pupilometria em testes de aprendizagem. Neste estudo, os autores propuseram investigar a dinâmica pupilar e os padrões de busca visual frente a diferentes estruturas de prática. Os resultados deste estudo indicaram um maior esforço mental para a prática menos repetitiva, mesmo durante os testes de aprendizagem. Enquanto a estrutura de prática menos repetitiva exigiu um maior processamento da informação e *feedback* visual, a prática mais repetitiva se tornou mais habitual e com menos mudanças tentativa a tentativa, uma vez que uma menor atenção visual precisou ser direcionada aos recursos da tarefa (Figura 1I). A estabilidade tentativa a tentativa promovida pela repetição consecutiva de uma tarefa não exigiu que o aprendiz buscasse continuamente informações sobre a meta do movimento para fornecer a próxima etapa de planejamento. Já a prática menos repetitiva exigiu um maior esforço cognitivo, embora o mesmo também tenha sido atenuado ao longo da tarefa (Figura 1II). Em contraste com os resultados observados por White e French (2017), a tarefa/condições de prática propostas por Bicalho *et al.* (2019), proporcionaram uma redução do erro ao longo da prática.

Figura 1 - Média +DP da dilatação pupilar média (A) e pico (B) (I) e do Total Dwell Time (II) sobre Conhecimento de Resultados (A) e Metas (B) na fase de aquisição e nos testes de aprendizagem de indivíduos sujeitos a diferentes estruturas de prática (bl1 = Bloco 1; bl10 = Bloco 10; CP = Prática Constante; CR = Prática Constante e Dimensão Relativa; CA = Prática Constante e Dimensão Absoluta; RA = Prática Aleatória e Dimensão Absoluta; RP = Prática Aleatória; RR = Prática Aleatória e Dimensão Relativa; Rt = Teste de Retenção; Tt = Teste de Transferência).



Adaptado de Bicalho *et al.* (2019).

Os resultados deste estudo sugerem que a relação entre o esforço e o desempenho em uma tarefa seriada seja linear, independentemente da estrutura de prática, uma vez que a dilatação pupilar média diminuiu ao longo da prática assim como o desempenho. Por outro lado, os resultados também indicam que a estrutura de prática menos repetitiva induziu uma maior eficiência neural uma vez que, concomitantemente a um melhor desempenho observado no teste de retenção, as diferenças no diâmetro pupilar entre o último bloco de aquisição ao teste de retenção ($\Delta_{offline}$) foram maiores para a prática menos repetitiva (Figura 1I). Deste modo, foi possível observar que a estruturação da prática atua diretamente no esforço cognitivo e que este varia conforme o nível imposto pela variação.

2.4. Esforço cognitivo e *biofeedback*

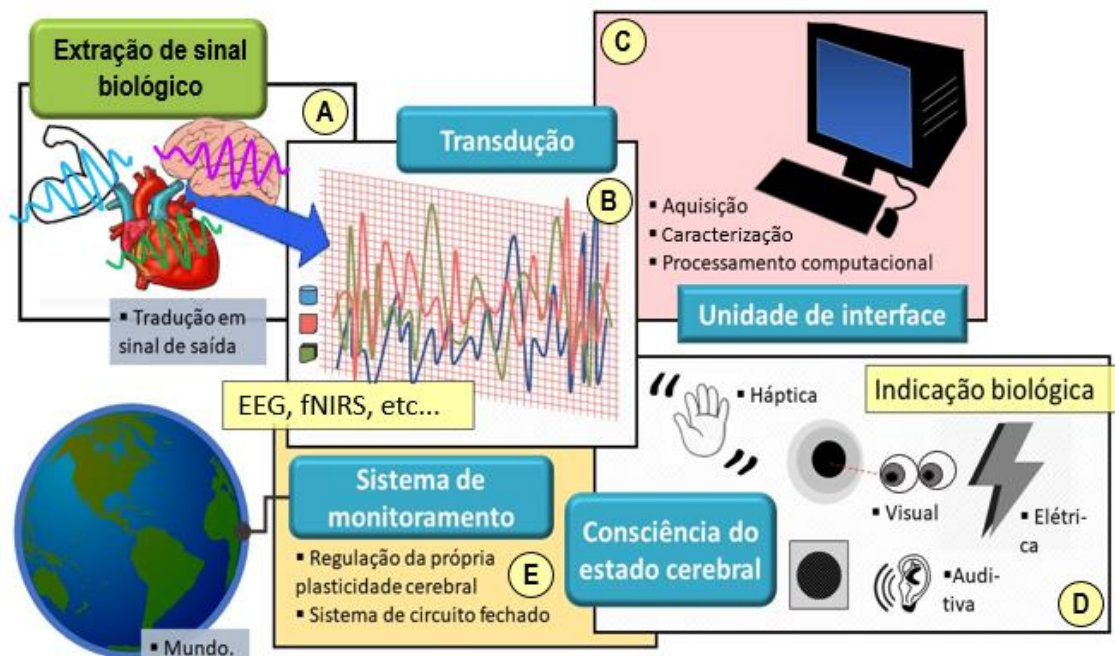
Uma alternativa para manipular o esforço cognitivo na aquisição de uma habilidade motora pode ser a partir de um treinamento via *biofeedback*. O *biofeedback* é um termo utilizado para representar as informações fornecidas

sobre processos biológicos (MAGILL, 2000), os quais podem ser repassados a um aprendiz em um formato de condicionamento.

Para estabelecer um condicionamento (ou treinamento) via *biofeedback*, um conjunto de passos devem ser cumpridos: primeiramente, é necessário realizar a identificação de um ponto de controle para um determinado tipo de influência (Figura 2A), no qual um sinal biológico específico é selecionado e extraído de um indivíduo, para que ocorra a transdução deste sinal em uma janela temporal específica ou ao longo do experimento (Figura 2B). A atividade biológica que foi evocada pela apresentação de um estímulo ou tarefa deve ser registrada por um sistema (Figura 2C) e este registro pode ser ainda conduzido em uma sessão preliminar para a construção de um treinamento personalizado. Após o registro, algumas características específicas do sinal são extraídas. Essas características serão utilizadas para quantificar a força da atividade selecionada, como por exemplo a atividade de uma região cortical específica, e a partir disso, o sinal é convertido em *feedback* trazendo informações sobre mudanças relevantes nos estados biológicos (Figura 2C). As informações são então utilizadas para direcionar um estado arbitrário inicial para um estado-alvo o que ocorre a partir da apresentação do sinal calculado de volta ao indivíduo o qual se baseia no estabelecimento de um ponto de controle ideal e ocorre a partir de diferentes formas de *feedback* que serão definidos pelo experimentador. O *feedback* pode ser então fornecido via estímulo auditivo, visual ou uma combinação de ambos, mas também há outras formas de fornecer esse *feedback* (Figura 2D). O monitoramento de um indicador biológico próprio cria um sistema de circuito fechado que permite o envolvimento dos indivíduos em seus próprios processos biológicos de modo que estes consigam sua regulação de forma ativa (Figura 2E).

Figura 2 - Framework do *biofeedback*. A figura traz uma representação esquemática do treinamento da manutenção de estados via *biofeedback*. Os métodos utilizados para o estabelecimento da interface e leitura contínua de sinais são variados e podem incluir diferentes métodos como por exemplo a eletroencefalografia (EEG), eletromiografia (EMG) e a eletrocardiografia (ECG). A transdução de sinais ocorre via unidade computacional que direciona os dados a serem retornados ao sujeito para o sistema de monitoramento.

Figura 3 - Framework do *biofeedback*. A figura traz uma representação esquemática do treinamento da manutenção de estados via *biofeedback*. Os métodos utilizados para o estabelecimento da interface e leitura contínua de sinais são variados e podem incluir diferentes métodos como por exemplo a eletroencefalografia (EEG), eletromiografia (EMG) e a eletrocardiografia (ECG). A transdução de sinais ocorre via unidade computacional que direciona os dados a serem retornados ao sujeito para o sistema de monitoramento.



Embora o nível de esforço cognitivo tenha demonstrado exercer um papel importante na aprendizagem motora, não há evidências dos efeitos proporcionados pela sua autorregulação quando analisado o comportamento oculomotor. De acordo com os estudos abordados anteriormente, é possível esperar que a autorregulação do esforço cognitivo possa favorecer a prática com um controle mais eficiente e mais automático. Dada a associação entre esforço cognitivo e dinâmica pupilar, o presente estudo propõe verificar se o *biofeedback* da dinâmica pupilar pode possibilitar a sustentação de um menor esforço cognitivo durante a prática de uma habilidade motora. Tal investigação possibilitaria responder se a redução da dilatação pupilar e a consequente promoção de automaticidade favorece a prática e a aprendizagem motora.

3 OBJETIVOS

A presente tese tem como objetivo investigar o ganho de automaticidade na aprendizagem motora via *biofeedback* pupilar.

3.1. Objetivos específicos

- A. Investigar se o protocolo de *biofeedback* proposto foi capaz de promover um menor diâmetro pupilar ao longo da prática
- B. Investigar a eficácia do respectivo protocolo sobre o desempenho motor
- C. Investigar a eficácia do respectivo protocolo sobre a aprendizagem motora.

4 HIPÓTESES DE ESTUDO

Para o primeiro objetivo específico, foi hipotetizado que o *biofeedback* irá promover uma menor dilatação pupilar média no grupo *biofeedback* ao longo da prática. Para os demais objetivos específicos, foi hipotetizado que o *biofeedback* pupilar irá promover um melhor desempenho na fase de aquisição e uma superioridade em ambos os testes de aprendizagem, em relação ao grupo controle.

5 MÉTODO

5.1. Participantes

Jovens adultos graduandos com idade entre 18 e 35 anos do sexo masculino e feminino foram recrutados por meio de convite pessoal e anúncio na Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional (EEFFTO) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Para participar do estudo, os voluntários deveriam ser destros e não apresentar experiência prévia com a tarefa motora que foi utilizada no estudo. Somente voluntários que apresentarem índice de preferência manual acima de 80 pontos no Inventário de Dominância Lateral de Edimburgo (IDLE; OLDFIELD, 1971) foram inclusos no estudo. Indivíduos com distúrbios neurais/musculoesqueléticas que pudessem comprometer o desempenho motor durante o experimento não foram inclusos. Após a seleção amostral, indivíduos foram contrabalanceados em grupo controle e *biofeedback* conforme a idade e o sexo (Tabela 1). Contudo, devido às dificuldades impostas pela pandemia, não conseguimos coletar o mesmo número de indivíduos do grupo controle para o grupo *biofeedback*. No presente estudo, foram coletados 24 indivíduos para o grupo controle e 18 para o grupo *biofeedback*. Os dados dos 24 indivíduos foram utilizados para a construção do algoritmo de *machine learning* descrito no tópico 5.2.2 e para as análises inferenciais, pareamos o grupo controle com o grupo *biofeedback* em termos de idade e sexo. É importante destacar que o número amostral selecionado para o estudo está congruente com o utilizado pelos estudos de comportamento motor que utilizaram algoritmos de *machine learning* para definição do *biofeedback* (Tabela 1).

Tabela 1 – Disposição do tamanho amostral e técnicas de *machine learning* utilizada para o fornecimento de *biofeedback* na área do comportamento motor.

