



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

João Filipe Pereira Lopes

## SISTEMA HÁPTICO DE TREINO DA ESCRITA

**Dissertação no âmbito do mestrado integrado em engenharia biomédica especialização em instrumentação biomédica, orientada pelo Professor Doutor António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra, João Paulo Morais Ferreira, Manuel Marques Crisóstomo e apresentada ao departamento de Física.**

Dezembro de 2020



Este trabalho foi desenvolvido em colaboração com:





Esta cópia da tese é fornecida na condição de que quem a consulta reconhece que os direitos de autor são pertença do autor da tese e que nenhuma citação ou informação obtida a partir dela pode ser publicada sem a referência apropriada.

This copy of the thesis has been supplied on condition that anyone who consults it is understood to recognize that its copyright rests with its author and that no quotation from the thesis and no information derived from it may be published without proper acknowledgement.



## **Agradecimentos**

Gostaria de começar por agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Coimbra, João Ferreira e Manuel Crisóstomo, pela valiosa orientação e incentivo durante o último ano.

Também estou grato pelos meus amigos e familiares, pelas suas palavras alegres e motivadoras. Estou especialmente grato pelos meus pais e irmão. Esta dissertação é apenas possível pelo seu apoio incondicional desde que iniciei o meu percurso escolar.





## Resumo

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema háptico de treino capaz de auxiliar no ensino e na reabilitação da escrita à mão, retirando assim a alguma da dependência do individuo pelo professor ou terapeuta.

O sistema é composto por um dispositivo háptico, uma plataforma de escrita, uma caneta feita através de impressão 3D e um computador comum para controlo do dispositivo e exibição das trajetórias. O sistema permite ao utilizador escolher entre três tipos de exercícios e dois modos de orientação: o modo guiado, que guia o utilizador pela trajetória ideal, ponto por ponto e o modo semi-guiado que apenas aplica forças corretivas se o individuo se desviar da trajetória de referência. Utilizando o modo guiado é possível alterar a dimensão e tempo de execução da trajetória, enquanto que utilizando o modo semi-guiado é apenas possível regular a dimensão da trajetória pois o tempo de execução é controlado pelo utilizador.

A posição do dispositivo é obtida através de sensores localizados nos eixos do dispositivo e depois armazenada em matrizes, enquanto que a trajetória de referência está armazenada num ficheiro de valores separados por virgulas, que será lido e as trajetórias copiadas para matrizes. O cálculo da força a enviar para o dispositivo háptico é efetuada com a utilização de um controlador proporcional com um ganho de 0,9. A trajetória de referência e a trajetória real são visualizadas através da interface gráfica que fornece feedback visual e permite a avaliação do progresso do utilizador.

De forma a testar a eficácia do sistema no ensino da escrita à mão foram realizadas duas sessões de treino. Cada sessão de treino é constituída por 3 ensaios de teste onde o individuo não estava sujeito, a feedback háptico, seguidos de 9 ensaios de treino nos quais o feedback háptico estava presente, terminando com 3 ensaios de testes também sem a utilização de feedback háptico.

Os resultados demonstraram que houve progresso, pois tanto a correspondência da forma como consistência da forma entre ensaios de teste melhoraram ao longo das sessões de treino, sendo possível concluir que os objetivos do presente trabalho foram atingidos.

Palavras Chave: Dispositivo háptico; Feedback háptico; Controlador proporcional; Orientação háptica; Escrita à mão.

---

## Abstract

*The main goal of this work is the development of a research system capable of assisting in teaching and in the rehabilitation of handwriting, thus removing some of the individual's dependence on the teacher or therapist..*

*The system consists of a haptic device, a writing platform, a pen developed through additive manufacturing, and a common computer for controlling the device and displaying the trajectories. The system allows the user to choose between three types of exercises and two orientation modes: the guided mode, which guides the user through the ideal path, point by point and the semi-guided mode that only applies corrective forces if the individual deviates from the path of reference. Using the guided mode it is possible to change the dimension and execution time of the trajectory, while using the semi-guided mode it is only possible to adjust the dimension of the trajectory because the execution time is controlled by the user.*

*The position of the device is obtained through sensors located on the axis of the device and then stored in matrices, while the reference path is stored in comma-separated values files, which will be read and the paths copied to matrices. The calculation of the force to be sent to the haptic device is performed using a proportional controller with a gain of 0.9. The reference trajectory and the actual trajectory are visualized through the graphical interface that provides visual feedback and allows the evaluation of the user's progress.*

*In order to test the effectiveness of the system in the teaching of handwriting, two training sessions were held. Each training session consists of 3 test trials where the individual was not subjected to haptic feedback, followed by 9 training tests in which the haptic feedback was present, ending with 3 test trials also without the use of haptic feedback. The results showed that there was progress, because both the correspondence of the form and consistency of the form between test trials improved throughout the training sessions, being possible to conclude that the objectives of the present study were achieved.*

*Keywords: Haptic device; Haptic feedback; Proportional control, Haptic guidance; Handwriting.*

---

## **Acrónimos**

AHF assistência háptica em força

AHP assistência háptica em posição

AVC acidente vascular cerebral

CR conhecimento de resultados

DH dispositivo háptico

PD proporcional



## Lista de Figuras

Figura 1 - Arquitetura do sistema.....	35
Figura 2 - Dispositivo háptico Touch da 3D Systems.....	35
Figura 3 - Representação dos graus de liberdade e botões do Touch.....	36
Figura 4 – Plataforma usada como plano de escrita.....	38
Figura 5 - Extensão de caneta impressa em 3D.....	39
Figura 6 - extensão de caneta acoplada ao dispositivo háptico.....	39
Figura 7 – Diagrama de caso de uso dos módulo de software do sistema desenvolvido.....	41
Figura 8 - Interface gráfica utilizada para controlo do sistema desenvolvido.....	42
Figura 9 - Diagrama de classes do Módulo de Software.....	44
Figura 10 - Fluxograma da função setHaptic_a().....	47
Figura 11 - Fluxograma de um programa típico HDAPI-adaptado de ( <i>Openhaptics - Toolkit Version 3.5.0</i> , 2018).....	55
Figura 12 – Fluxograma da inicialização do sistema.....	56
Figura 13 - Diagrama de estados do sistema.....	57
Figura 14 - Representação direta da trajetória de referência no plot.....	59
Figura 15 - Fluxograma da função atualizaGrafico().....	60
Figura 16 - Fluxograma da função checkClean().....	61
Figura 17 - Controlador Proporcional.....	63
Figura 18 - Callback do algoritmo do modo guiado.....	65
Figura 19 - Callback do algoritmo do modo semi-guiado.....	67
Figura 20 - Trajetórias de exercícios de formas geométricas desenvolvidas.....	68
Figura 21 -Trajetórias dos exercícios das letras.....	69
Figura 22 - Exemplo de assinatura registada.....	70
Figura 23 - Exercícios da letra "a" executados com ganhos proporcionais válidos.....	71
Figura 24 - Exercícios da letra "A" realizados com ganhos inválidos.....	72
Figura 25 – Trajetórias de 3 dos 9 ensaios de treino da primeira sessão, da letra "a".....	73
Figura 26 – trajetórias dos testes da primeira sessão de treino da letra "a".....	74
Figura 27 -trajetórias de 3 dos 9 ensaios de treino da primeira sessão da letra "o".....	74
Figura 28 - trajetórias dos testes da primeira sessão de treino da letra "o".....	75
Figura 29 – Trajetórias de 3 dos 9 ensaios de treino da segunda sessão, da letra "a".....	75
Figura 30 - Trajetórias dos testes da segunda sessão de treino da letra "a".....	76
Figura 31 - Trajetórias de 3 dos 9 ensaios de treino da segunda sessão, da letra "o".....	77
Figura 32 - trajetória dos testes da segunda sessão de treino da letra "o".....	77

Figura 33 - Algoritmo responsável por regular o tempo de execução dos exercícios.....	84
Figura 34 - Trajetórias dos 9 ensaios de treino da primeira sessão da letra "a". .....	86
Figura 35 - Trajetórias dos 9 ensaios de treino da primeira sessão da letra "o". .....	87
Figura 36 - Trajetórias dos 9 ensaios de treino da segunda sessão da letra "a". .....	88
Figura 37 - Trajetórias dos 9 ensaios de treino da segunda sessão da letra "o". .....	89





## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Habilidades em série, contínuas e discretas, adaptado de (Utley, 2008).....	6
Tabela 2 - Exemplos de habilidade motora e Cognitiva, adaptado de (Utley, 2008) .....	6
Tabela 3 - Classificação bidimensional de Gentile mostrando componentes de 16 categorias, adaptado de (Utley, 2008).....	9
Tabela 4 - Características do 3D Systems Touch (adaptado de <a href="https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/specifications">https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/specifications</a> ).....	36
Tabela 5 - Variáveis e funções de manipulação do sistema. ....	46
Tabela 6 - Callbacks implementadas .....	49
Tabela 7 - Objetos da classe HapticManager. ....	50
Tabela 8 - Funções que regulam a trajetória. ....	51
Tabela 9 - Funções utilizadas nas callbacks para cálculo de forças. ....	51
Tabela 11 - Objetos que armazenam trajetórias na classe MainWindow.....	53
Tabela 12 – Membros responsáveis pela Manutenção do <i>plot</i> .....	54



# **1. Introdução**

## **1.1. Motivação**

A escrita á mão é uma tarefa bastante complexa que requer muitas horas de treino para ser dominada. O seu ensino tradicional requer acompanhamento de um professor e devido ao elevado número de alunos por turma nas escolas portuguesas torna-se muito difícil garantir que os alunos recebem o acompanhamento necessário para desenvolverem uma boa caligrafia, rápida e de baixo custo, tanto a nível de atenção necessário como de recursos cognitivos utilizados, tudo características fundamentais para um bom desempenho escolar. Apesar da sua utilidade, o preço da tecnologia continua a ser um fator limitante na sua disseminação pelas escolas primarias, mas torna-se particularmente interessante como ferramenta de apoio à terapia ocupacional, pois possibilita a redução do seu custo ao permitir terapias de grupo.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo da presente dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema háptico de treino da escrita à mão que possa ser utilizado em trabalhos futuros para desenvolvimento de um sistema completamente autónomo que seja capaz de avaliar e quantificar a qualidade de escrita de maneira a fornecer o tipo de *feedback* háptico que traz mais benefícios para o aluno consoante a fase de aprendizagem em que este se encontra.