Autor	Tamanho amostral	Algoritmo
VIDAURRE <i>et al.</i> (2019)	10	Linear Discriminant Analysis
BAGARINAO <i>et al.</i> (2018)	22	Support Vector Machine
HALME e PARKKONEN (2018)	14	Linear Discriminant Analysis
LEAMY <i>et al.</i> (2014)	10	Common Spatial patterns
MOHANTY <i>et al.</i> (2018)	10	Support Vector Machine
PAPAGEORGIU <i>et al.</i> (2009)	13	Support Vector Machine

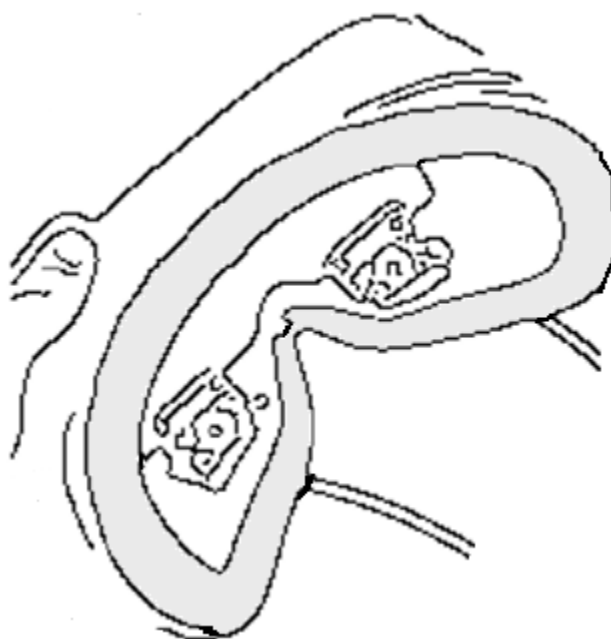
O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa, CAAE: 55109322.0.0000.5149 (Anexo) e todos os participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) (Apêndice A) antes de iniciar o experimento.

5.2. Instrumentação

5.2.1. Eye-tracker de baixo custo

Para estabelecer o *biofeedback*, foi construído um rastreador ocular minimamente invasivo a partir de componentes de baixo custo, capazes de mensurar variáveis oculomotoras com precisão. O rastreador ocular construído envolveu a integração de duas câmeras USB (30 Hz) montadas em um par de óculos. Para a construção do Head Mounted Device (HMD), a placa de circuito impresso das duas câmeras (HQCAM-187121515, 30Hz) foram envelopadas com termoplástico em torno de seu invólucro padrão e fixadas em um Samsung Gear VR o qual foi modificado para acomodar as câmeras (Figura 3).

Figura 4 - Representação esquemática da montagem das câmeras no HMD.

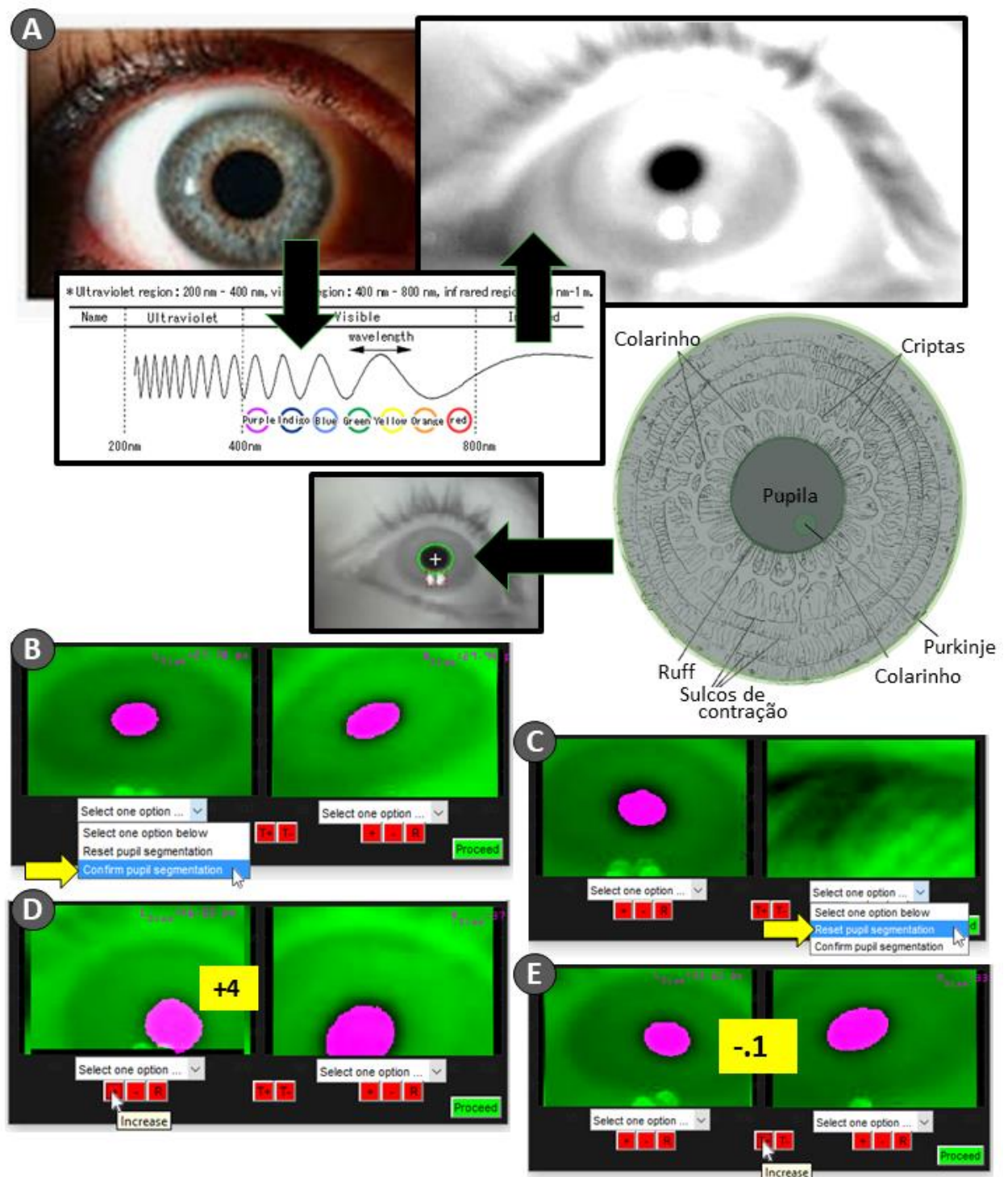


Embora a luminosidade infravermelha venha sendo comumente utilizada por diversos Eye-trackers comercializados, é importante ressaltar que radiações ópticas incoerentes presentes em Eye-trackers apresentam o potencial de promover efeitos adversos sobre todo espectro óptico. De acordo com o órgão responsável por determinar limites de exposição em bandas visíveis e invisíveis, Comissão Internacional em Proteção sobre Radiações Não-ionizantes (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP), danos promovidos aos tecidos biológicos podem variar de acordo com a largura de banda da luz emitida (PROTECTION, 1997; 2013; SLINEY *et al.*, 2005). Segundo as definições propostas pelo ICNIRP, a exposição da emissão de luz e energia radiante devem ser avaliadas de acordo com as ações espectrais (PROTECTION, 2013). Ações espectrais são usadas para pesar a exposição a partir de inferências sobre a irradiância em tecidos biológicos para que níveis de exposição sejam comparados com limites de exposição correspondentes. A análise das ações espectrais do Eye-tracker utilizado neste estudo estão descritas no Apêndice B.

Para estimar o diâmetro pupilar em tempo real, técnicas de sistemas artificiais foram empregadas em uma rotina customizada e escrita no Matlab (The Mathworks Inc., Massachusetts, EUA). Após a aplicação de filtros sobre diferentes propriedades de imagem (ex: White balance, sharpness, etc.) adquirida pela câmera dos olhos (Figura 4A), foi utilizado um algoritmo de *machine learning* criado a partir de faces frontais. A abordagem faz uso de detectores em cascata que selecionam o candidato mais provável em uma lista de candidatos, gerando um índice para cada seleção. Após a seleção, uma combinação de elementos é avaliada quanto à distribuição de canais de cores e, posteriormente, segmentada em termos de posição e dimensão. As informações extraídas da câmera do olho foram então definidas a partir de decisões pesadas. A partir destes cálculos, foi possível discriminar a pupila de demais estruturas com menor densidade, como por exemplo o Ruff pupilar e porções da Íris (Figura 4A). Mas devido a característica de funcionamento de cascata, alguns argumentos deverão ser confirmados pelo experimentador

para dar continuidade ao processo de segmentação. Embora a segmentação da pupila seja inicialmente introduzida de forma automática pelo algoritmo, uma interface gráfica irá solicitar uma confirmação do experimentador (Figura 4B) para dar continuidade ao programa. Conforme ilustrado abaixo, o experimentador poderá resetar o cálculo caso a pupila não esteja segmentada corretamente (Figura 4C) ou ajustar parâmetros da segmentação (Figura 4D, Figura 4E). Após a segmentação, o experimentador terá acesso ao diâmetro pupilar em pixels (px) ou em milímetros (mm).

Figura 5 - Representação esquemática da segmentação pupilar. (A) Fotografia do olho e filtragem de bandas de imagem. A ilustração anatômica foi adaptada de SNELL e LEMP (2013). (B) Ilustra a segmentação com canais de cores “verde-magenta”, a qual representa uma opção de alto contraste que auxilia pessoas com vários tipos de problemas que afetam a visão de cores (R2012a, The Mathworks Inc). (C) Ilustra um cenário de acerto e erro do algoritmo de identificação automática que pode ser corrigido pelo usuário (se necessário) a partir do dropdown box-menu destacado. (D) Indica um segundo ajuste que pode ser utilizado pelo usuário para corrigir o algoritmo caso esteja ultrapassando o limiar pupilar (quando necessário). (E) Indica um terceiro ajuste que pode ser utilizado pelo usuário para corrigir a magnitude de transformação de pixels na imagem.

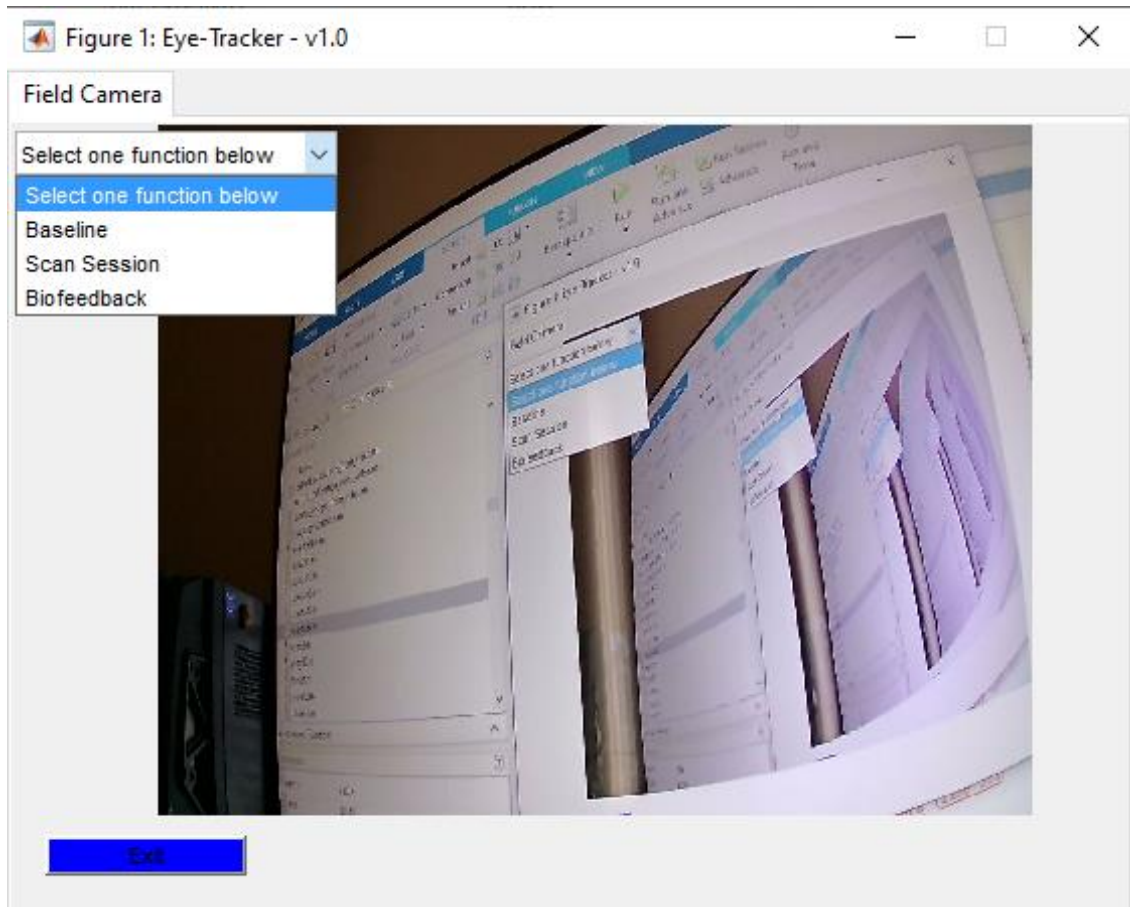


5.2.2. Software para interface pupila-biofeedback

Um ambiente de interface gráfica de usuário foi construído para a aplicação do protocolo de *biofeedback*. Conforme a Figura 5, o teste de linha

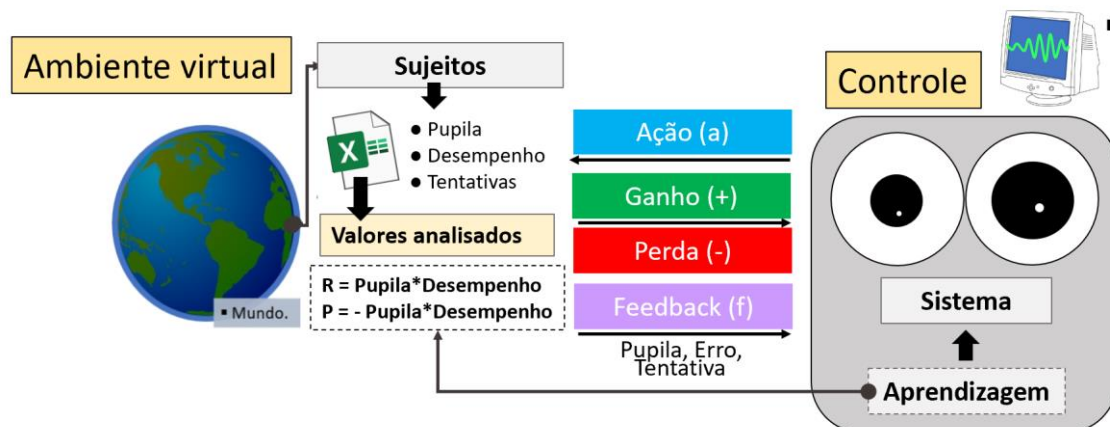
de base (*Baseline*) compreende o procedimento que estima a linha de base do diâmetro pupilar de cada indivíduo e possibilita a estimativa da métrica do ganho pupilar nos testes posteriores. Durante este teste, os indivíduos foram requisitados a permanecerem relaxados e olharem para a pista de feltro na qual a tarefa ia ser realizada, enquanto o diâmetro pupilar foi extraído frame a frame. A sessão de referência (*Scan session*) é responsável pelo registro do diâmetro pupilar em uma sessão preliminar para que o limiar do *biofeedback*, denominado a partir de agora de ponto de controle, seja estimado, posteriormente. A opção *Biofeedback* é responsável por estabelecer o protocolo de *biofeedback* e fornecer estímulos auditivos levando em consideração o ponto de controle estabelecido pela sessão de referência. A respectiva sessão irá calcular o ganho pupilar em tempo real e fornecer um estímulo auditivo (som de tacada curta do golfe) à medida que o participante alcance o ponto de controle.

Figura 6 - Exibição da aparência do software construído para estabelecer o biofeedback pupilar.



O ponto de controle foi estipulado a partir de um algoritmo de *machine learning* em uma rotina customizada e escrita no Matlab (The Mathworks Inc., Massachusetts, EUA). O algoritmo utilizado envolveu a construção de um ambiente virtual e dinâmico levando em consideração um conjunto de dados obtidos por 24 indivíduos do grupo controle, relacionados à dinâmica pupilar e o desempenho na prática em suas respectivas tentativas (Figura 6).

Figura 7 - Representação esquemática do algoritmo de *machine learning* utilizado para a estimativa do ponto de controle pupilar.



Do ponto de vista computacional, um ambiente virtual é responsável por estabelecer a dinâmica na qual os elementos se relacionam. E a partir dos dados fornecidos, um sistema de recompensas (R) e punição (P) foi utilizado, conforme a equação abaixo:

$$R = (x_{i(j)} - x_{i(j-1)}) * (y_{i(j)} - y_{i(j-1)})$$

$$P = -(x_{i(j)} - x_{i(j-1)}) * (y_{i(j)} - y_{i(j-1)})$$

sendo 'x' o ganho pupilar, 'i' a iteração de sujeito, 'j' a tentativa do sujeito e 'y' o erro global. Portanto, à medida que cada participante alcança as características relacionadas à expertise, i.e., a redução do ganho pupilar concomitante ao ganho no desempenho, o algoritmo codifica o objetivo ao sistema de controle (Figura 6). De forma similar, o algoritmo entende que o indivíduo se distanciou da meta na tentativa em que o desempenho piora e a dilatação pupilar aumenta.

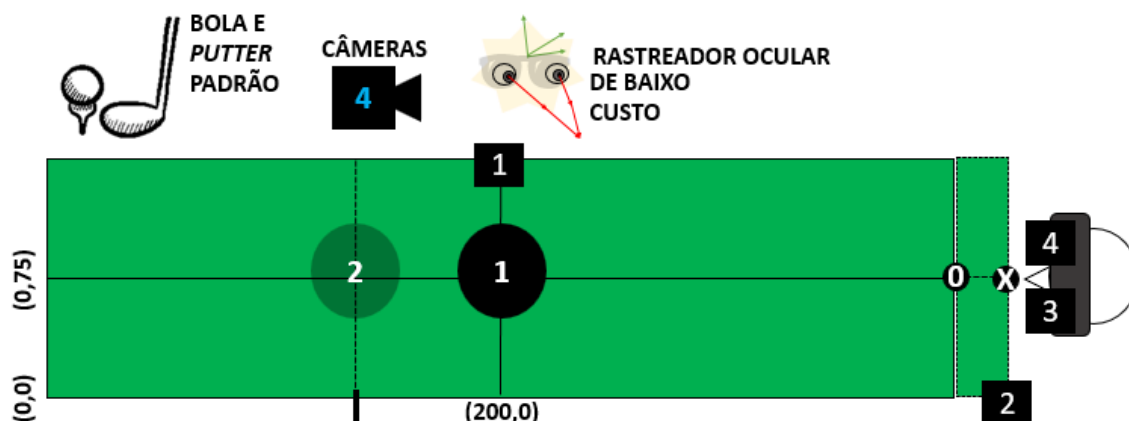
Para que tudo isso ocorra, um sistema de feedback mapeia cada variável fornecida para alimentar o algoritmo, possibilitando que esse possa escolher a ação mais apropriada (magnitude da redução pupilar). Esta, é registrada a partir de uma função dinâmica e customizada que fornece subsídios para a análise de todas as ações tomadas por cada indivíduo de forma entre-tentativa. O sistema de controle, por sua vez, atua aprendendo a

melhor ação a ser tomada a partir do valor esperado da recompensa e do mapeamento de todas as ações e recompensas utilizando um modelo com alto valor de camadas conectadas (128 *neurons*) e aprendizagem ($1e-3$). A aprendizagem foi estabelecida a partir de uma combinação de uma série de regras de estímulo-resposta que mapeia o ambiente e otimiza o algoritmo para estimar a recompensa imediata e futura. Após computar todos os dados fornecidos, a aprendizagem do modelo é simulada ao passo em que as variáveis referentes à dinâmica pupilar e desempenho em cada tentativa de cada indivíduo do grupo *biofeedback* é utilizada para alimentar o sistema a partir de sua quinta tentativa. Assim, o sistema sugere uma ação ótima levando em consideração a leitura dos dados de cada indivíduo do grupo *biofeedback* e da dinâmica obtida a partir do ambiente virtual. Dada a característica de eficiência do algoritmo, o *machine learning* retornou três informações ótimas, sendo a terceira fixa e mantida ao longo de todas as tentativas subsequentes para todo o grupo *biofeedback*.

5.2.3. Tarefa motora

Para conduzir a análise comportamental, um *Putter* e uma bola de golfe padrão foram utilizados pelos participantes para realizar as tacadas curtas do golfe sobre uma pista de feltro (400 x 150 cm). A pista utilizada apresenta a cor verde (hex #00b400) enquanto as demarcações sobre a posição da bola (0, Figura 6), taco (X, Figura 7) e alvo (1 e 2, Figura 7) foram feitas com uma camada de feltro preta (hex #000000) de baixa gramatura. Uma câmera (USB Camera Module Board – Modelo OV2710, 2MP, 16Hz) foi instalada e posicionada acima da pista de modo que permita o cálculo da variável de desempenho, enquanto uma segunda câmera (USB Camera Module Board - Modelo OV9732, IR-CUT, 30Hz) foi posicionada de frente ao participante, na altura do taco.

Figura 8 - Representação esquemática da tarefa experimental. Disposição e dimensões (cm) da pista, delimitação da posição da bola (0), taco (x), alvo (1), e instrumentação utilizada.



5.3. Delineamento experimental

Todos os voluntários foram entrevistados por um experimentador com a finalidade de verificar se estão aptos a participar do estudo. Especificamente, o experimentador seguiu um questionário estruturado o qual contém perguntas gerais sobre o estado atual de saúde do indivíduo e história pregressa. Com o alcance dos critérios de inclusão, os voluntários foram solicitados a responderem o Inventário de Dominância Lateral (IDLE) (OLDFIELD, 1971) para a determinar o índice de lateralidade. Com a obtenção de um valor acima de 80 pontos, o voluntário foi instruído a assinar o termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE). Posteriormente, os voluntários foram aleatoriamente distribuídos em grupo *biofeedback* ou controle e receberam instruções quanto aos procedimentos do estudo.

Antes de iniciar a tarefa experimental, todos os participantes foram instruídos a fixarem o olhar para o centro da pista de feltro durante 60 s. Esse procedimento foi conduzido para estimar a métrica de linha de base pupilar (*baseline*, Figura 5) o qual foi utilizada para inferir possíveis diferenças individuais na seleção amostral (ver tópico 3.2.2) e o cálculo do ganho no diâmetro pupilar (BICALHO *et al.*, 2019). Após estimar o *baseline* pupilar, todos os participantes do estudo receberam a instrução de que seu objetivo é acertar a bola no centro do alvo. As instruções quanto à execução envolveram a

manutenção do corpo sempre lateralmente ao taco (perpendicular ao alvo) e a realização um movimento fluido com o braço, sendo um movimento preparatório para trás e um movimento de ataque para frente (PARMA *et al.*, 2021).

A análise sobre a tacada curta do golfe ocorreu em três momentos distintos: pré-teste, fase de aquisição ou sessão de referência e testes de aprendizagem. No primeiro dia de experimento, ambos os grupos realizaram um pré-teste de cinco tentativas. Após o pré-teste, os participantes de ambos os grupos realizaram a prática da habilidade que envolveu 95 tentativas. Esta prática, é denominada de fase de aquisição para o grupo controle e sessão de referência para o grupo *biofeedback*. Após um período de 24 horas, ambos os grupos retornaram para realizar os testes de retenção e transferência que envolveram um único bloco de 10 tentativas. Nestes testes, o *biofeedback* não foi fornecido a nenhum dos grupos. Durante o teste de transferência, o alvo foi reposicionado 30cm à frente (170 cm do fim da pista) em relação a sessão de referência/aquisição (200 cm do início da pista) e teste de retenção (Figura 7). O tamanho do alvo (13.5 cm de diâmetro) foi mantido em todas as condições.

Os participantes do grupo *biofeedback*, realizaram a fase de aquisição somente após a delimitação do ponto de controle gerado a partir dos dados do grupo controle. Durante a fase de aquisição, os participantes receberam *biofeedback* da dinâmica pupilar após um pré-teste de 5 tentativas e antes de iniciar cada tentativa subsequente. Antes de iniciar cada tacada, os indivíduos de ambos os grupos foram instruídos a posicionarem o taco na posição inicial (Posição x, Figura 7) e permanecerem com o taco parado até a indicação auditiva de iniciar a tarefa. Os participantes foram instruídos a iniciar a tarefa imediatamente após o sinal auditivo, mas não abruptamente.