## **2. Enquadramento teórico**

### **2.1. Diferentes tipos de *feedback***

O controlo da escrita requer um tratamento eficiente da realimentação. Este é considerado como a informação sensorial que surge do movimento e que notifica o sistema nervoso central sobre o seu estado, e por isso, o incorreto processamento do mesmo pode limitar a aprendizagem (Danna & Velay, 2015).

Posto isto, é então agora essencial abordar os tipos de *feedback* mais importantes num sistema háptico.

#### **2.1.1 *Feedback* tátil**

Sensação aplicada na pele em resposta ao contacto. É captada por sensores localizados junto à pele e transmite informação em tempo real permitindo a perceção sobre a geometria das superfícies, rugosidade, temperatura e detalhes da textura. Não resiste ativamente ao movimento não sendo possível parar o utilizador de atravessar paredes virtuais (Burdea, 1996; Burdea & Coiffet, 2003).

#### **2.1.2 *Feedback* de Força**

O *feedback* de força é detetado por sensores localizados em zonas mais internas no corpo humano, normalmente nas ligações dos tendões musculares aos ossos e articulações. Estes sensores fornecem informação em tempo real sobre os objetos virtuais manipulados como o seu peso, a conformidade da superfície e inercia. Resiste ativamente ao movimento de contacto do individuo, sendo mesmo capaz de o parar (Burdea, 1996; Burdea & Coiffet, 2003).

#### **2.1.3 *Feedback* Háptico**

*Feedback* háptico agrupa o *feedback* de tátil e de força na mesma definição (Burdea & Coiffet, 2003).

#### 2.1.4 **Feedback Cinestésico**

*Feedback* que fornece informação sobre o movimento do corpo e é medido pelas terminações nervosas localizadas nos músculos, tendões e articulações que são estimuladas pelos movimentos corporais e tensões a que estão sujeitas (Merriam-Webster, 1983).

#### 2.1.5 **Feedback proprioceptivo**

Este *feedback* fornece informação acerca da postura corporal (posição dos diferentes membros) e é baseado na informações proveniente dos recetores localizados nas articulações esqueléticas, ouvido interno e em impulsos do sistema nervoso central (Burdea, 1996).

## 2.2. Terminologia da habilidade motora

Devido à amplitude e diversidade de habilidades motoras, é difícil defini-las de uma forma que se aplique de forma transversal a todos os casos.

Guthrie (1952) define habilidade (*skill*), como “a capacidade de atingir um resultado final com a máxima certeza e gasto mínimo de energia, ou de tempo e energia”, captando nesta definição as suas principais características.

Utley (2008) define habilidade como a capacidade de atingir um objetivo fiável e consistentemente através de uma sequência específica e organizada de movimentos voluntários sendo que para tal é necessário utilizar a nossa informação sensorial acerca da nossa posição em relação ao ambiente, da posição do nosso corpo em relação a outras partes do corpo e ao ambiente.

### 2.2.1 **Classificação das habilidades motoras**

As habilidades motoras são complexas de descrever e de avaliar, por isso foram propostos vários sistemas de classificação de maneira a as organizar de acordo com características específicas. Estes

sistemas de classificação foram criados com duas perspectivas em vista: a perspectiva da tarefa e a perspectiva da proficiência da performance (Utley, 2008).

#### 2.2.1.1 Classificação quanto à perspectiva da tarefa

Na classificação da habilidade motora a partir da perspectiva da tarefa em si, o objetivo é determinar características proeminentes das tarefas de maneira a que se possam distinguir umas das outras. (Schmidt & Wrisberg, 2000).

Deste modo são feitas quatro distinções de maneira a classificar as tarefas.

1. A maneira como a tarefa está organizada.
2. A importância dos elementos motores e cognitivos.
3. O nível de envolvimento de atividade muscular.
4. O nível de previsibilidade ambiental.

Algumas destas classificações são unidimensionais tendo em consideração apenas um dos fatores acima de maneira linear e contínua, enquanto que outras têm em conta mais que um dos fatores e têm em consideração como estes interagem (Gentile, 1987; Utley, 2008).

#### 2.2.1.2 Classificação quanto à organização da tarefa

A habilidade discreta é composta por um início e um fim bem definidos. Tem normalmente uma duração bastante curta, mas pode também ter uma duração bastante maior como no caso da escrita da assinatura (Schmidt *et al.*, 2018). São normalmente utilizadas em experiências de controlo motor, devido à facilidade de deteção do seu início e fim.

A habilidade contínua não apresenta um fim ou início específico, é normalmente de natureza rítmica ou repetitiva (Schmidt & Wrisberg, 2000). São normalmente habilidades de duração mais longa que as habilidades discretas (Schmidt *et al.*, 2018).

Existe ainda uma terceira classificação, a habilidade em série, que é caracterizada por várias habilidades discretas ligadas formando uma sequência (Schmidt & Wrisberg, 2000). Esta sequência forma então uma habilidade mais complexa, onde a sequência é normalmente fundamental para a *performance* da mesma. Por exemplo, no salto em comprimento existe a corrida de balanço, a chamada, a fase aérea/suspensão e a fase de receção/queda. Estas fases têm de ser executados numa ordem

específica para o salto ser executados corretamente (Utley, 2008). Na Tabela 1 estão representados exemplos de habilidades em série, contínuas e discretas.

**TABELA 1 - HABILIDADES EM SÉRIE, CONTÍNUAS E DISCRETAS, ADAPTADO DE (Utley, 2008)**

Habilidades Discretas	Habilidades em Série	Habilidades Contínuas
Início e fim distinto	Ações discretas interligadas	Sem início ou fim discreto
Atirar um dardo	Martelar um prego	Guiar um carro
Utilizar um interruptor de luz	Trabalho de linha de montagem	Nadar
Disparar uma espingarda	Rotina de ginástica	Tarefa de rastreamento

#### 2.2.1.3 Classificação quanto à importância relativa dos elementos cognitivos e motores

Na segunda classificação, as habilidades são organizadas num espectro em que numa ponta a maior condicionante para o sucesso é exclusivamente o movimento (habilidade motora) e na outra ponta a qualidade das decisões (habilidade cognitiva) acerca de que movimento efetuar, numa zona intermédia do espectro temos as habilidades que exigem uma combinação de ambos (Utley, 2008), como ilustrado na Tabela 2.

É importante notar que a mesma habilidade, poderá requerer um maior foco para a parte cognitiva ou motora dependendo do indivíduo que a desempenhar e da sua experiência. Por exemplo, ao aprender um desporto como o basquetebol, de início o foco é centrado em aspetos técnico e motores, com a experiência o indivíduo pode-se focar mais no aspeto tático (Utley, 2008).

**TABELA 2 - EXEMPLOS DE HABILIDADE MOTORA E COGNITIVA, ADAPTADO DE (Utley, 2008)**

Habilidade Motora	Habilidade Cognitiva	
Levantamento de pesos	Escalada	Jogar xadrez
Lançamento do peso	Jogar hóquei	Jogar poker

#### 2.2.1.4 Classificação quanto ao envolvimento da atividade muscular



As habilidades são também classificadas quanto ao nível de atividade muscular envolvida, tal como as outras esta é um classificação unidimensional em que as habilidades motoras grossas estão numa ponta e as habilidades motoras finas na outra (Utley, 2008).

As habilidades motoras grossas são aquelas que envolvem grupos de músculos grandes, como o levantamento de pesos. As habilidades motoras finas, são normalmente habilidades mais precisas que envolvem grupos de pequenos músculos, tal como a escrita ou manipular objetos pequenos (Utley, 2008).

É importante lembrar que tal como nas outras classificações unidimensionais, devido à complexidade dos movimentos é normalmente muito simplista considerar apenas estas duas hipóteses sendo que a maioria das habilidades é composta pelas duas, tal como a escrita à mão, à primeira vista diríamos que é puramente uma habilidade fina, mas para podermos escrever estamos normalmente sentados e para tal é necessário habilidades motoras grossas que nos permitam manter uma postura adequada na secretaria de maneira a podermos escrever (Utley, 2008).

#### 2.2.1.5 Classificação quanto ao nível de previsibilidade do ambiente

Uma quarta maneira de classificar as habilidades motoras é quanto à previsibilidade do ambiente. Tal como as anteriores, esta classificação é baseada num espectro contínuo em que numa ponta estão as habilidades abertas, nas quais o ambiente é variável e imprevisível durante a ação. Exemplo disto são a maioria dos desportos de equipa e a condução no trânsito, em que é bastante difícil prever as ações dos outros carros (Schmidt & Lee, 2014). Na outra ponta do espectro encontram-se as habilidades fechadas, nas quais o ambiente é estável e previsível, tal como na escrita à mão, ou no atletismo em que a distância a percorrer na pista é sempre a mesma por isso previsível e o ambiente relativamente estável. Contudo visto que as condições meteorológicas como a intensidade de vento podem alterar e também a performance dos outros atletas é de alguma maneira imprevisível, este pode ser classificado como um intermédio entre fechado e aberto (Utley, 2008).

#### 2.2.1.6 Classificação bidimensional

Nas classificações anteriores, habilidade foi definida através de uma abordagem unidimensional, abordagem esta que devido à complexa natureza do movimento é insuficiente para o descrever ou avaliar completamente (Utley, 2008).

Gentile (1987) desenvolveu um sistema de classificação bidimensional, combinando os requisitos da ação e as exigências ambientais, permitindo uma descrição mais precisa do movimento.

Esta classificação é chamada de taxonomia das habilidades de movimento e subdivide o movimento em 16 categorias, baseadas em 4 fatores da tarefa, com dois níveis cada, representados na Tabela 3.

Quanto aos requisitos da ação, Gentile (1987) começa por classificar se para realizar a ação o corpo da pessoa tem de estar estacionário ou em movimento, e se a pessoa terá de manipular um objeto ou não. Na segunda parte desta classificação são tidas em conta as exigências ambientais onde o movimento é realizado, ou seja, se as condições regulatórias impostas pelas exigências ambientais alteram ou se estas são estacionárias ao longo do ensaio e também entre diferentes ensaios (Utley, 2008).

**TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO BIDIMENSIONAL DE GENTILE MOSTRANDO COMPONENTES DE 16 CATEGORIAS, ADAPTADO DE (Utley, 2008)**

			Função da ação			
			Corpo estável		Corpo em movimento	
			Sem manipulação de objeto	Manipulação de objeto	Sem manipulação de objeto	Manipulação de objeto
Contexto Ambiental	Condição regulatória estável	Sem variabilidade entre tentativas	Assistir a um jogo de futebol	Escrever numa secretária	Andar ou correr	Jogar bowling
		Variabilidade entre ensaios	Utilizar linguagem gestual	Tiro com arco	Praticar diferentes passos de dança	Correr numa pista de obstáculos com uma bola na mão
	Condição regulatória em movimento	Sem variabilidade entre tentativas	Andar de elevador	Driblar uma bola de basquetebol sentado	Andar numa passadeira rolante num aeroporto	Driblar uma bola de futebol à volta de cones

		Variabilidade entre ensaios	Equilibrar numa perna enquanto usa patins	Apanhar bolas atiradas a velocidades diferentes	Atravessar uma estrada	Jogar basquetebol
--	--	-----------------------------	---	---	------------------------	-------------------

### 2.2.1.7 Classificação quanto à proficiência da performance

Nesta secção, voltamo-nos de novo para a definição de habilidade proposta por Guthrie (1952). segundo este, habilidade “consiste na capacidade de trazer algum resultado final com o máximo de certeza e gasto mínimo de energia, ou de tempo e energia”, nesta definição o autor realça três características (Guthrie, 1952).

Uma das características essenciais é a certeza com que o objetivo é realizado, por exemplo, no caso do jogo dos dardos, o facto de uma pessoa ter conseguido acertar uma vez no centro do alvo em dezenas de tentativas não indica que essa pessoa é boa jogadora, apenas se esta conseguir acertar no centro com uma elevada taxa de sucesso, sem a sorte ter uma influência significativa, pode ser chamada de habilidosa (Schmidt & Wrisberg, 2000).

A segunda característica essencial enfatizada por Guthrie (1952) é a minimização do gasto de energia necessário para atingir o objetivo. Em alguns casos tal não é necessário, como no exemplo anterior dos dardos, em que o objetivo é apenas a máxima precisão, mas noutros é obrigatório, como no caso da luta livre em que o lutador tem que gerir a energia gasta ao longo de todo o combate para esta não esgotar antes do final do mesmo (Schmidt & Wrisberg, 2000).

A terceira característica destacada por Guthrie (1952) é a minimização do tempo necessário para realizar a tarefa, uma característica muito importante em por exemplo alguns desportos, onde este é mesmo o objetivo principal. Contudo esta minimização de tempo poderá trazer problemas de proficiência, sendo necessário fazer contrabalançar estas três características. Exemplo disso é a datilografia, em que o objetivo é a minimização de tempo, mas é muito importante ter em conta a energia gasta de maneira a poder executar essa tarefa durante mais tempo, mas sobretudo ter em conta a produção de erros que é trazida com o aumento de velocidade, levando a que para emendar esses erros seja necessário um maior gasto de energia e tempo (Schmidt & Wrisberg, 2000).

## 2.3. Teorias de aquisição de habilidades motoras

### 2.3.1 Teorias da aprendizagem motora

Ao longo do tempo têm sido desenvolvidas teorias que tentam explicar o processo da aprendizagem motora. Esta é descrita como um conjunto de processos interrelacionados e associados entre si devido à experiência e prática (Magill, 2007), que levam a alterações relativamente permanentes na capacidade de produzir ação (McDonald *et al.*, 1989; Newell & Vaillancourt, 2001).

Em 1971, Adams criou a primeira teoria abrangente da aprendizagem motora, dizendo que apesar do sistema nervoso central (SNC) controlar a execução da ação, esta tem de ser baseada no *feedback* sensorial (Utley, 2008), mais tarde, Schmidt (1975) apresentou uma nova teoria que trouxe a noção de programa motor genérico. Este autor defendia que as ações estão organizadas e guardadas *a priori* na memória, na forma de programas motores genéricos, estes não continham instruções detalhadas de cada movimento, mas sim instruções detalhadas para uma classe de movimentos (Utley, 2008), estando organizadas de maneira a que um programa possa ser executados das mais diversas formas produzindo o mesmo resultado (Schmidt, 2003).

Os cientistas gradualmente deixaram de concordar com a antiga abordagem de um conjunto de programas motores organizados hierarquicamente e centralizados, com o surgimento de uma nova abordagem que alega que o movimento é uma propriedade emergente que ocorre com a interação entre o sistema neuromuscular e o ambiente (Muratori *et al.*, 2013; Thelen, 2014), em que o aprendiz procura no ambiente propriedades que lhe permitam aprender novas habilidades (Utley, 2008).

### 2.3.2 Teoria do circuito fechado de Adam

Adams (1971) criou uma teoria de circuito fechado com o objetivo de providenciar bases para o estudo da aprendizagem motora, utilizando como “quadro de referência a aprendizagem instrumental de movimentos simples, individualizados e graduais, como desenhar uma linha, embora as implicações se estendam.” (Adams, 1971). A sua teoria afirma que a aprendizagem está dependente do desenvolvimento de dois estados de memória: o primeiro é o traço da memória que é responsável por selecionar e iniciar a resposta, pode ser visto como circuito aberto pois atua sem *feedback* (Adams, 1971), e o segundo é o traço preceptivo que é o mecanismo responsável por avaliar a exatidão da resposta comparando-a com a referência do movimento guardado na memória e que foi escolhido pelo traço da memória. Foi a adição deste mecanismo de deteção e correção de erros que deu a esta teoria a designação de circuito fechado (Schmidt & White, 1972), sendo uma analogia com a necessidade do SNC de receber *feedback* propriocetivo frequentemente, bem como de *feedback* extrínseco na forma de conhecimento de resultados (CR) de maneira a poder comparar o movimento que está a ser produzido com o movimento desejado guardado na memória, com a informação sobre os erros desses mesmos

movimentos, informação sobre posição dos membros do corpo, bem como estímulos auditivos e visuais provocados pela ação (Adams, 1971), permitindo assim a correção do movimento enquanto está a ser produzido (Utley, 2008).

O traço preceptivo pode ser visto como a memória de movimentos anteriormente executados. Com a prática, à medida que o indivíduo vai recebendo *feedback*, o traço preceptivo vai sendo reforçado até que este consegue fornecer uma reflexão precisa do movimento (Utley, 2008), o que implica a existência de um relacionamento de um para um entre a ação e o programa gravado na memória (Schmidt, 2003). Para além disso prevê que após o traço preceptivo estar bem desenvolvido, seja até possível continuar a melhorar o desempenho quando retirado o CR, devido aos mecanismos de correção de erros desenvolvido (Adams, 1971; Schmidt & White, 1972).

### 2.3.3 Teoria do esquema de Schmidt

Schmidt (1975) tentou alargar a teoria de Adams (1971) a movimentos discretos, incluindo na sua teoria tanto movimentos lentos como movimentos rápidos ou até mesmo de natureza balística na sua teoria. Schmidt reconheceu que os movimentos de natureza balística não poderiam utilizar a informação sensorial para controlar a ação, como previa a teoria de Adams (Schmidt, 1975). Os movimentos teriam de estar organizados e representados *a priori* na memória (Schmidt, 2003; Utley, 2008). Portanto Schmidt propôs a noção de programa motor genérico, um programa motor que contém as regras gerais para a produção de uma classe de movimentos e não a representação completa de cada movimento como afirmava Adams, permitindo que um programa fosse executado, das mais variadas maneiras, por exemplo, correr, andar e saltar pertencem à mesma classe de movimentos (Utley, 2008).

O autor escolhe uma abordagem matemática e simplista, afirmando que optou pela forma de pensar matematicamente mais simples, argumentando que o programa poderia ser escalado linearmente no tempo (escalando um parâmetro de taxa) e em amplitude (escalando um parâmetro de força) (Schmidt, 2003). Com a criação deste novo conceito, Schmidt afirma que o indivíduo terá de aprender o programa motor genérico que define a “forma” generalizada da ação mas também o esquema que permite a adaptação da ação ao ambiente (Schmidt, 2003). Estas conclusões conseguiram acomodar dois dos maiores pontos fracos da teoria de Adams (1971), que são:

Problema da aprendizagem de movimentos novos, pois segundo a teoria de Adams (1971), a não ser que já tivéssemos adquirido o programa motor para um certo movimento, não o poderíamos realizar, e o problema de armazenamento pois Adams afirmava que havia um mapeamento para um dos movimentos na memória, o que levaria a quantidades de informação enormes (Schmidt, 2003).

Tal como Adams, Schmidt também divide a memória em dois estados, mas com uma grande diferença, Schmidt afirma que ao contrario da teoria de Adams que reconhecia a existência de dois traços (o preceptivo e o da memória), ambos pertencentes ao mesmo mecanismo, na sua teoria Schmidt propõe que os dois estados de memória sejam pertencentes a mecanismos distintos (Utley, 2008):

1) O esquema de evocação, é responsável pela escolha do conjunto de especificações da resposta que considera melhor para atingir o objetivo desejado (Utley, 2008).

2) O esquema de reconhecimento, responsável por avaliar e corrigir o movimento, comparando as consequências sensoriais esperadas, baseadas em consequências de experiências passadas, com as reais do movimento a decorrer (Utley, 2008).

Esta separação da memória permitiu que a teoria fosse capaz de incluir as ações cuja duração é curta de mais para usufruir do *feedback*, insinuando que estas eram controladas pelos programa motores genéricos e pelo esquema de evocação, enquanto que o esquema de reconhecimento apenas intervém após o movimento ter terminado, enquanto que as ações lentas são controladas por uma combinação do esquema de evocação e de reconhecimento, neste caso o esquema de reconhecimento tem um papel importante de correção dos erros dos processos a decorrer (Schmidt, 2003).