O sinal auditivo do grupo *biofeedback* (som que reproduz a tacada curta no golfe) foi fornecido à medida que o ponto de controle foi alcançado. Mas nas primeiras cinco tentativas, os participantes do grupo *biofeedback* foram instruídos a iniciar a tentativa somente após o surgimento de um estímulo auditivo (*beep* do Matlab), da mesma forma como foi ofertado ao grupo controle em toda fase de aquisição (incluindo pré-teste). Ao passo em que o alcance do

ponto de controle ocorreria em grandes intervalos e de forma não homogênea no grupo *biofeedback*, foi necessário gerar valores aleatórios para o grupo controle. Deste modo, um intervalo foi calculado a partir da disponibilidade de *feedback* visual (momento de trajetória da bola até sua parada) multiplicado por um fator de π e registrado à cada tentativa como “Exposição” para o grupo controle. A identificação da parada da bola ocorreu a partir do perfil da trajetória da bola e sua manutenção estática. Esta Exposição foi fornecida no pré-teste para ambos os grupos, na fase de aquisição para o grupo controle e nos testes de aprendizagem para ambos os grupos. A Exposição para a fase de aquisição do grupo *biofeedback* foi calculada a partir do posicionamento da bola e taco na posição inicial. A partir desse momento, o experimentador deu início ao sistema que forneceu o estímulo auditivo (*biofeedback*) à medida que o ponto de controle foi alcançado. Portanto, participantes de ambos os grupos foram instruídos a esperarem o surgimento de um estímulo auditivo para poder iniciar cada tacada em todo o experimento.

5.4. Variáveis dependentes

5.4.1. Erro Global

A medida comportamental utilizada para inferir o desempenho e a aprendizagem na tacada curta do golfe foi inferido a partir da seguinte medida:

$$\text{Erro Global} = \sqrt{(|X_i - X|)^2 + (|Y_i - Y|)^2}$$

sendo x e y as coordenadas anteroposteriores e médiolaterais do centro do alvo e da bola, respectivamente. A estimativa foi realizada ao final de cada tentativa, e calculada a partir de uma rotina customizada que realizou a identificação de ambas coordenadas a partir do filme gravado pela câmera filmadora instalada acima da pista. Tentativas nas quais a bola ultrapassou os limites da pista não foram registradas (PELLECK; PASSMORE, 2017).

5.4.2. Baseline pupilar

A linha de base pupilar foi necessária para estimar a dilatação pupilar na fase de aquisição e testes de aprendizagem em ambos os grupos. Uma função de leitura automática para corte de valores de pico foi usada para discriminar os pronunciados incrementos sobre o diâmetro pupilar e reconstruir o sinal. Este procedimento foi aplicado sobre a proporção de mudança de direção no perfil cinemático da pupila para detectar os ruídos que ocorrem no diâmetro pupilar quando os indivíduos fecham os olhos e foi adotado exclusivamente para fazer inferências estatísticas. Este procedimento foi adotado não somente sobre o diâmetro pupilar no baseline, mas também na fase de aquisição e testes de aprendizagem. Os dados pupilares deste estudo não foram filtrados em tempo real visando a alocação de recursos computacionais na condição *biofeedback*.

5.4.3. Dilatação pupilar

A dilatação pupilar foi calculada de maneira *offline* de forma similar ao que foi conduzido após o procedimento de linha de base. O sinal reconstruído foi utilizado para fazer comparações entre grupo controle e *biofeedback* ao longo da fase de aquisição e nos testes de aprendizagem. Para estimar a dilatação pupilar, uma correção subtrativa de linha de base foi empregada e inferida como ganho no diâmetro pupilar médio (BICALHO *et al.*, 2019) durante a Exposição, nos dois primeiros e último bloco de tentativas da fase de aquisição

5.4.4. Exposição

Como a Exposição foi uma variável não controlada no estudo, a sua análise possibilitou uma avaliação posterior dos intervalos adotados por ambos os grupos. Os respectivos dados foram utilizados para avaliar a associação do intervalo em questão com o desempenho na fase de aquisição.

5.4.5. Adesão ao *biofeedback*

Para verificar a adesão dos participantes ao procedimento de *biofeedback*, foi calculado o Alcance de treinamento bem-sucedido, o Intervalo de inicialização e o Alcance de *biofeedback*, para cada tentativa, conforme as equações abaixo, respectivamente:

$$\text{Alcance de treinamento bem-sucedido} = \frac{\sum(L - G) = 0}{F} \frac{1}{E_{(s)}}$$

$$\text{Alcance de } \textit{biofeedback} = \frac{\sum(L - G) = 0}{F}$$

$$\text{Intervalo de inicialização} = TS_2 - TS_1$$

tendo E como a Exposição (em segundos) até o fornecimento de *biofeedback*; L o ponto de controle obtido na sessão de referência; G como o ganho pupilar obtido na sessão de *biofeedback*; F como frequência de aquisição das câmeras pupilares; TS, como os dados referentes a pontos no tempo referentes ao início do movimento com o taco (TS₂) e alcance do último *biofeedback* (TS₁).

O Alcance de treinamento bem-sucedido compreende uma medida temporal do Alcance de *biofeedback* ponderado pela Exposição. O Alcance de *biofeedback*, por sua vez, representa uma estimativa quantitativa do *biofeedback* alcançado na respectiva tentativa. Já o Intervalo de inicialização compreende uma medida temporal entre o ponto de recebimento do *biofeedback* e o início da tentativa. Para a estimativa do Intervalo de inicialização, o início do movimento foi discriminado a partir da segmentação do taco na filmagem da Câmera 2 (Figura 8). A segmentação do taco foi conduzida a partir de técnicas de sistemas artificiais em uma rotina customizada similarmente ao que foi conduzido para segmentação pupilar. A abordagem se baseia no mapeamento de pixels conectados que apresentam menor valor de imagem. À medida em que o taco se moveu “0.5 cm” da

posição inicial, o início do movimento foi registrado e utilizado como parâmetro para cessamento do fornecimento de *biofeedback*.

5.5. Análise estatística

Testes de normalidade foram conduzidos em todo o conjunto de dados analisado. A medida de desempenho foi organizada em 20 blocos de 5 tentativas tanto para a sessão de referência quanto para a sessão de *biofeedback* (aquisição). O primeiro bloco de tentativas foi avaliado como pré-teste e as demais como fase de aquisição. Testes *t-student* foram empregados para verificar diferenças no pré-teste (primeiro bloco) entre indivíduos de ambos os grupos em termos de dilatação pupilar, desempenho e Exposição. Um teste *t-student* também foi empregado para confirmar que os indivíduos de ambos os grupos apresentavam o mesmo diâmetro pupilar basal.

Para conduzir as análises sobre as mudanças ao longo da fase de aquisição e sessão de referência, uma ANOVA *two-way* com medidas repetidas para o fator bloco foi conduzida para a comparação entre grupos sobre as mudanças no Erro global. Para avaliar as mudanças alcançadas na dilatação pupilar e sobre o Intervalo de inicialização do primeiro ao último bloco de prática, duas ANOVA's *two-way* (2 grupos x 2 blocos) com medidas repetidas no segundo fator foram realizadas. A associação entre a Exposição e o desempenho foi posteriormente verificada a partir de testes de correlação, levando em consideração o desempenho de cada tentativa do primeiro e último bloco de prática e o respectivo Intervalo de inicialização. Para verificar a adesão ao *Biofeedback*, testes de correlação entre o desempenho e o Alcance de treinamento bem-sucedido, alcance de *Biofeedback* e Intervalo de inicialização foram empregados para testar os resultados obtidos no primeiro e último bloco de prática. Para os testes de aprendizagem, Testes T de *Student* foram empregados para verificar diferenças entre grupos sobre o desempenho, dilatação pupilar e Exposição. Neste estudo, testes *post-hoc* de Tukey foram conduzidos quando necessário, e o nível de significância estatística foi estabelecido em 0,05 para todos os testes estatísticos.

6 RESULTADOS

6.1. Análise da seleção amostral

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes ao diâmetro pupilar em linha de base e idade de ambos os grupos apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* não indicou diferença entre grupos no diâmetro pupilar basal, $t(34) = -0,50$, $p = 0,61$, $d = 0,04$ ou na idade, $t(34) = -1,40$, $p = 0,17$, $d = 0,11$. As características demográficas estão dispostas na tabela abaixo (Tabela 2).

Tabela 2 - Características demográficas do Grupo controle e Grupo *biofeedback*.

Grupo controle		Grupo <i>biofeedback</i>	
Idade	Sexo	Idade	Sexo
27	F	26	F
23	F	28	F
26	F	31	M
31	M	27	F
28	F	39	F
25	F	33	M
39	M	29	F
26	M	32	M
34	M	27	F
27	M	28	F
25	F	39	M
24	F	34	M
39	M	30	F
31	F	35	M
33	M	34	F
29	M	34	M
32	M	35	M
37	F	33	M

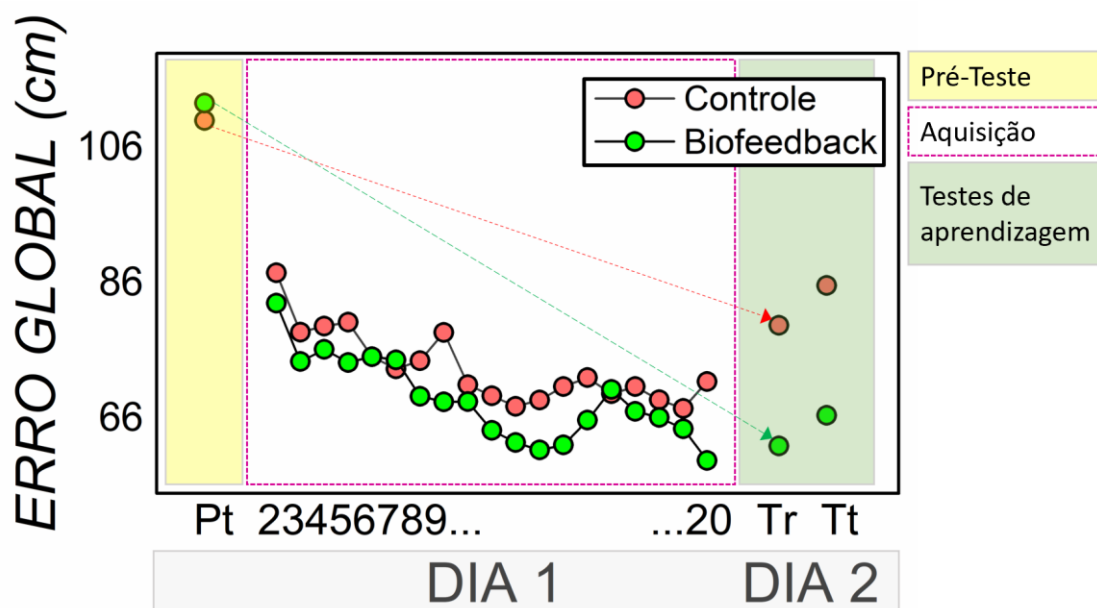
Grupo controle		Grupo <i>biofeedback</i>	
Idade	Sexo	Idade	Sexo
29.8 ± 5	9M 9F	31.9 ± 3.9	9M 9F

6.2. Pré-teste

6.2.1. Análise do Erro Global

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes ao EG no pré-teste apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* não indicou diferenças no Erro Global entre as condições de prática, $t(34) = -0,30$, $p = 0,76$, $d = 0,03$. Os respectivos resultados estão dispostos no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Média e $\pm DP$ do Erro Global sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 ao bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.