Contudo, sempre que qualquer movimento é executado, são disponibilizadas quatro informações e são elas que formam o esquema da evocação e o esquema de reconhecimento:

1) Condições iniciais: Informação recebida anterior à realização do movimento composta por informação propriocetiva sobre as posições dos membros do corpo no espaço, bem como informação visual e auditiva sobre o estado do ambiente (Utley, 2008).

2) Especificações da resposta: Informação sobre variações de certos parâmetros como a velocidade e força para satisfazer as necessidades do movimento, pois como se acredita que os programas motores estão guardados numa forma generalizada, é necessário o armazenamento posterior desses parâmetros como registo do mesmo (Utley, 2008).

3) Consequências sensoriais: Informação sensorial produzida pela resposta em si, que é registada após o movimento. É constituída pela informação recebida pelas diversas fontes de *feedback* sensorial, como os olhos, ouvidos e sensores propriocetivos, sendo uma cópia exata da informação aferente recebida como resultado da resposta (Utley, 2008).

4) Resultado : resultado da resposta em relação ao resultado pretendido, provém de fonte externa na forma de CR (quando existe) (Utley, 2008).

Após várias experiências similares entre si, o individuo começa a extrair informação sobre relações efetuadas entre estas quatro fontes de informação para formar os esquemas de evocação e reconhecimento, não sobre a informação em si. A força da relação entre os quatro elementos aumenta

cada movimento executado do mesmo tipo, e com o aumento da precisão do *feedback* recebido com o resultado da resposta (Utley, 2008).

#### **2.3.4 Teoria de constrangimentos de Newell**

Newell (1986) propôs uma teoria de sistemas dinâmicos, afirmando que o SNC tem um papel relativamente pequeno no controlo e aprendizagem e enfatiza a influência da informação especificada pelo ambiente e da interação dinâmica desta informação com a informação da tarefa em si, do corpo, membros e sistema nervoso (Magill & Anderson, 2016). Na sua teoria sugeriu que o processo de aprendizagem motora é baseado na procura através da prática, das soluções motoras ótimas, que satisfazem as exigências do ambiente, da tarefa e das próprias capacidades do individuo (Utley, 2008). Newell denominou e classificou estas “exigências” de: constrangimento do ambiente, do organismo e da tarefa.

Neste contexto, constrangimentos do ambiente podem ser de natureza física como o vento, altitude, luz ambiente e temperatura, ou podem ser de natureza sociocultural, como o ambiente de treino, expectativas sociais e família (Mendes *et al.*, 2020). Constrangimentos do organismo referem-se às características de cada individuo que podem influenciar o seu desempenho. Estas tanto podem ser estruturais, normalmente de natureza física e relativamente estáveis ao longo do tempo, como estrutura corporal, distribuição do tipo fibras musculares, como funcionais, que são normalmente mais variáveis, como emoções, tomada de decisão e percepção (Mendes *et al.*, 2020). Por ultimo, constrangimentos da tarefa são os componentes específicos da tarefa que regulam a ação, são categorizados em três categorias: objetivos, condições específicas de uma tarefa regulamentar e no caso de um desporto o seu quadro regulamentar, e engenhos e utensílios utilizados no desempenho de uma ação (Mendes *et al.*, 2020).

#### **2.4. Etapas de aprendizagem de habilidades**

Durante a aprendizagem de uma nova habilidade motora, o aprendiz passa por uma série de fases. A identificação dessas fases é um aspeto bastante importante no ensino e reabilitação, nesse sentido têm sido criados vários modelos na tentativa de identificar e descrever estas diferentes fases (Utley, 2008).



### 2.4.1 Modelo das três fases de Fitts e Posner

Fitts e Posner (1967) propuseram um modelo para a aprendizagem de uma habilidade motora composto por três fases organizadas hierarquicamente. Na primeira fase, a fase cognitiva, o aprendiz está focado em problemas cognitivos relacionados com “o que fazer” e “como fazer” (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008), descobre os objetivos da tarefa e identifica estímulos e respostas que são importantes (Cadima & Barreiros, 1997). É nesta fase que as demonstrações e instruções são mais eficazes e é uma fase assinalada pela elevada quantidade de erros com uma grande variabilidade e pouca consistência, mas também por uma rápida evolução (Utley, 2008).

Na segunda fase, é denominada de fase associativa, pois o indivíduo tenta agora associar certas pistas ambientais específicas com os movimentos necessários para alcançar o objetivo da habilidade em si (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008). Através da comparação entre estímulos e respostas relevantes, é possível a correção de erros que o indivíduo vai identificando, como sequências erradas e captação de fontes de informação irrelevantes (Cadima & Barreiros, 1997). A duração desta fase depende da complexidade da habilidade a aprender (Fitts & Posner, 1967; Utley, 2008) e é demarcada por uma diminuição da quantidade e gravidade dos erros, pois o indivíduo já adquiriu os fundamentos básicos da habilidade a aprender, bem como a capacidade de detetar e identificar alguns dos seus próprios erros (Magill & Anderson, 2016).

Na fase autónoma, a última fase deste modelo, os indivíduos são capazes de realizar as habilidades automaticamente, sem pensar conscientemente nos movimentos que estão a realizar (Magill & Anderson, 2016). Para além disso, nesta fase deverão ser capazes de detetar os seus próprios erros e realizar ajustes para correção dos mesmos, apesar de estar inconsciente de grande parte dos detalhes dos movimentos que são realizados inconscientemente pois estes são agora controlados automaticamente (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008).

### 2.4.2 Teoria dos estágios da aprendizagem motora de Bernstein

Bernstein na sua teoria retira algum peso ao programa motor genérico e à sua organização no SNC. O autor afirma que a complexidade na aprendizagem de uma habilidade nova reside no desenvolvimento de padrões de coordenação do movimento que permitam dominar o elevado número de graus de liberdade do corpo humano compostos por todos músculos, articulações, tendões e ligamentos disponíveis (Newell & Vaillancourt, 2001; Utley, 2008), apontando para o facto de que o controlo individual de cada um destes componentes seria impossível, por isso é necessário o “congelamento” de alguns graus de liberdade para a diminuir a complexidade do movimento (Dias *et al.*, 2017). O desenvolvimento da aprendizagem é então composto por três fases: a fase inicial, a fase avançada e a fase experiente.

Na fase inicial, o indivíduo apresenta vários erros e inconsistências no movimento, pois não é capaz de controlar os diversos graus de liberdade que o movimento incorpora (Dias *et al.*, 2017). Uma estratégia normalmente empregue pelos indivíduos nesta fase é a de “congelar” alguns graus de liberdade, imobilizando algumas articulações, ou acoplando-as, de maneira a mantê-las juntas e em sincronia, de maneira a simplificar o movimento a aprender (Magill & Anderson, 2016).

Na fase seguinte, a fase avançada, à medida que existe o desbloqueio progressivo dos graus de liberdade e dos acoplamentos, as relações entre os membros vão-se tornando mais independentes, o indivíduo passa a poder explorar o espaço de trabalho (Utley, 2008) e com a prática é verificada uma maior economia de movimento e diminuição da fadiga (Magill & Anderson, 2016), mas permanece um desafio encontrar o padrão de movimentos ótimo (Utley, 2008).

Na última fase, a fase experiente, o indivíduo apresenta uma elevada coordenação dos membros do corpo e controlo sobre os inúmeros graus de liberdade, explorando várias interações entre eles e diferentes resultados de maneira a otimizar o movimento (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008).

### **2.4.3 Teoria das duas fases de Gentile**

O último modelo das etapas de aprendizagem a ser abordado nesta dissertação é o modelo das duas fases de Gentile.

Neste modelo, Gentile (1987) aborda a aprendizagem de uma habilidade motora, do ponto de vista do objetivo da tarefa, e divide-a em duas fases, tendo em consideração como a natureza do ambiente, no qual a tarefa é realizada, influencia a natureza da informação que o aprendiz deve adquirir (Utley, 2008).

Na fase inicial, o indivíduo tem dois objetivos a cumprir. O primeiro objetivo é adquirir um padrão do movimento que o indivíduo considere apropriado e que cumpra as exigências da tarefa, permitindo a este obter algum grau de sucesso na realização da tarefa (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008). Por outras palavras, o indivíduo deverá desenvolver características nos seus movimentos que correspondam às condições impostas pelo contexto ambiental na qual a habilidade é desempenhada e que de alguma forma influenciam o desempenho (Magill & Anderson, 2016). Para além disso, o indivíduo deverá ser capaz de distinguir as características ambientais que influenciam a forma como a habilidade irá ser desempenhada, apelidadas de condições regulatórias, daquelas que não a influenciam, e que são apelidadas de condições não regulatórias (Utley, 2008). Gentile afirma que esta é uma fase de intensa atividade cognitiva, na qual é exercida uma elevada quantidade de resolução de problemas pois para que o padrão de coordenação inicial do movimento ser formado e o indivíduo seja capaz de

distinguir as condições regulatórias das não regulatórias, o indivíduo tem de explorar uma ampla variedade de movimentos possíveis através de tentativa e erro (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008).

A segunda fase deste modelo é descrita como a fase da fixação e diversificação, nesta fase o indivíduo necessita de adquirir três características gerais. Em primeiro lugar, o aprendiz deverá desenvolver a capacidade de adaptação do padrão de movimento às exigências específicas de cada situação. Em segundo lugar, o indivíduo deve aumentar a sua consistência com a qual atinge o objetivo da habilidade. Por último, o indivíduo deverá aprender a desempenhar a habilidade em economia de esforço (Magill & Anderson, 2016; Utley, 2008).

A teoria das duas fases de Gentile tem uma característica importante e distinta, que é o facto de o objetivo do movimento do indivíduo variar consoante o tipo de habilidade a aprender, mais propriamente se a habilidade é fechada ou aberta (Utley, 2008).

No caso de uma habilidade fechada, ou seja, uma habilidade que é desempenhada num ambiente estável e previsível, no qual o indivíduo determina quando iniciar ou terminar a ação, é necessário a fixação do padrão de movimento adquirido durante a primeira fase deste modelo (Utley, 2008).

Isto significa que o indivíduo deverá melhorar este padrão de maneira a que consiga atingir consistentemente o objetivo da ação empregando o mínimo esforço consciente e o mínimo de energia física empregue (Magill & Anderson, 2016).

No caso das habilidades abertas, é necessário diversificação do padrão básico do movimento, de maneira a permitir ao indivíduo a adaptação rápida às condições regulatórias temporais e espaciais da habilidade que estão em constante alteração (Utley, 2008).

## **2.5. Escrita à mão e sua aprendizagem**

A escrita à mão é uma tarefa complexa que requer habilidade perceptiva, cognitiva e linguística, requerendo a integração de informação visual, proprioceptiva e tátil para poder ser realizada (Fogassi & Gallese, 2004). A aquisição de competências de caligrafia envolve uma componente perceptual (aprender a forma da letra) e uma componente grafo motora (aprender a trajetória que produz a forma da letra) (van Galen, 1991), sendo necessário “encontrar” a forma da letra guardada na memória, aceder ao programa motor, configurar os parâmetros para o programa e executá-lo (Viviani, 1994).

A percepção da forma das letras é crucial para a legibilidade da escrita, pois a qualidade das mesmas depende das referências do sistema motor guardadas na memória. Está provado que as modalidades sensoriais envolvidas na caligrafia como a visão e propriocepção estão tão intimamente ligadas que foram reveladas fortes ligações neuronais entre a percepção, leitura e escrita em diferentes

linguagens e sistemas de símbolos (James & Gauthier, 2006; Kato *et al.*, 1999; Longcamp *et al.*, 2003; Longcamp, Anton, *et al.*, 2005; Matsuo *et al.*, 2003; Vinter & Chartrel, 2008).

Com a prática aprendemos a construir uma relação unificada e coerente dos objetos. Quanto mais informação de entrada, mais fortes as ligações neurais adjacentes. Uma vez estruturada a rede neuronal subjacente a uma determinada representação, qualquer informação apresentada que tenha estado presente na sua produção é suficiente para reativar toda a rede (Longcamp, Zerbato-Poudou, *et al.*, 2005; Pulvermüller, 1999).

A representação visual de imagens às quais uma ação específica pode ser atribuída, ativa uma área cortical pré-motora mesmo quando não é necessário uma resposta real (Chao & Martin, 2000).

Sirigu, Duhamel e Poncet (1991) sugerem que o conhecimento sensorial das propriedades funcionais de objetos faz parte da sua representação e pode ser utilizado para o reconhecimento ou identificação (objetos). O que significa que a interação motor-percetual envolve a associação de um objeto, fortalecendo assim a rede neuronal (Sirigu *et al.*, 1991). Apesar dos caracteres alfabéticos não serem objetos físicos, pensa-se que as ligações perceptivas e motoras contribuam para a sua representação, pois estão associados a movimentos de escrita altamente específicos. O facto da incapacidade de escrever letras poder ser associada a défices de leitura é devido à incapacidade de identificar as letras visualmente, e é consistente com a forte ligação entre a perceção visual e a perceção sensoriomotora das formas das mesmas (Anderson *et al.*, 1990).

As capacidades de leitura deficientes podem ser melhoradas através da realização de movimentos de escrita. Um exemplo é o caso de pacientes que não eram capazes de reconhecer letras visualmente, mas após traçar o seu contorno com o dedo foram capazes de as identificar, (Bartolomeo *et al.*, 2002; Seki *et al.*, 1995). O que leva concluir que os movimentos de escrita poderão ativar a representação visual das letras.

Como que se a ordem da escrita dos traços que compõem os ideogramas fossem utilizados como pistas para os recuperar da memória (Flores d'Arcais, 1994), sugerindo que o esquema motor específico de cada ideograma possa ser um componente essencial da sua representação.

Matsuo *et al.* (2003) demonstrou que indivíduos Japoneses apresentavam uma ativação motora quando visualizavam ideogramas. De maneira semelhante Longcamp *et al.* (2003), mostrou que a apresentação visual de caracteres romanos ativa uma área pré-motora no hemisfério esquerdo em sujeitos destros, mesmo quando não era requerida uma resposta motora. A ativação da área correspondente, mas no hemisfério oposto no caso dos indivíduos canhotos confirma que esta ativação visualmente induzida depende de qual a mão dominante.

Ao escrevermos à mão experimentamos uma relação direta e inequívoca entre o ato da inscrição e a correlação fenomenológica da caneta enquanto se move no papel (Mangen, 2009). Nas palavras de

um neurocientista, os comandos motores e o *feedback* cinestésico estão intimamente ligados à informação visual tanto espacialmente como temporalmente, o que não se verifica com a escrita à máquina, sendo que na escrita à mão, o indivíduo tem de se recordar da forma da letra, e da cadeia de movimentos necessários para a executar (Mangen & Velay, 2010). O neuropsicólogo Alexander R. Luria chama a esta sequência altamente precisa de movimentos dos músculos dos dedos necessários para formar as letras de “Melodia Cinética”.

Numa fase inicial, a escrita depende da memorização da estrutura gráfica das letras de maneira a construir a representação visual e motora de cada uma, que é composta por uma série de impulsos sequenciais encadeados, cada um responsável por apenas um elemento da estrutura gráfica da letra. Com a prática a estrutura deste processo é radicalmente alterada, e a escrita é convertida numa “melodia cinética única” (Luria, 1973). Por outras palavras, o processo da escrita é inicialmente guiado pelo *feedback* visual e cinestésico (Chartrel & Vinter, 2006; Sovik, 1974) e com a prática passa a ser maioritariamente pró-ativo, ou seja, baseado na representação interna do ato motor (Bara & Gentaz, 2011). Esta alteração é facilmente verificada no caso da assinatura, um processo que se torna altamente automatizado, e a participação das áreas visuais e auditórias do córtex, que são essenciais na fase inicial, deixam completamente de ser utilizadas (Luria, 1973).

No livro “Physical Eloquence and the Biology of Writing” o autor Robert Ochsner estende a teoria de Luria, de maneira a incluir duas funções neurofisiológicas adicionais, as melodias visuais e melodias auditiva. Estas correspondem respetivamente ao papel dos olhos e ouvidos no processo da escrita à mão. A melodia visual determina a quantidade de texto que olhos assimilam como *feedback*, e a melodia auditiva regula a voz interior do escritor, combinada com a linguagem do texto escrito (Mangen & Velay, 2010).

Num estudo francês, que pode ser utilizado como referência para as escolas portuguesas devido à semelhança entre as línguas, as crianças mais jovens não utilizam espontaneamente o sentido correto de rotação anti-horário para a produção de letras cursivas, provavelmente porque este movimento impõe elevadas restrições motoras. Sendo que apenas a partir dos 3-4 anos é esperado que as crianças sejam capazes de produzir círculos em ambas as direções de rotação com cada mão (Lurçat, 1974).

À medida que a aquisição da escrita progride, surgem tanto diferenças quantitativas (velocidade e tamanho), como qualitativas. Tal não se deve apenas ao treino, mas sim também ao desenvolvimento e maturação do sistema motor, que permite à criança executar movimentos motores finos. A evolução da escrita com a idade abrange tanto aspetos estáticos (forma, tamanho e orientação espacial das letras), como dinâmicos (velocidade, tempo total de escrita) que se devem principalmente à alteração predominância de uma forma de controlo em detrimento da outra (Jolly *et al.*, 2013).

Entre os 7 e os 10 anos de idade é observada uma progressão global tanto dos índices estáticos como dinâmicos, havendo em particular uma diminuição progressiva no tamanho da letra, no tempo total de escrita e do número e duração das pausas durante a escrita (Jolly *et al.*, 2013).

Nestas idades o *feedback* visual tem uma grande importância na aprendizagem da escrita, pois é nestas idades que a ausência deste *feedback* tem consequências mais graves. Na ausência do *feedback* visual durante a escrita, existe um aumento na duração do movimento e da disfluência (número de picos de aceleração e desaceleração) (Chartrel & Vinter, 2006). É então entre os 8 e 9 anos que se regista as maiores diferenças entre as condicionantes “com” e “sem *feedback*”. Na ausência de *feedback* visual, as crianças tendem a aumentar o tamanho da letra de maneira a maximizar a informação cinestésica, de maneira a compensar inconscientemente a falta do *feedback* visual, estes *feedbacks* contribuem depois para a construção de representações internas dos movimentos. Em paralelo é verificado um forte aumento na velocidade de produção da escrita. A partir dos 10 anos de idade, as alterações começam a ser menores e refletem na sua maioria um aumento da automação do movimento e na fluência da escrita (Jolly *et al.*, 2013).

Nos adultos, a escrita à mão é uma tarefa de baixo custo em termos da atenção necessária e recursos cognitivos utilizados, devido ao facto de todos os processos envolvidos na escrita à mão estarem bastante automatizados (Jolly *et al.*, 2013). Os recursos da memória de trabalho, são limitados (Gavens & Camos, 2006), sendo necessária a automatização da escrita de maneira a libertar recursos para poderem ser utilizados em aspetos linguísticos da escrita. Além disso, a escrita cursiva é uma atividade bastante complexa que envolve habilidades percepto-motoras, cognitivas e linguísticas requerendo vários anos de prática para ser completamente dominada (Blöte & Hamstra-Bletz, 1991; Chartrel & Vinter, 2006; Viviani, 1994).

Vários estudos apontam que o custo cognitivo do processo grafo-motor e as interferências que este induz na construção e produção de textos. Por exemplo, é mais fácil para as crianças recordarem informações e produzirem frases oralmente do que enquanto escrevem (Bourdin, 2000). Da mesma forma, a qualidade do texto é maior quando as crianças ditam a sua produção a outra pessoa do que quando são eles mesmos a escrever (Graham, 1990).

Como mencionado anteriormente nesta dissertação, a percepção com precisão da forma das letras é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento de uma escrita legível, pois o escritor apenas poderá escrever a letra se as referências na sua memória estiverem bem definidas (Bara & Gentaz, 2011).

Com o objetivo de destacar o papel das habilidades perceptivas na aquisição da escrita cursiva, foram realizados estudos de maneira a comparar diferentes intervenções pedagógicas.

Karlsdottir(1996) propôs dois programas de aprendizagem para crianças do quarto ano. Um deles envolvia exercícios de copiar, enquanto que o outro consistia em explicar visualmente e

verbalmente a forma da letra. A qualidade da escrita melhorou em relação a um grupo de controlo para o grupo cujos exercícios consistiam em explicar a forma das letras (Karlsdotti, 1996).