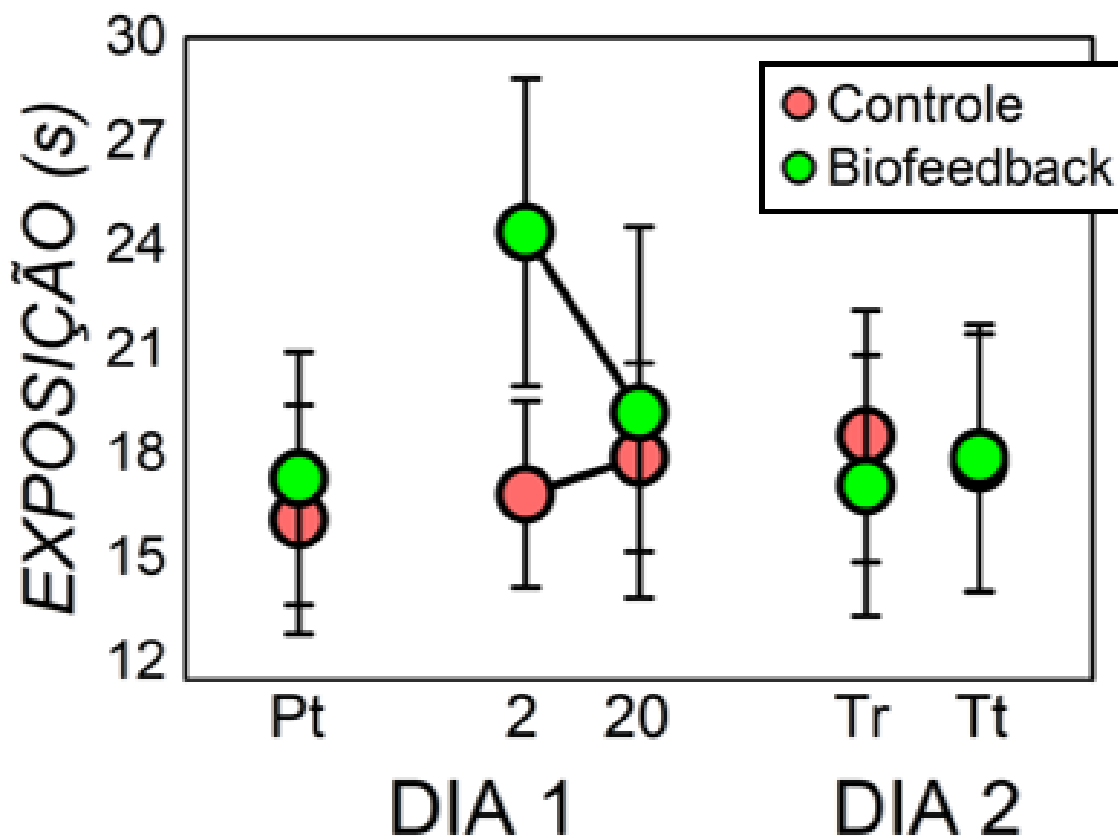


6.2.2. Análise da Exposição

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a Exposição no pré-teste apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* não indicou diferenças na Exposição entre as condições de prática,

$t(34) = -1,00$, $p = 0,32$, $d = 0,08$. Os respectivos resultados estão apresentados no Gráfico 2.

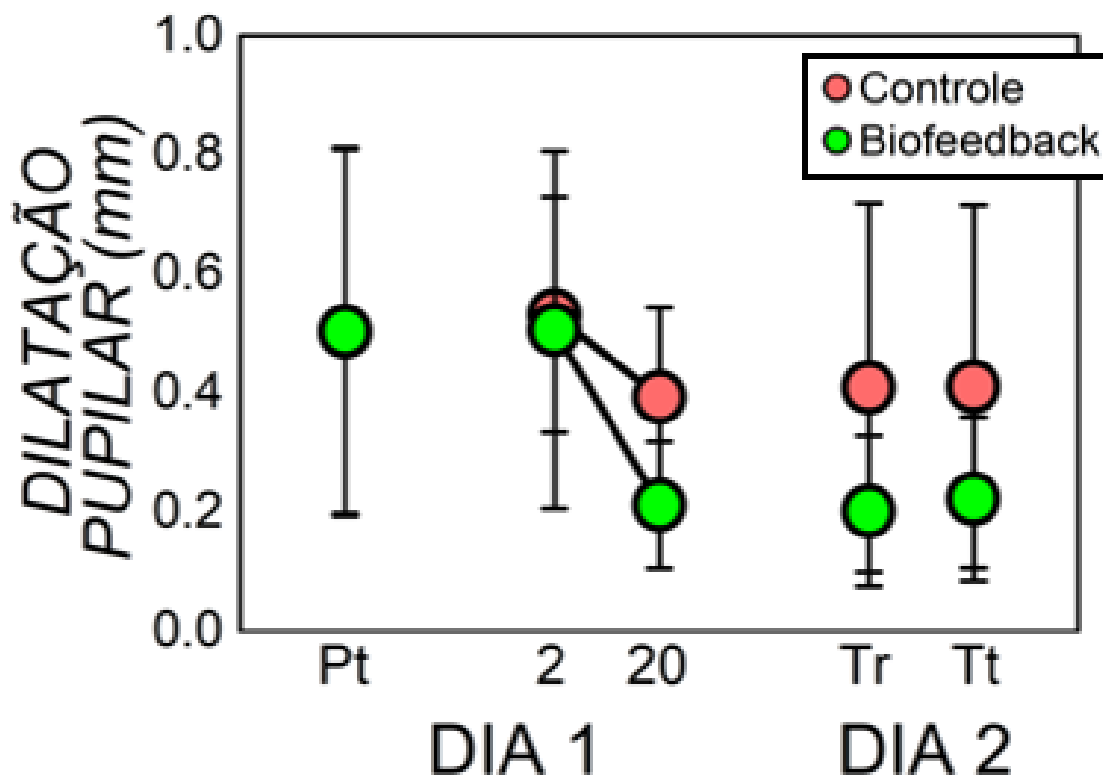
Gráfico 2 - Média e \pm DP da Exposição sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 e bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.



6.2.3. Análise da dilatação pupilar

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a dilatação pupilar no pré-teste apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* não indicou diferença significativa na dilatação pupilar entre as condições de prática, $t(34) = -0,00$, $p = 0,99$, $d = 0,00$. Os resultados estão apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Média e \pm DP da dilatação pupilar sobre a condição Pré-teste (Pt), blocos de tentativas durante a fase de aquisição (bloco 2 e bloco 20), Teste de retenção (Tr) e Teste de transferência (Tt) dos grupos Controle e Biofeedback.



6.3. Fase de aquisição

6.3.1. Análise do Erro Global

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes ao EG na fase de aquisição apresentaram normalidade ($p > 0,05$). A ANOVA *Two-way* indicou diferença significativa entre os grupos para a condição de prática, $F(1,646) = 4,55$, $p = 0,03$, $\eta^2 = 0,00$. A análise post-hoc indicou que os erros foram maiores no grupo Controle. A análise inferencial indicou um efeito significativo para blocos, $F(18,646) = 1,81$, $p = 0,02$, $\eta^2 = 0,04$ e o post-hoc indicou que os erros foram maiores no primeiro bloco em relação aos blocos seguintes. Não houve interação significativa entre grupos e blocos, $F(18,646) = 0,12$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,00$. Os respectivos dados estão apresentados no Gráfico 1.

6.3.2. Análise da dilatação pupilar

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a dilatação pupilar na fase de aquisição apresentaram normalidade em todas as condições de execução ($p > 0,05$). A ANOVA *Two-way* indicou diferença significativa entre grupos para a condição de prática, $F(1,68) = 4,72$, $p = 0,03$, $\eta^2 = 0,06$. A análise post-hoc indicou que a dilatação pupilar foi maior no grupo Controle. A análise inferencial indicou um efeito significativo para blocos, $F(1,68) = 20,61$, $p < 0,01$, $\eta^2 = 0,23$ e o teste post-hoc indicou que a dilatação pupilar foi maior no primeiro bloco em relação ao último bloco. Não houve interação significativa entre grupos e blocos, $F(1,68) = 2,70$, $p = 0,10$, $\eta^2 = 0,03$. Os respectivos dados estão apresentados na Gráfico 3.

6.3.3. Análise da Exposição

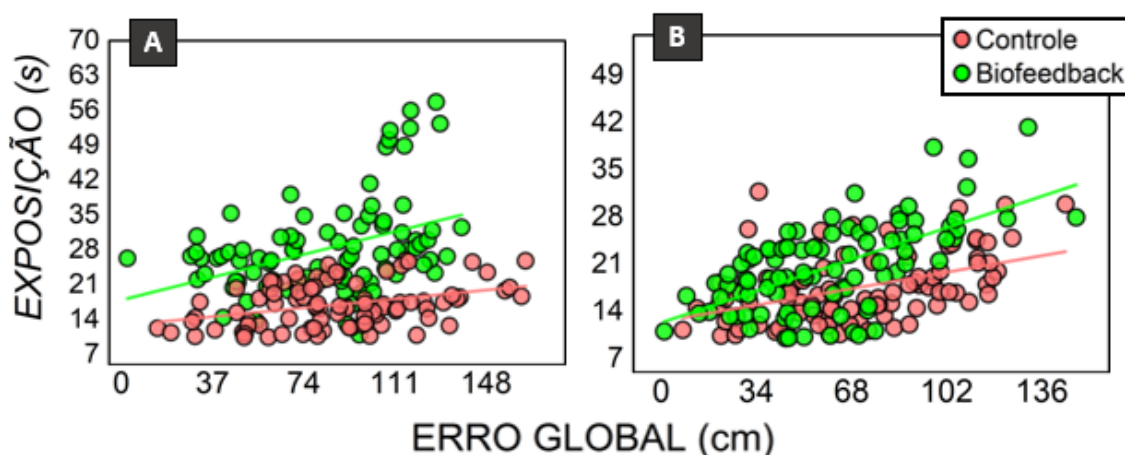
O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a Exposição apresentaram normalidade ($p > 0,05$). A ANOVA *Two-way* com medidas repetidas para o fator bloco indicou diferença entre grupos para a condição de prática, $F(1,68) = 22,47$, $p < 0,01$, $\eta^2 = 0,25$. A análise post-hoc indicou que a Exposição foi maior no grupo *biofeedback*. A análise inferencial indicou um efeito significativo para blocos, $F(1,68) = 4,80$, $p = 0,03$, $\eta^2 = 0,06$, e o teste post-hoc indicou que a Exposição foi maior no primeiro bloco em relação ao último bloco. A análise também indicou uma interação significativa entre grupos e blocos, $F(1,68) = 11,06$, $p < 0,01$, $\eta^2 = 0,14$, e o teste post-hoc indicou que a Exposição foi maior no grupo *biofeedback* no primeiro bloco. Os respectivos dados estão apresentados no Gráfico 2.

6.3.3.1. Análise da associação entre Erro Global e Exposição

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados do EG e da Exposição não apresentaram normalidade no primeiro bloco da condição de *biofeedback* ($p < 0,05$). A análise de Pearson indicou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Exposição para o primeiro bloco da aquisição

do grupo controle, $r = 0,36$, $p < 0,01$ enquanto o teste de Spearman indicou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Exposição para o primeiro bloco da aquisição do grupo *Biofeedback*, $r = 0,38$, $p < 0,01$. O teste de Pearson também indicou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Exposição para o último bloco da aquisição no grupo controle, $r = 0,44$, $p < 0,01$ e grupo *Biofeedback*, $r = 0,61$, $p < 0,01$. Os respectivos resultados estão apresentados na figura abaixo (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Associação entre Erro Global e Exposição dos grupos controle e biofeedback no primeiro (A) e último bloco de tentativas (B) da fase de aquisição.