Wright and Wright(1980) relataram que copiar letras quando um modelo dinâmico da letra é apresentado também melhorou a precisão da escrita (Wright & Wright, 1980).

Berninger *et al.* (1997) selecionou crianças da primeira classe que apresentavam dificuldades em aprender a escrever. As cinco pedagogias utilizadas foram as seguintes:

a- A criança escreve a letra após visualizar o professor a escrever a mesma.

b- A criança escreve a letra após ver uma cópia com setas que indicam a ordem e direção de cada traço.

c- A criança escreve a letra recorrendo à sua memória depois de a visualizar por algum tempo.

d- A criança escreve a letra recorrendo à sua memória, mas desta vez a cópia que a criança visualizou contém também setas com indicação da ordem e direção de cada traço.

e- A criança escreve a letra enquanto visualizam uma cópia sem indicação da ordem ou direção.

O grupo de controlo recebeu instruções de sensibilização fonológicas que incluíam identificar, segmentar e substituir sílabas e sons em palavras. Os resultados mostraram que todos os métodos de ensino induziram melhorias superiores ao grupo de controlo, sendo que o grupo que demonstrou melhor performance no treino foi o grupo D. (Berninger *et al.*, 1997)

Jongmans *et al.* (2003) investigaram o efeito da autoinstrução em tarefas específicas para a melhoria da velocidade da escrita e da sua qualidade em crianças com uma deficiente qualidade de escrita e que frequentam tanto escolas normais como de educação especial (Jongmans *et al.*, 2003). Esta tarefa consistia em escrever a mesma letra várias vezes, indicando qual das tentativas foi a melhor. Os resultados mostraram que as crianças que recebiam este método de autoinstrução melhoraram a legibilidade da sua caligrafia em comparação com as crianças que não receberam este tipo de instrução, demonstrando que a capacidade de as crianças perceberem com precisão a forma da letra determina a qualidade da caligrafia. Estes resultados são consistentes com modelos de aprendizagem de processamento de informação (Sternberg, 1969), nos quais o processo de aprendizagem inicia com a percepção e armazenamento da forma das letras na memória.

Desta forma, é possível que as maiores barreiras á legibilidade da escrita para quem está a aprender escrita à mão tenham origem na aprendizagem perceptual (relativo à compreensão imediata feita através dos sentidos) e não na aquisição das habilidades motores (Bara & Gentaz, 2011).

## 2.6. Importância da aprendizagem da escrita à mão

De um modo geral, o processo de produção de texto, num ambiente de escrita à mão em comparação com um ambiente digital é radicalmente diferente sensomotoricamente, bem como cognitivamente e fenomenologicamente (Mangen & Velay, 2010), porque o escritor para produzir a forma da letra tem de percorrer a trajetória da letra com a mão, de maneira a assemelhar-se o mais possível com sua forma padrão. No caso da digitação, tal não acontece, não existe esta componente grafo motora, o escritor apenas tem de localizar a letra específica no teclado (Luttels, 2015; Mangen & Velay, 2010).

Esta alteração no modo de escrita pode ter implicações educativas consideráveis. De maneira a perceber o porquê e em que medida o processo, a habilidade e arte da escrita estão a ser alterados pela digitação, é necessário reconceptualizar o nosso conhecimento sobre a escrita e incorporar modalidades sensoriais como a háptica, que normalmente não são abrangidas pela investigação educativa sobre a escrita (Mangen & Velay, 2010). Atualmente estamos a presenciar uma significativa alteração na maneira como escrevemos e provavelmente ainda mais importante, como é que as crianças nesta era digital aprendem a escrever (e poderão vir a aprender a escrever num futuro próximo), sendo importante um escrutínio científico sobre a háptica da escrita (Mangen & Velay, 2010).

LongCamp et. al. (2005) conduziram um estudo sobre o papel do movimento na representação das letras e sugeriu que a caligrafia tem um maior contributo para o reconhecimento visual das letras que a digitação, concluindo que a alteração no ensino da escrita para um método baseado na digitação teria grande influência na sua habilidade de reconhecer as letras (Luttels, 2015).

O neurologista Frank Wilson, no seu livro, *The Hand*, afirma vigorosamente que “qualquer teoria da inteligência humana que ignore a interdependência da função da mão e do cérebro, a relação histórica desta relação ou o impacto dessa história no desenvolvimento nas dinâmicas de desenvolvimento nos humanos modernos é grosseiramente enganadora e estéril.” (Wilson, 1998).

Em crianças, temos a tendência geral de aprender tanto, ou até mais, sobre o ambiente que nos rodeia utilizando o toque do que a vista, olfato ou audição (Mangen & Velay, 2010).

Investigação em psicologia experimental, evolutiva e antropologia cognitiva demonstrou que a exploração háptica de objetos tem um papel fundamental na aprendizagem humana e desenvolvimento cognitivo (Bara *et al.*, 2007; Greenfield, 1991; Hatwell *et al.*, 2003; Klatzky *et al.*, 1993, 2005; Wilson, 1998). No entanto, não estamos habituados a pensar que nas mãos como órgãos sensoriais com um papel tão fundamental para o processamento cognitivo, pois no nosso quotidiano, estas são utilizadas para executar tarefas e não explorar, dando maior valor às suas capacidades motoras (Mangen & Velay, 2010).



Após discutir a importância da escrita cursiva em relação à digitação e da importância da memória no que toca à caligrafia, vamos agora discutir se essas diferenças têm impacto nas escolas.

Em média, dez a trinta por cento das crianças demonstra dificuldades com a escrita cursiva (Feder & Majnemer, 2007), o que normalmente induz um aumento da dificuldade dos trabalhos de casa e uma influência negativa na sua postura perante a escrita em geral, levando à obtenção de piores resultados na escola que os seus colegas que a dominam. Para além de cometerem mais erros na composição e/ou ortografia durante a infância, estes erros são indicadores da sua capacidade académica posterior tanto na escrita como na leitura (Feder & Majnemer, 2007). Este desempenho inferior pode também ser um indicador de QI verbal inferior, baixas competências matemáticas e dificuldade de atenção superior quando comparando com os colegas (Hopman, 2014).

Embora as dificuldades de aprendizagem sejam frequentemente assumidas como a causa subjacente da má caligrafia e de outras tarefas, são os problemas com a escrita à mão que causam parte desses problemas (Hopman, 2014).

As crianças que têm dificuldades com a escrita à mão terão mais dificuldade em acompanhar o trabalho escrito que lhes é exigido, e como consequência terão um mau desempenho noutras áreas. Além disso, os trabalhos que são escritos em letra legível serão melhor cotados que trabalhos com letra ilegível, independentemente do seu conteúdo (Hopman, 2014).

Numa investigação feita por Grissmer *et al.* (2010) foi constatado que existe uma ligação significativa entre as habilidades motoras finas de crianças em jardins-de-infância e o seu sucesso académico, particularmente em atividades como utilizar um utensílio de escrever ou copiar uma imagem com várias formas mostraram ser os melhores indicadores do sucesso no ensino escolar médio.

Em suma, os alunos que escrevem fluentemente são capazes de compreender melhor os textos, assim como apresentar uma maior qualidade de escrita, escrevendo frases mais longas e extensas. A automatização da escrita à mão permite ao aluno despender menos tempo na forma de escrever, e concentrar os seus esforços no conteúdo da sua obra (Hopman, 2014).

Juntamente com as vantagens no que diz respeito à composição de texto, a tomada de notas à mão ao estudar revela-se também benéfica, uma vez que estimula a retenção de informação. Os alunos que apresentam melhor caligrafia do que os seus pares têm normalmente também um melhor desempenho académico, porque a escrita à mão também estimula uma melhor prestação noutras disciplinas. Do mesmo modo, aqueles que apresentam dificuldades com a escrita à mão também revelam dificuldade com os seus trabalhos de casa, levando a um desempenho pior e a uma menor autoestima (Hopman, 2014).

A prática da escrita cursiva, poderá, portanto, ser benéfica para a obtenção de melhores resultados académicos.

## **3. Estado da Arte**

### **3.1. *Feedback* háptico aumentado na aprendizagem da escrita à mão**

No contexto da aprendizagem e controlo motor, o *feedback* aumentado refere-se a qualquer informação adicional de fonte externa que é fornecida a uma pessoa sobre o seu desempenho, enriquecendo a sua informação sensorial (Magill & Anderson, 2016).

De maneira a induzir os movimentos desejados, tradicionalmente o *feedback* aumentado é apresentado visualmente e/ou com estímulos auditivos, que são depois traduzidos a partir dos sistemas sensoriais para o sistema propriocetivo (Lee & Choi, 2010). Em contraste, no treino háptico é removida a necessidade de transformações sensoriais complexas, pois ocorre em coordenadas centradas no corpo, ao contrário do treino visual que ocorre em coordenadas visuoespaciais. Este facto poderá ser especialmente útil ao aprender tarefas motoras de cinemática complexa (Feygin *et al.*, 2002), para além disso, a informação háptica pode também beneficiar a aprendizagem quando combinada com outras modalidades sensoriais, pois teorias atuais de integração sensorial sugerem que receber informação através de múltiplas vias sensoriais pode produzir melhor performance que receber através de uma única (Feygin *et al.*, 2002).

É possível dividir as estratégias de *feedback* háptico de dois grupos, assistência e a resistência.

### **3.2. Assistência háptica em sistemas de treino de escrita à mão.**

A assistência háptica é a estratégia de *feedback* háptico, na qual o treinador, humano ou máquina, fornece assistência háptica de maneira a facilitar a execução da tarefa motora (Lee & Choi,

2014) e a minimizar diretamente os erros do desempenho, corrigindo-os fisicamente ou limitando-os e/ou indiretamente ao reduzir a dificuldade do movimento ou destacando o movimento correto.

Desta forma espera-se que reduza o desconhecimento do aluno com o movimento a aprender, aumentando a segurança e diminuindo o medo de falhar durante o desempenho do mesmo (Wulf *et al.*, 1998). Em contrapartida, promove uma aprendizagem passiva que normalmente não se mostra tão eficaz como uma aprendizagem ativa em que são executados erros e existe a necessidade de criar estratégias para realizar a tarefa (Schmidt & Wrisberg, 2000), o que pode levar a que o indivíduo se torne dependente do *feedback* aumentado e ignore o processamento do *feedback* intrínseco que contribuiria para a aprendizagem e para o desenvolvimento de mecanismos de detecção de erros (Williams *et al.*, 2016). Este fenómeno é normalmente apelidado de “*guidance hypotesis*” (Schmidt, 1991).

Vários estudos (Lee & Choi, 2014; Liu *et al.*, 2006; Reinkensmeyer & Patton, 2009) suportam a “*guidance hypothesis*” apontando para uma conclusão em comum: o desempenho melhora durante o treino mas degrada-se rapidamente depois do treino, quando a orientação háptica não está presente, atingindo possivelmente níveis mais baixos que aqueles atingidos sem orientação (Lee & Choi, 2014), na tentativa de diminuir este efeito foi criada a orientação progressiva, na qual a intensidade de orientação é diminuída com o decurso do treino de maneira a diminuir a dependência sobre o *feedback* aumentado (Bayart *et al.*, 2005; Huegel & O’Malley, 2009; Lee & Choi, 2014; Lee & Choi, 2010; Li *et al.*, 2009).

### **3.3. Resistência háptica na aprendizagem da escrita à mão.**

A resistência háptica é habitualmente caracterizada como um aumento da dificuldade da tarefa ou alguma maneira que impeça o indivíduo de completar a tarefa de forma ótima, pois assenta na suposição que treinando excessivamente na presença de resistência artificial, os aprendizes vão considerar relativamente fácil executar a mesma tarefa sem resistência (Powell & O’Malley, 2012).

As implementações mais comuns de resistência háptica são a amplificação de erros a perturbação háptica.

#### **3.3.1 Amplificação de erros**

A amplificação de erros consiste em fornecer o estímulo háptico que amplifica o erro, ao exercer força no sentido oposto ao desejado (Powell & O’Malley, 2012).

Segundo a teoria das dificuldades desejáveis (Bjork, 1994; Bjork & Linn, 2006), a introdução de dificuldades ao aprendiz, como alteração das condições de treino e redução do *feedback*, apesar de

normalmente piorar o desempenho durante o treino, pós treino proporciona uma melhor retenção. Para além disso, as condições de treino exigentes podem levar a uma postura mais ativa e participativa, melhorando o processamento de informação e retenção de nova informação e habilidades (Lee *et al.*, 1994; Schmidt & Bjork, 1992).

Segundo a teoria do esquema de Schmidt a adaptação motora e a aquisição de habilidades motoras são promovidas pela deteção e correção de erros (Schmidt & White, 1972). Da mesma forma, existe uma atualização dos modelos internos que mapeiam os movimentos dos membros em relação às consequências no ambiente (Thoroughman & Shadmehr, 2000).

Tendo tudo isto em consideração espera-se benefícios quando empregue amplificação artificial de erros, tais como:

- aumento da motivação do sujeito (Williams *et al.*, 2016);
- aumento da deteção e correção de pequenos erros (Williams *et al.*, 2016);
- melhoraria a relação sinal-ruído do *feedback* sensorial (Wei *et al.*, 2005).

Por exemplo Emken e Reinkensmeyer (2005) aplicaram um campo de forças viscoso a um aprendiz durante a marcha normal e verificaram que a adaptação ao campo de forças era acelerada quando induzidas grande amplificações de erros numa fase inicial do treino. Williams *et al.* (2016) constataram no seu estudo que os participantes que foram sujeitos a amplificação de erros em vez de minimização de erros apresentaram melhores resultados em tarefas onde traçam de curvas.

Patton *et al.* (2006) constatou que ao aplicar a amplificação de erros com recurso à utilização de campos de forças seria possível induzir uma melhor aprendizagem em indivíduos com AVC (acidente vascular cerebral) do que aplicando minimização de erros ou sem a aplicação dos campos de força. Ao aumentar artificialmente o erro de desempenho ao longo da aprendizagem, foi levantada a hipótese de que o sistema motor poderá ser conduzido de uma forma que o faça adaptar de forma mais completa (Patton *et al.*, 2006) ou mais rapidamente (Emken & Reinkensmeyer, 2005).

Utilizando o mesmo paradigma que Patton (2006), Cesqui (2008) sugeriu também que um programa de treino de duas semanas de amplificação de erros beneficiaria mais os indivíduos menos debilitados enquanto que assistência háptica se torna mais benéfica para os indivíduos com mais debilitados.

Este resultado é consistente com o proposto por Guadagnoli e Lee (2004), que diz que uma melhor aprendizagem pode ser atingida quando o indivíduo é exposto a um nível ótimo de esforço cognitivo que está relacionado com a habilidade do mesmo.

### 3.3.2 Perturbação háptica

O termo perturbação háptica foi inicialmente proposto por Jaebong Lee e Seungmoon Choi (Lee & Choi, 2010) e pode ser visto como um conceito alargado a partir da amplificação de erros, e engloba qualquer tipo de dificuldade adicionada à tarefa motora normal, com o objetivo de acelerar a aprendizagem motora (Lee & Choi, 2010). No seu trabalho consideraram dois tipos de perturbação háptica: a perturbação háptica repulsiva que utiliza forças de *feedback* repulsivas (semelhante à amplificação de erros, mas apenas aumenta os erros quando estes são pequenos) e a perturbação háptica semelhante ao ruído que utiliza forças aleatórias.

A grande diferença entre estes dois algoritmos é que o segundo é imprevisível, obrigando o aprendiz a um maior nível de concentração e imersão, pois como o indivíduo não seria capaz de prever quando nem como seriam as forças de perturbação, por estas serem independentes do desempenho, este é obrigado a permanecer concentrado durante a tarefa, mesmo quando esta é simples, o que normalmente levaria o indivíduo a tomar uma posição passiva e desinteressada, dificultando a aprendizagem e retenção de informação (Marchal-Crespo *et al.*, 2014).

## 3.4. Conclusões sobre o método de assistência a usar em cada fase

Fitts (1967) definiu três fases da aprendizagem: cognitiva, associativa e autónoma.

A primeira fase, a fase cognitiva, é a fase explicativa da aprendizagem, quando o sujeito adquire conhecimento da forma geral da escrita da letra e é marcada por uma elevada quantidade de erros (Feygin *et al.*, 2002). De acordo com Teranishi *et al.* (2017, 2018), acredita-se que nesta fase será mais vantajoso a utilização da assistência háptica na forma de escantilhão (apenas aplica forças corretivas quando a trajetória se desvia da caminho ideal), pois esta será mais indicada para aprender a forma global da trajetória da escrita da letra.

Na fase seguinte, a fase associativa, o sujeito determina “como” executar o movimento, por isso é necessário aprender os detalhes da letra a aprender. Para isso, nesta fase será necessário a utilização do modo guiado (Bara & Gentaz, 2011; Teranishi *et al.*, 2017, 2018), na qual o indivíduo é conduzido através da trajetória não só espacialmente como também temporalmente. O modo guiado aqui implementado deverá ser progressivo, ou seja, deverá diminuir a intensidade da assistência à medida que o desempenho do indivíduo for melhorando, de maneira a evitar a dependência pela assistência háptica (Lee & Choi, 2014; Lee & Choi, 2010), sendo depois gradualmente substituída pela amplificação de erros, mantendo assim o nível de dificuldade adequado ao desempenho do indivíduo (Marchal-Crespo *et al.*, 2014).

Por fim, na última fase, a fase autónoma, o indivíduo já deverá dominar a tarefa e esta já estará automatizada, por isso a assistência háptica poderá ser prejudicial (Feygin *et al.*, 2002). Lee (2013) sugere então que nesta fase seja utilizada a perturbação háptica semelhante ao ruído ou até mesmo uma combinação entre estes dois modos de resistência háptica, exigindo um maior esforço físico e um maior nível de atenção, devido ao facto das forças implementadas serem imprevisíveis, o que levará a uma maior quantidade de entrada de informação sensorial melhorando a retenção de informação.

### 3.5. Trabalho relacionado

A tecnologia háptica é uma área que tem captado cada vez mais atenções. Em parte, isso deve-se à descida de preço dos equipamentos necessários, o que impulsionou a exploração e aplicação deste conceito à área da aprendizagem motora, pois os robôs são mais consistentes e precisos (Solis *et al.*, 2002), e mais baratos a longo prazo (Lüttgen & Heuer, 2012) quando comparados aos métodos que recorrem tradicionais humanos terapeutas.

São já vários os estudos efetuados para comprovar a eficácia do *feedback* háptico na transmissão e desenvolvimento de habilidades motoras (Chellali *et al.*, 2010; Feygin *et al.*, 2002; Heuer & Lüttgen, 2014; Lee & Choi, 2010; Liu *et al.*, 2005, 2006; Lüttgen & Heuer, 2012; Patton & Mussa-Ivaldi, 2004; Portillo-Rodriguez *et al.*, 2012; Powell & O'Malley, 2012; Schmidt & Lee, 2014; Srimathveeravalli *et al.*, 2006, 2007, 2009; Wei *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2008; Yokokohji *et al.*, 1996). Nesta dissertação estamos particularmente interessados na pesquisa das suas aplicações na caligrafia em diversas línguas como árabe (Amin *et al.*, 2013; Teranishi *et al.*, 2017, 2018), indiano (Srimathveeravalli & Thenkurussi, 2005), japonês (Bayart *et al.*, 2005; Eid *et al.*, 2007; Nishino *et al.*, 2010, 2011; Shuto *et al.*, 2009; Solis *et al.*, 2002), línguas românicas (Bara & Gentaz, 2011; Basteris *et al.*, 2012; Frenoy *et al.*, 2014; Henmi & Yoshikawa, 1998; Hennion *et al.*, 2005; Kim & Yang, 2006; Mullins *et al.*, 2005; R. Palluel-Germain *et al.*, 2007; Richard Palluel-Germain *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2019), mandarim (Teo *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; Yeh *et al.*, 2002), e até mesmo sistemas multilinguagem (Bluteau *et al.*, 2008; Morris *et al.*, 2007).