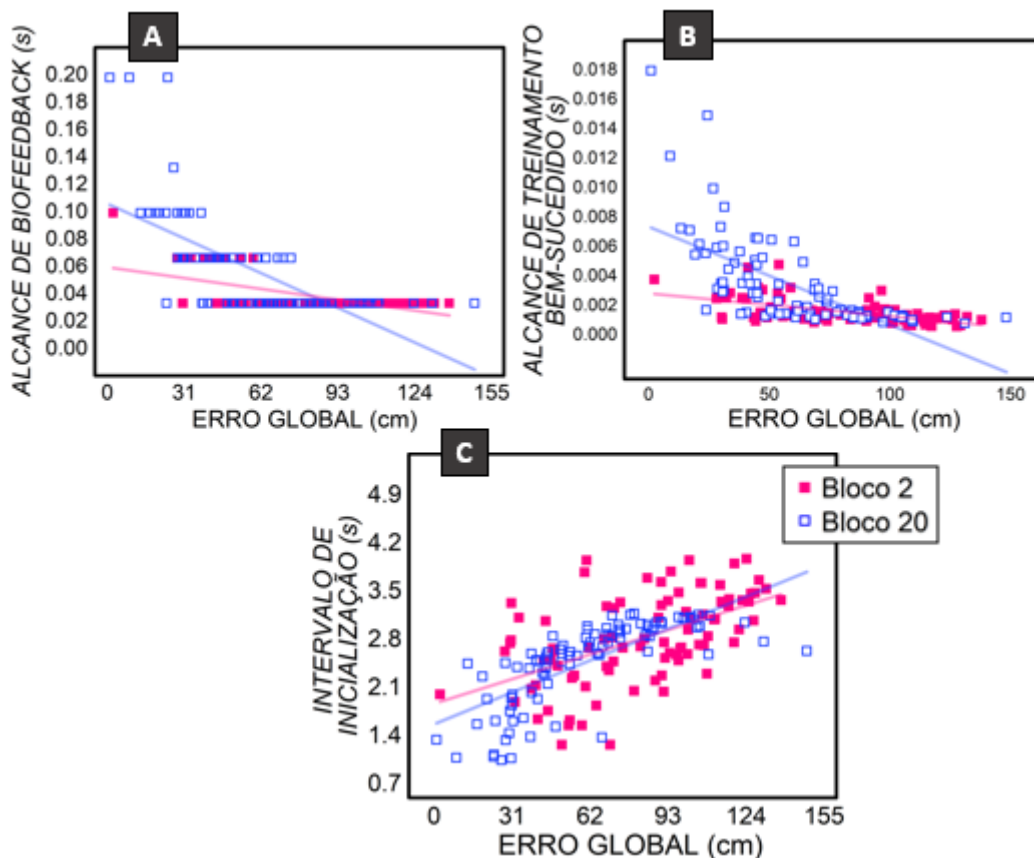


6.3.4. Análise da associação entre Erro Global e adesão ao *Biofeedback*

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados relativos ao Alcance de treinamento bem-sucedido, Alcance de *Biofeedback* e Intervalo de inicialização, não apresentaram normalidade ($p < 0,05$). A análise de Spearman indicou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Alcance de treinamento bem-sucedido para o primeiro, $r = -0,55$, $p < 0,01$ e último bloco da aquisição, $r = -0,78$, $p < 0,01$. A análise de Spearman também indicou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Alcance de *Biofeedback* para o primeiro, $r = -0,35$, $p < 0,01$ e último bloco da aquisição, $r = -0,77$, $p < 0,01$. E por fim, a análise de Spearman também revelou correlação significativa entre a medida de Erro Global e Intervalo de inicialização para o

primeiro, $r = 0,58$, $p < 0,01$ e último bloco da aquisição, $r = 0,85$, $p < 0,01$. Os respectivos resultados estão apresentados na figura abaixo (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Associação entre Erro Global e Alcance de biofeedback (A), Erro Global e Alcance de treinamento bem-sucedido (B) e Erro Global e Intervalo de inicialização (C) no primeiro e último bloco de tentativas da fase de aquisição do grupo biofeedback.



6.4. Testes de aprendizagem

6.4.1. Análise do Erro Global

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes ao EG nos testes de aprendizagem apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* revelou diferenças no Erro Global entre as condições de prática, indicando que o grupo *Biofeedback* apresentou um menor erro no teste de Retenção, $t(34) = 2,11$, $p = 0,04$, $d = 0,18$ e no teste de Transferência, $t(34) = 2,25$, $p = 0,03$, $d = 0,19$. Os respectivos resultados estão apresentados no

Gráfico 1.

6.4.2. Análise da Exposição

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a Exposição nos testes de aprendizagem apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* não indicou diferença no Intervalo de inicialização entre as condições de prática para o teste de Retenção, $t(34) = 1,12$, $p = 0,27$, $d = 0,00$ e para o teste de Transferência, $t(34) = -0,100$, $p = 0,92$, $d = 0,09$. Os respectivos resultados estão apresentados no Gráfico 2.

6.4.3. Análise da dilatação pupilar

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que os dados referentes a dilatação pupilar nos testes de aprendizagem apresentaram normalidade ($p > 0,05$). O teste T de *Student* revelou diferença na dilatação pupilar entre as condições de prática, indicando que o grupo *Biofeedback* apresentou uma menor dilatação pupilar no teste de Retenção, $t(34) = 2,63$, $p = 0,01$, $d = 0,24$ e no teste de Transferência, $t(34) = 2,39$, $p = 0,02$, $d = 0,22$. Os respectivos resultados estão apresentados no Gráfico 3.

7 DISCUSSÃO

O objetivo geral do estudo foi investigar o ganho de automaticidade em uma tarefa motora via de *biofeedback* pupilar. Foi hipotetizado que o *biofeedback* pupilar iria reduzir a dilatação pupilar durante a prática levando a uma maior automaticidade. Conseqüentemente, o desempenho e a aprendizagem motora seriam favorecidos, assim como tem sido observado pelos estudos que buscaram direcionar o foco de atenção de um aprendiz a um foco externo (WULF, 2013). Os resultados do presente estudo confirmaram as hipóteses levantadas, abrindo um promissor campo de pesquisa na área do comportamento motor.

O primeiro objetivo com este estudo foi verificar as repercussões do protocolo de *biofeedback* sobre o desempenho motor. Os resultados revelaram que a dilatação pupilar e a magnitude de erro reduzem ao longo da prática no grupo controle. Já o fornecimento de *biofeedback* pupilar e o respectivo condicionamento do estado mental favorecem não somente a manutenção de um diâmetro pupilar menor, mas também um melhor desempenho motor. Os achados corroboram com os resultados obtidos pelo estudo de Bicalho *et al.* (2019) no qual também foi observado uma redução da dilatação pupilar e uma melhora do desempenho ao longo da prática de uma habilidade motora. As mudanças observadas na dilatação pupilar entre o final da prática e os testes de aprendizagem no estudo Bicalho *et al.* (2019) indicaram comportamento semelhante, o que por sua vez também foram associados a eficiência neural e promoção da automaticidade. No presente estudo, a eficiência neural e automaticidade também foi constatada em ambos os grupos, embora tenha sido acentuada no grupo *biofeedback*.

É possível hipotetizar que o *biofeedback* da dinâmica pupilar pode favorecer o envolvimento de um menor esforço mental, promovendo a redução de fatores que prejudicam a ação, favorecendo um modo de controle menos consciente, mais automático e eficiente. É importante enfatizar que a hipótese levantada está alinhada com os pressupostos do direcionamento do foco de atenção à um foco externo a nível de repercussões no esforço cognitivo (WULF

et al., 2001). Portanto, não necessariamente sugere que o *biofeedback* utilizado tenha induzido os aprendizes a adotarem um foco externo, mas sim a reduzir seu esforço cognitivo.

Também é possível especular que o *biofeedback* utilizado possa favorecer a adoção de uma estratégia comportamental denominada *exploitation* no qual o aprendiz utiliza menos recursos explícitos e esforço mental. Esse comportamento também tem sido especulado em indivíduos que adotam um foco externo e apresentam maiores níveis de automaticidade (LOHSE *et al.*, 2014), o qual tem sido investigado a nível neurobiológico e oculomotor (MCGINLEY *et al.*, 2015)

A partir de uma detalhada observação da dinâmica pupilar e da atividade neural do Locus Cerúleos (LC), Aston-Jones e Cohen (2005) formalizaram a hipótese do ganho adaptativo (*Adaptative Gain Theory* - AGT) salientando a existência da interação entre padrões tônicos e fásicos do sistema LC norepinefrina (NE) que atuam de modo a facilitar funções da rede neural e otimizar a execução de respostas comportamentais. Duas observações-chave deram suporte a este modelo teórico: uma referente aos modos de função do LC e outra referente à influência da liberação da NE no processamento cortical. O modo fásico geralmente ocorre em resposta a eventos relevantes para a tarefa durante janelas temporais de alto desempenho e menor dilatação pupilar e atividade do LC na linha de base enquanto o modo tônico está associado a uma taxa de disparo de linha de base elevada, ausência de respostas fásicas, maior dilatação pupilar e pior desempenho (ASTON-JONES *et al.*, 1994). Com base nos efeitos da NE no processamento cortical, a AGT propõe que o modo fásico promove *exploitation* (i.e., tirar vantagem), enquanto o modo tônico promove o desengajamento da tarefa atual em favor de *exploration* (i.e., exploração) (ASTON-JONES; COHEN, 2005). Deste modo, é possível especular que a redução pupilar induzida pelo *biofeedback* possa favorecer a automaticidade ao estimular um comportamento ótimo e predominante de *exploitation*.

A manutenção de estados ótimos vem sendo corriqueiramente investigada em estudos de *neurofeedback*. Estes estudos buscam fornecer

informações ótimas sobre atividades neurais relacionadas a execução (e.g. ARNS *et al.*, 2008; PAPOUTSI *et al.*, 2018) ou ao planejamento motor (e.g. MAKARY *et al.*, 2017; MEHLER *et al.*, 2019). Essas informações têm sido baseadas na identificação de atividades neurais relacionadas a expertise que foram identificadas por análises prévias (e.g. BLEFARI *et al.*, 2015; CHENG *et al.*, 2015) ou por algoritmos de *machine learning* (e.g. MOHANTY *et al.*, 2018; PAPAGEORGIOU *et al.*, 2009) como foi conduzido no presente estudo.

Mas ao analisar mais profundamente estes estudos, é possível observar que pouca atenção tem sido direcionada a inferências sobre a aprendizagem motora. De forma geral, a grande maioria dos estudos de *neurofeedback* têm focado em fazer inferências sobre as mudanças alcançadas na prática com o *neurofeedback* e não sobre testes de retenção ou transferência. E, para o nosso conhecimento, somente um único estudo (RING *et al.*, 2015) avaliou as repercussões do fornecimento de *neurofeedback* durante a prática sobre a aprendizagem motora. Dada as claras distinções entre desempenho e aprendizagem, é possível hipotetizar que vários protocolos de *neurofeedback* na literatura podem ter favorecido o desempenho, mas não a aprendizagem motora.

Embora exista algumas similaridades entre o presente estudo e os demais estudos de *neurofeedback*, é importante destacar que nossa abordagem teve como diferencial controlar uma medida representativa do esforço cognitivo, que vem sendo altamente associada com a automaticidade, o desempenho e a aprendizagem motora. A redução do esforço cognitivo e a promoção da automaticidade tem sido apontada como principal característica por trás de um comportamento habilidoso (CHENG *et al.*, 2015), o que por sua vez pode justificar o fato do nosso protocolo de *biofeedback* ter obtido um melhor resultado do que o protocolo de RING *et al.* (2015).

Uma outra questão comumente negligenciada por estudos de *neurofeedback* é que todos tem ignorado a importância em controlar aspectos temporais inerentes ao fornecimento do *feedback*. O presente estudo buscou controlar essa questão aumentando e aleatorizando a Exposição. Entretanto, nossa tentativa não foi eficaz e o período de Exposição ainda sim foi maior no

grupo *biofeedback*. Em paralelo, a análise estatística também demonstrou uma associação entre a Exposição e o desempenho em ambos os grupos e blocos, no sentido que quanto maior a Exposição pior o desempenho. Mas por outro lado, embora o grupo *biofeedback* tenha tido uma maior Exposição, ainda sim tiveram um melhor desempenho motor. Portanto, os resultados indicam que os efeitos promovidos pela redução do esforço cognitivo sobrepuseram os efeitos deletérios promovidos pela alta Exposição em iniciar cada tentativa. Entretanto, não é possível generalizar os achados do presente estudo para os demais estudos da literatura, uma vez que cada um buscou oferecer informações diferentes na prática e nenhum deles buscou descrever/mensurar a Exposição em cada tentativa.

A análise da adesão ao protocolo de treinamento nos estudos de *neurofeedback* tem sido normalmente verificada a partir da comparação entre a atividade neural do grupo experimental com o grupo controle ou pelo condicionamento de uma atividade neural por um tempo pré-determinado para iniciar a tarefa (RING *et al.*, 2015). No presente estudo, além de verificar se os indivíduos mantiveram um menor diâmetro pupilar na prática, verificamos a adesão por três formas: (i) O Alcance de treinamento bem-sucedido, o (ii) Alcance de *biofeedback* e o (iii) Intervalo de inicialização. Todas as medidas confirmaram grande influência da adesão do *biofeedback* sobre a prática motora. A maior associação revelada foi entre o Erro Global e o Intervalo de Iniciação do Movimento no último bloco de aquisição, no sentido de que quanto mais tempo os participantes demoraram para iniciar a tarefa após o recebimento do *biofeedback*, pior foi o desempenho. Em outras palavras, tentativas nas quais os indivíduos gastaram maior tempo para iniciar o movimento, foram também as tentativas nas quais o planejamento foi inferior. Keele (1968) argumenta que o comportamento habilidoso é caracterizado pela acurada programação de movimento durante o estágio final de preparação para uma ação. E essa questão tem recebido suporte de vários estudos de *neurofeedback* que têm fornecido *biofeedback* antes de iniciar o movimento (CHENG *et al.*, 2015). Deste modo, a demora para iniciar a tentativa pode ser reflexo de um planejamento inadequado. E, conforme os resultados obtidos, a

programação motora em um estágio mais avançado de entendimento da tarefa (último bloco) é mais influenciada por essa questão o que por sua vez corrobora com as noções levantadas por Keele (1968).

Já as diferenças observadas ao nível da associação entre o Alcance de treinamento bem-sucedido e o alcance de *biofeedback* podem ser explicadas pela manutenção do estado ótimo. Tentativas nas quais houve uma maior sustentação do estado ótimo ao longo da Exposição tiveram um desempenho superior do que as tentativas nas quais o Alcance de treinamento bem-sucedido foi menor. Em suma, os resultados sugerem que os indivíduos podem se beneficiar com a sustentação de estados ótimos por maiores períodos e que estes sejam, sobretudo, sustentados na fase final do planejamento. Para que isso seja possível, o treinamento do esforço cognitivo via *biofeedback* poderia ser conduzido em uma sessão anterior à prática ou a partir da orientação de estratégias para o alcance mais rápido do ponto de controle. Sugerimos também verificar se a simples orientação de manter um nível mais baixo de esforço cognitivo ao longo da prática é alcançável e se esta reproduz achados compatíveis com o presente estudo. Dessa forma, seria possível verificar a relevância da identificação de estados ótimos de esforço cognitivo sobre o desempenho e aprendizagem motora.

Um outro aspecto que distingue o nosso estudo dos demais foi a abordagem utilizada para a identificação do ponto de controle. Nosso estudo foi o primeiro de toda literatura de aprendizagem motora a recorrer a um algoritmo de *machine learning* baseado na observação de um conjunto de dados reais e os efeitos de todas as ações tomadas para identificar, de forma robusta, um estado ótimo. O algoritmo em questão apresenta vantagens pela sua alta capacidade em lidar com dados extensos e complexos e tomar uma série de decisões para a identificação de um ponto de controle ideal sem a intervenção do experimentador. Atualmente, o algoritmo vem sendo muito utilizado na área de engenharia enquanto a literatura de comportamento motor conta com evidências do uso desse algoritmo para a reabilitação visando a otimização do desempenho motor em indivíduos que sofreram acidente vascular encefálico (NAROS; GHARABAGHI, 2015), a execução de atividades de vida diária em

peças com demência (BOGER *et al.*, 2005) e o controle de próteses mecânicas (THOMAS *et al.*, 2008).

Mas é importante destacar também que há limitações no presente estudo. Primeiramente, a filtragem dos dados pupilares não ocorreu em tempo real. Dada a importância da remoção e atenuação de *spikes* nos dados, teríamos um perfil menos ruidoso caso os mesmos tivessem sido filtrados. A justificativa para não ter conduzido a mesma se pauta na alocação de recursos computacionais e de que ainda não há evidências na literatura indicando qual o melhor algoritmo para tal finalidade. Uma outra questão importante a ser adereçada é que os grupos não foram pareados quanto a Exposição. Portanto, os resultados positivos promovidos pelo *biofeedback* foram parcialmente mascarados por esta falta de controle.

A questão que permanece é se resultados mais robustos poderiam ser alcançados caso o *biofeedback* da dinâmica pupilar fossem conduzidos de outra forma. Futuros estudos que buscarem otimizar o presente protocolo devem levar em consideração a Exposição e os demais fatores relacionados à adesão levantadas pelo presente estudo. Uma forma de contornar essas questões seria a inclusão de um grupo *yoked* para o grupo *biofeedback*, tendo assim a Exposição pareada entre grupo controle e experimental. A identificação de estratégias que possam ser utilizadas para o alcance da redução pupila também é incentivado visto que esta pode otimizar o Alcance de treinamento bem-sucedido. Por outro lado, a investigação de diferentes algoritmos para a identificação de estados pupilares ótimos também é incentivada. Só estes permitirão confirmar se a abordagem utilizada no presente estudo é a mais eficaz para a identificação do ponto controle.

O protocolo de *biofeedback* utilizado ajudou a produzir um maior entendimento do papel da automaticidade na prática de uma habilidade motora trazendo *insights* sobre a identificação de mecanismos atrelados a um estado mental ótimo. O *biofeedback* da dinâmica pupilar demonstra ser uma ferramenta promissora para otimizar a automaticidade e, conseqüentemente, a aprendizagem motora. Tarefas discretas e de circuito fechado como a utilizada

neste estudo podem ser mais beneficiadas pelo protocolo em questão devido a natureza do planejamento motor.

8 CONCLUSÃO

Estudos de *neurofeedback* vêm sendo empregados para o controle ativo da atividade neural durante a execução de uma habilidade motora. O presente estudo traz de forma inédita o aprendizado do controle ativo do esforço cognitivo via *biofeedback* a partir do comportamento oculomotor e controlado via *machine learning*. Os resultados demonstram que a redução ativa do esforço cognitivo favorece não somente a prática, mas também a aprendizagem motora. A redução do esforço cognitivo leva à automaticidade, favorecendo a redução de fatores que prejudicam a ação motora. O sistema de *biofeedback* via comportamento ocular desenvolvido nesse estudo se mostrou sensível o bastante para promover mudanças no esforço cognitivo, abrindo um campo inédito de possibilidades e aplicação dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. A. A closed-loop theory of motor learning. **Journal of motor behavior**, 3, n. 2, p. 111-150, 1971.
- ANDERSON, J. R. Acquisition of cognitive skill. **Psychological review**, 89, n. 4, p. 369, 1982.
- ARNS, M. *et al.* Golf performance enhancement and real-life neurofeedback training using personalized event-locked EEG profiles. **Journal of Neurotherapy**, 11, n. 4, p. 11-18, 2008.
- ASTON-JONES, G.; COHEN, J. D. An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: adaptive gain and optimal performance. **Annual Review of Neuroscience**, 28, p. 403-450, 2005.
- ASTON-JONES, G. *et al.* Locus coeruleus neurons in monkey are selectively activated by attended cues in a vigilance task. **Journal of Neuroscience**, 14, n. 7, p. 4467-4480, 1994.
- BAGARINAO, E. *et al.* Improved volitional recall of motor-imagery-related brain activation patterns using real-time functional MRI-based neurofeedback. **Frontiers in human neuroscience**, 12, p. 158, 2018.
- BICALHO, L. E. A. *et al.* Oculomotor behavior and the level of repetition in motor practice: Effects on pupil dilation, eyeblinks and visual scanning. **Human movement science**, 64, p. 142-152, 2019.
- BLEFARI, M. L. *et al.* Improvement in precision grip force control with self-modulation of primary motor cortex during motor imagery. **Frontiers in behavioral neuroscience**, 9, p. 18, 2015.
- BOGER, J. *et al.*, 2005, **A decision-theoretic approach to task assistance for persons with dementia**. 1293-1299.
- CHENG, M.-Y. *et al.* Sensorimotor rhythm neurofeedback enhances golf putting performance. **Journal of Sport and Exercise Psychology**, 37, n. 6, p. 626-636, 2015.
- DE SOUZA, J. K. S. **Construção de uma plataforma configurável para aquisição de imagens com aplicações pupilométricas**. Orientador: CRIOLLO, C. J. T. 2012. 152 f.

(Doutorado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EDWARDS, W. H. **Motor learning and control: From theory to practice**. Cengage Learning, 2010.

FITTS, P. M.; POSNER, M. I. **Human performance**. Oxford, England: Brooks/Cole, 1967.

GRANHOLM, E. E.; STEINHAUER, S. R. Pupillometric measures of cognitive and emotional processes. **International Journal of Psychophysiology**, 2004.

HALME, H.-L.; PARKKONEN, L. Across-subject offline decoding of motor imagery from MEG and EEG. **Scientific reports**, 8, n. 1, p. 1-12, 2018.

HESS, E. H.; POLT, J. M. Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. **Science**, 143, n. 3611, p. 1190-1192, 1964.

HODGES, N. J.; FRANKS, I. M. Attention focusing instructions and coordination bias: Implications for learning a novel bimanual task. **Human movement science**, 19, n. 6, p. 843-867, 2000.

KAHNEMAN, D.; BEATTY, J. Pupil diameter and load on memory. **Science**, 154, n. 1583, p. 1885, 1966.

KAHYA, M. *et al.* Increased postural demand is associated with greater cognitive workload in healthy young adults: a pupillometry study. **Frontiers in Human Neuroscience**, 12, p. 288, 2018.

KAL, E. *et al.* Does implicit motor learning lead to greater automatization of motor skills compared to explicit motor learning? A systematic review. **PloS one**, 13, n. 9, p. e0203591, 2018.

KANTAK, S. S.; WINSTEIN, C. J. Learning–performance distinction and memory processes for motor skills: A focused review and perspective. **Behavioural brain research**, 228, n. 1, p. 219-231, 2012.

KEELE, S. W. Movement control in skilled motor performance. **Psychological bulletin**, 70, n. 6p1, p. 387, 1968.

KLINGNER, J. *et al.* Effects of visual and verbal presentation on cognitive load in vigilance, memory, and arithmetic tasks. **Psychophysiology**, 48, n. 3, p. 323-332, 2011.

LAGE, G. The combination of practice schedules: effects on relative and absolute. **Journal of Human Movement Studies**, 52, p. 021-035, 2007.

LAGE, G. M. *et al.* O efeito da interferência contextual na aprendizagem motora: contribuições científicas após três décadas da publicação do primeiro artigo. **Revista Brasileira de Ciência e Movimento**, 19, p. 107-119, 2011.

LAI, Q.; SHEA, C. H. Generalized motor program (GMP) learning: Effects of reduced frequency of knowledge of results and practice variability. **Journal of motor behavior**, 30, n. 1, p. 51-59, 1998.

LEAMY, D. J. *et al.* An exploration of EEG features during recovery following stroke—implications for BCI-mediated neurorehabilitation therapy. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, 11, n. 1, p. 1-16, 2014.

LOHSE, K. R. *et al.* How changing the focus of attention affects performance, kinematics, and electromyography in dart throwing. **Human movement science**, 29, n. 4, p. 542-555, 2010.

LOHSE, K. R. *et al.* Motor skill acquisition across short and long time scales: a meta-analysis of neuroimaging data. **Neuropsychologia**, 59, p. 130-141, 2014.

MAGILL, R. A. **Aprendizagem motora: conceitos e aplicações**. Blucher, 2000.

MAKARY, M. M. *et al.*, 2017, **Self-regulation of primary motor cortex activity with motor imagery induces functional connectivity modulation: A real-time fMRI neurofeedback study**. IEEE. 4147-4150.

MCGINLEY, M. J. *et al.* Waking state: rapid variations modulate neural and behavioral responses. **Neuron**, 87, n. 6, p. 1143-1161, 2015.

MCNEVIN, N. *et al.* Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. **Psychological Research**, n. 67, p. 22-29, 2003.

MEHLER, D. M. *et al.* The BOLD response in primary motor cortex and supplementary motor area during kinesthetic motor imagery based graded fMRI neurofeedback. **Neuroimage**, 184, p. 36-44, 2019.

MOHANTY, R. *et al.* Machine learning classification to identify the stage of brain-computer interface therapy for stroke rehabilitation using functional connectivity. **Frontiers in neuroscience**, 12, p. 353, 2018.

NAROS, G.; GHARABAGHI, A. Reinforcement learning of self-regulated β -oscillations for motor restoration in chronic stroke. **Frontiers in human neuroscience**, 9, p. 391, 2015.

NOGUEIRA, N. G. d. H. M. *et al.* Motor learning and COMT Val158met polymorphism: Analyses of oculomotor behavior and corticocortical communication. **Neurobiology of Learning and Memory**, 168, p. 107157, 2020.

PAPAGEORGIOU, T. D. *et al.*, 2009, **Neurofeedback of two motor functions using supervised learning-based real-time functional magnetic resonance imaging**. IEEE. 5377-5380.

PAPOUTSI, M. *et al.* Stimulating neural plasticity with real-time fMRI neurofeedback in Huntington's disease: A proof of concept study. **Human Brain Mapping**, 39, n. 3, p. 1339-1353, 2018.

PARMA, J. O. *et al.* TDCS of the primary motor cortex: Learning the absolute dimension of a complex motor task. **Journal of Motor Behavior**, 53, n. 4, p. 431-444, 2021.

PELLECK, V.; PASSMORE, S. R. Location versus task relevance: The impact of differing internal focus of attention instructions on motor performance. **Acta psychologica**, 176, p. 23-31, 2017.

PROTECTION, I. C. o. N.-I. R. Guidelines on limits of exposure for broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μm). **Health Phys**, 73, n. 3, p. 539-597, 1997.

PROTECTION, I. C. o. N.-I. R. ICNIRP guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. **Health Physics**, 105, n. 1, p. 74-96, 2013.

RING, C. *et al.* Investigating the efficacy of neurofeedback training for expediting expertise and excellence in sport. **Psychology of sport and exercise**, 16, p. 118-127, 2015.

SAEEDPOUR-PARIZI, M. R. *et al.* Pupil diameter as a biomarker of effort in goal-directed gait. **Experimental Brain Research**, 238, n. 11, p. 2615-2623, 2020.

SALMONI, A. W. *et al.* Knowledge of results and motor learning: a review and critical reappraisal. **Psychological bulletin**, 95, n. 3, p. 355, 1984.

SAMUELS, E. R.; SZABADI, E. Functional neuroanatomy of the noradrenergic locus coeruleus: its roles in the regulation of arousal and autonomic function part I: principles of functional organisation. **Current neuropharmacology**, 6, n. 3, p. 235-253, 2008.

SCHMIDT, R. A. Frequent augmented feedback can degrade learning: Evidence and interpretations. *In: Tutorials in motor neuroscience*: Springer, 1991. p. 59-75.

SIMPSON, H. M.; PAIVIO, A. Effects on pupil size of manual and verbal indicators of cognitive task fulfillment. **Perception & Psychophysics**, 3, n. 3, p. 185-190, 1968/05/01 1968.

SLINEY, D. *et al.* Adjustment of guidelines for exposure of the eye to optical radiation from ocular instruments: statement from a task group of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). **Applied optics**, 44, n. 11, p. 2162-2176, 2005.

SNELL, R. S.; LEMP, M. A. **Clinical anatomy of the eye**. John Wiley & Sons, 2013. 1118691016.

TAO, D. *et al.* A systematic review of physiological measures of mental workload. **International journal of environmental research and public health**, 16, n. 15, p. 2716, 2019.

THOMAS, P. S. *et al.*, 2008, **Creating a reinforcement learning controller for functional electrical stimulation of a human arm**. NIH Public Access. 1.

VIDAURRE, C. *et al.* Enhancing sensorimotor BCI performance with assistive afferent activity: an online evaluation. **NeuroImage**, 199, p. 375-386, 2019.

WHITE, O.; FRENCH, R. M. Pupil diameter may reflect motor control and learning. **Journal of motor behavior**, 49, n. 2, p. 141-149, 2017.

WINSTEIN, C. J.; SCHMIDT, R. A. Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. **Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition**, 16, n. 4, p. 677, 1990.

WULF, G. Attentional focus and motor learning: a review of 15 years. **International Review of sport and Exercise psychology**, 6, n. 1, p. 77-104, 2013.

WULF, G. *et al.* External focus and autonomy support: Two important factors in motor learning have additive benefits. **Human movement science**, 40, p. 176-184, 2015.

WULF, G. *et al.* Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention. **Journal of motor behavior**, 30, n. 2, p. 169-179, 1998.

WULF, G. *et al.* The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. **The Quarterly Journal of Experimental Psychology**, 54, n. 4, p. 1143-1154, 2001.

APÊNDICE A

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Título da pesquisa: *BIOFEEDBACK* DO COMPORTAMENTO OCULOMOTOR NA APRENDIZAGEM MOTORA

INFORMAÇÕES SOBRE A PESQUISA

Pesquisador: Guilherme Menezes Lage

Gostaríamos de convidá-lo a participar de nosso estudo. O nosso objetivo é investigar como a manutenção de estados ótimos do comportamento oculomotor influencia a aprendizagem de uma habilidade motora.

Procedimentos: O presente estudo será conduzido em diferentes etapas que envolvem 2 dias de coleta. No primeiro dia, você será convidado a comparecer na sala de coletas onde o estudo será conduzido. Você deverá praticar a tacada curta do golfe fazendo uso de um rastreador ocular (Eye-tracker). Caso você esteja no grupo *biofeedback*, você deverá seguir as instruções fornecidas pelo experimentador para manter um diâmetro pupilar específico. O procedimento terá uma duração aproximada de 1 hora, independentemente no grupo em que você esteja. No dia seguinte, você deverá comparecer novamente ao laboratório para realizar uma nova prática da habilidade que deverá ter uma duração aproximada de 30 minutos.

Riscos e desconfortos: A sua participação no estudo não oferece graves riscos à sua saúde. A tarefa exige a manutenção de um óculos no rosto e a movimentação dos braços em postura ereta. Se sentir algum desconforto, seja devido ao uso do Eye-tracker ou pela execução da tarefa, você deve avisar ao pesquisador e pode abdicar de sua participação a qualquer momento. Você será encaminhado à enfermaria da faculdade caso necessário. Em caso de danos provenientes da pesquisa, você poderá buscar indenização conforme os termos da Resolução 466/12.

Benefícios esperados: Não há nenhum benefício direto para você. Porém, os resultados desse estudo ajudarão diferentes profissionais de áreas afins como professores de educação física, psicólogos, terapeutas ocupacionais e fisioterapeutas a entender melhor a contribuição do *biofeedback* do comportamento oculomotor sobre a aprendizagem motora.

Confidencialidade: Para garantir a confidencialidade da informação obtida, seu nome não será utilizado em qualquer publicação ou material relacionado ao estudo.

Recusa ou desistência da participação: Sua participação é inteiramente voluntária e você está livre para recusar participar ou desistir do estudo em qualquer momento sem que isso possa lhe acarretar qualquer prejuízo.

Protocolos de coleta de dados durante a pandemia de COVID-19: A execução deste experimento segue o Protocolo de Biossegurança, Adequação do espaço físico, Monitoramento e Controle de surtos e o Plano de retorno de atividades não adaptáveis ao modo remoto da UFMG. Todos os materiais utilizados na coleta de dados serão adequadamente higienizados, haverá álcool em gel disponível, os experimentadores e o voluntários farão uso de máscara durante toda a sessão do experimento, o distanciamento mínimo de dois metros será respeitado, o local de experimentação será adequadamente ventilado e apenas o experimentador, um auxiliar e o voluntário serão permitidos no ambiente de coleta. Além disso, a coleta será suspensa e as autoridades responsáveis serão avisadas em caso de suspeita ou confirmação de contaminação por COVID-19 por qualquer uma das partes diretamente envolvidas no experimento.

Você pode solicitar mais informações sobre o estudo com o pesquisador responsável pelo projeto (Guilherme Lage), por meio do telefone (031) 988840411 ou pelo email menezeslage@gmail.com. Em caso de discordância ou irregularidades sob o aspecto ético, você pode contactar o Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (COEP-UFMG) situado à Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Unidade Administrativa II – 2º andar – sala 2005 – CEP: 31270-901, Belo Horizonte/MG, pelo telefone (031) 3409-4592 ou pelo e-mail: coep@prpq.ufmg.br.

Após a leitura completa deste documento, caso concorde em participar do estudo, você deverá assinar o termo de consentimento abaixo e rubricar todas as folhas desse termo.

TERMO DE CONSENTIMENTO

Eu declaro que li e entendi todas as informações dispostas acima. Todas as minhas dúvidas foram satisfatoriamente respondidas e eu concordo em ser voluntário do estudo.

Assinatura do Voluntário

Data

Assinatura do Pesquisador

Data

**Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais
(COEP-UFMG)**

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Unidade Administrativa II – 2º andar – sala 2005 – CEP: 31270-901, Belo Horizonte/MG, telefone (031) 3409-4592, e-mail: coep@prpq.ufmg.br

APÊNDICE B

Os módulos com LED's foram afixados de forma centralizada em um nível abaixo dos olhos, com um ângulo que pode variar entre 25 - 40° (conforme as exigências ergonômicas do participante), e à 40 mm de distância dos olhos. A potência dos LEDs utilizados neste estudo são de 0.06 mW em uma corrente de 47 mA. Considerando os possíveis ângulos de abertura dos LED's e que os olhos dos sujeitos estarão à 40 mm de distância, a energia poderá estar distribuída sobre uma circunferência de raio ($R = \tan 7.5^\circ \cdot 100^\circ \cdot 40$) em uma área total de circunferência ($A = \pi R^2$) bastante variável (DE SOUZA, 2012) (Tabela 1). No pior cenário, tem-se então 0.07 mW/cm² (0.06 mW/0.87 cm²) para uma distância de 40 mm. Uma vez que a exposição em cada olho ocorre a partir de 6 LEDs, a potência total pode variar entre 0.00 – 0.42 mW/cm². Portanto, os valores de potência estão dentro dos limites de exposição estabelecidos pelo ICNIRP (PROTECTION, 1997; SLINEY *et al.*, 2005) que é de 10 mW/cm² para exposições superiores à 1000 s.

Tabela 1 – Valores estimados da exposição à luz infravermelha do Eye-tracker.

Abertura (°)	Raio (mm)	Circunferência (cm ²)	Potência (mW/cm ²)	Potência total (mW/cm ²)
15	5.266099903	0.871220449	0.070670977	0.42402586
20	7.053079228	1.562814376	0.039396873	0.23638124
25	8.867786506	2.470474243	0.02492234	0.149534042
30	10.7179677	3.608899269	0.017060604	0.102363622
35	12.61195156	4.997058808	0.012321248	0.073927487
40	14.55880937	6.658886183	0.009246291	0.055477747
45	16.56854249	8.624193351	0.007139218	0.04283531
50	18.65230633	10.92986886	0.005633187	0.033799125
55	20.82268202	13.62144581	0.004520078	0.027120469
60	23.09401077	16.75516082	0.003674689	0.022048132
65	25.48281043	20.40067418	0.003018038	0.018108225
70	28.00830153	24.64469338	0.002498307	0.01498984
75	30.69307952	29.59584893	0.002080359	0.012482156

Abertura (°)	Raio (mm)	Circunferência (cm²)	Potência (mW/cm²)	Potência total (mW/cm²)
80	33.56398525	35.39133262	0.001739691	0.010438149
85	36.65324696	42.20605677	0.001458795	0.008752772
90	40	50.26548246	0.001224896	0.007349377
95	43.65234004	59.86388968	0.0010285	0.006170999
100	47.6701437	71.3908898	0.000862435	0.00517461
150	149.2820323	700.1078551	8.79436E-05	0.000527662
200	-226.8512728	1616.710702	3.80835E-05	0.000228501