Nos primeiros estudos, a pesquisa focava-se na comparação entre a modalidade háptica, modalidade visual e a combinação de ambas (Bara & Gentaz, 2011; Basteris *et al.*, 2012; Feygin *et al.*,

2002; Liu *et al.*, 2006; Lüttgen & Heuer, 2012; Morris *et al.*, 2007; R. Palluel-Germain *et al.*, 2007; Richard Palluel-Germain *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008).

Durante bastante tempo a modalidade háptica era considerada inferior à visual em termos de precisão perceptual, devido ao conceito de dominância visual (Connolly *et al.*, 1970; Rock & Victor, 1964). No entanto, teorias atuais de integração sensorial admitem que a recepção de informação sensorial via diferentes modalidades produz melhor desempenho do que por apenas uma (Feygin *et al.*, 2002). Lüttgen e Heuer (2012), no seu estudo verificaram a superioridade do treino visual para a aprendizagem da posição e a forma do movimento, enquanto que o treino háptico produziria maiores benefícios para a precisão temporal, embora a combinação do treino háptico e visual não proporcionar benefícios significativos adicionais durante o treino, algo que se encontra em concordância com os resultados de Feygin *et al.* e Liu *et al.* (Feygin *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2006), mas em discórdia com os resultados de Basteri *et al.* (2012) nos quais mostraram que o erro da forma e o erro da variabilidade da forma diminuíram mais durante as sessões de treino háptico do que durante as sessões de treino visual. Contudo, durante o teste de memória constatou-se que a inclusão da visão melhora o desempenho dos alunos na aprendizagem de características dinâmicas e espaciais, tanto os que treinaram sob a condição visual como os que treinaram sob a condição háptica, mas observa-se uma clara superioridade dos benefícios a nível das características espaciais no grupo de alunos sujeitos a treino visual.

Yang *et al.* (2008) no seu estudo verificaram que para os efeitos a curto prazo, o treino visuo-háptico mostrava-se tão eficaz como o treino visual. Em contraste, os resultados de Avizzano sugerem que o treino háptico será mais eficaz que o treino visual (Avizzano *et al.*, 2002), o que se deve provavelmente ao facto de apenas terem analisado métricas temporais

A assistência háptica pode ser implementada utilizando coordenadas espaciais da trajetória a aprender, sendo denominada de assistência háptica em posição (AHP). A assistência háptica pode também ser implementada através da reprodução de forças previamente criadas e registadas por um especialista, (Lüttgen & Heuer, 2012), ou modeladas como a força que é necessária para mover uma massa numa superfície de fricção constante (AHF) (Bluteau *et al.*, 2008). A utilização destas duas implementações tem sido vasta, mas poucos comparam o seu efeito.

Henmi e Yoshikawa (1998) criaram um sistema que utiliza as duas implementações apesar de ser observada uma tendência para a aquisição da escrita. No entanto, o seu estudo carecia de avaliação quantitativa.

Srimathveeravalli e Thenkurussi (2005) compararam estas duas implementações, organizando uma sessão de treino de onze ensaios seguidos de um teste, para análise desse teste utilizaram duas métricas, a correspondência entre a forma do carácter de referência e o carácter realizado pelo aluno e o perfil háptico do aluno com a referência, tendo constatado que a primeira mostrou melhores resultados em ambas as métricas embora não significativos.

Bluteau *et al.* (2008) compararam também as mesmas implementações, segundo métricas temporais, nomeadamente o número de picos de velocidade e velocidade média e espaciais, nomeadamente a correspondência da forma. O seu estudo consistiu em duas experiências separadas: a primeira, consistia na reprodução de letras inspiradas no alfabeto árabe e no alfabeto japonês, enquanto que a segunda consistia na reprodução de elipses. Os resultados da primeira experiência mostraram que a utilização da AHF diminuiu os picos de velocidade e aumentou a velocidade média para duas das letras, estando de acordo com o estudo de Srimathveeravalli e Tenkurussi (2005), enquanto que com a AHP e sem assistência háptica não foram encontradas melhorias significativas nestas duas métricas. Na segunda experiência os resultados mostraram que tanto a AHF como a AHP diminuíram o número de picos de velocidade, mas apenas a AHF aumentou a velocidade média, levando a concluir que a AHF originou maiores benefícios na fluidez dos movimentos. No caso da correspondência da forma, não foram encontradas melhorias significativas em nenhum dos modos, provavelmente devido ao “*ceiling effect*”, pois o estudo foi efetuado em adultos e como tal já possuíam boas capacidades de escrita para a dificuldade da tarefa e também devido ao facto de durante o teste de memória terem sido retiradas a referencia visual da trajetória pois como já foi dito anteriormente as informações espaciais são principalmente obtidas pela modalidade visual.

A assistência háptica pode ser implementada em dois modos, o modo guiado (*full guidance*) e o modo semi-guiado (*partial guidance*): o modo guiado guia o aluno pela trajetória ideal, o que promove uma aprendizagem passiva, enquanto que o modo semi-guiado permite ao aluno a exploração da letra, e apenas aplica forças corretivas quando o aprendiz se desvia do trajeto.

Teo *et al.* (2002) no seu estudo constataram maiores benefícios do modo semi-guiado, particularmente no caso de principiantes, o que se mostra consistente com modo do semi-guiado ser melhor para a aprendizagem da forma geral da letra e por isso deve ser utilizada na primeira fase de treino.

Boroujeni & Meghdari (2009), desenvolveram uma aplicação para a aprendizagem da caligrafia persa, que continha os 2 modos de orientação háptica, modo guiado e a modo semi-guiado. Os autores empregam numa primeira fase o modo guiado e depois o modo semi-guiado, tendo reportado bons resultados, mas infelizmente não verificaram o efeito de empregar os modos de controlo na ordem contrária.

Nishino *et al.* (2011), elaboraram um sistema de treino háptico para ensino da escrita. Para verificação da eficácia do mesmo efetuaram uma experiência em que dividiam 18 alunos de mestrado em grupos de 6. Cada grupo foi sujeito a um modo de orientação distinto, enquanto aprendiam a escrever um caracter em mandarim, língua com que nenhum dos participantes está familiarizado.

Para avaliar quantitativamente os efeitos de aprendizagem do sistema, examinaram a velocidade de escrita, pois esta é bastante importante na caligrafia japonesa. Foi constatado que no grupo de



indivíduos que utilizou o modo guiado todos melhoraram a sua qualidade de escrita, enquanto que no grupo de alunos que utilizou o método semi-guiado apenas 4 em 6 alunos melhoraram após o treino e um deles piorou.

Basteris *et al.* (2012) estudaram também a transferência de habilidades da escrita, comparando a orientação visual com o modo de orientação guiado e semi-guiado. Durante o treino foi verificada uma redução gradual na diferença entre a forma das letras escritas e a correspondente referência, em todos os modos assistência. Foi também verificada uma melhoria quanto ao tempo de execução, com exceção do modo guiado, cujo tempo é regulado pela assistência. De maneira a avaliar a retenção das habilidades, foi realizado um teste (sem orientação) no dia seguinte, neste teste apenas o modo guiado mostrou bons resultados e significativos quanto ao erro da forma enquanto que o modo semi-guiado mostrou bons resultados, mas não significativos. O modo semi-guiado não mostrou alterações significativas, além disso apenas o modo guiado permitiu diminuições significativas na variabilidade da forma. No caso das métricas temporais, todas as modalidades de treino produziram uma redução gradual tanto na duração do movimento como na variabilidade da sua duração embora sem diferenças significativas entre os diferentes modos.

Teranishi *et al.* (2017), elaboraram um estudo sobre o desenvolvimento de competências da escrita com 3 objetivos: primeiro, verificar qual das variantes de orientação produz os melhores resultados, segundo, verificar se quando combinadas as duas variantes a ordem pela qual são praticadas tem influência na performance e por último, se as melhorias no desempenho verificadas entre a primeira e a última sessão são significativas para ambos os modos de orientação. Para tal recorreram a uma avaliação subjetiva efetuada por um especialista e uma avaliação quantitativa efetuada com recurso a um algoritmo que procura semelhanças locais entre a letra escrita pelos alunos e a trajetória de referência.

A primeira hipótese foi rejeitada, pois foi verificada uma diferença de apenas 1% entre resultados das primeiras 3 sessões com a utilização do modo guiado e semi-guiado. Quanto à segunda hipótese, foram verificados melhores resultados quando foi empregue o modo semi-guiado numa primeira fase seguido do modo guiado, do que ao contrário. Finalmente, ao analisarem a diferença entre os resultados da primeira e da última sessão, verificaram uma melhoria significativa nos dois grupos, levando a constatar terceira hipótese é válida e que a orientação háptica em geral útil para o ensino da caligrafia.

Teranishi *et al.* (2018), elaboraram outro estudo com o objetivo de comparar não só a eficácia da utilização do modo guiado, e do modo semi-guiado, como também a sua combinação. Neste último caso, verificam também se a ordem do treino tem influência. À semelhança do estudo anterior os resultados foram verificados por um especialista e pelo mesmo algoritmo do estudo anterior. Nos seus resultados verificaram melhorias significativas tanto utilizando o modo guiado como como o semi-

guiado, mas sem diferenças significativas entre os dois modos. Os resultados obtidos quando combinados os dois métodos são significativamente melhores que os resultados obtidos quando aplicado apenas qualquer um dos métodos isolados. Tal como no estudo anterior, foram atingidos os melhores resultados quando o treino começou com o modo guiado e progrediu para o modo semi-guiado.

Mais recentemente Park *et al.* (2019) compararam a eficácia do modo guiado, semi-guiado, perturbação háptica tipo ruído e sem *feedback* háptico (utilização do dispositivo sem este exercer forças), e utilizando os métodos tradicionais. Os autores reportam que, para letras simples o método mais eficaz é o modo guiado, para letras de dificuldade média tanto o modo guiado como o semi-guiado apresentam resultados significativamente melhores que os restantes métodos, e no caso de letras de dificuldade alta é a perturbação háptica que apresenta melhores resultados, apresentando melhorias mais elevadas que comparando com os restantes métodos mesmo em letras de menor dificuldade, levando a concluir que o método de perturbação háptica promoveu uma postura mais concentrada e empenhada durante o treino que os outros métodos. Tendo estes resultados em consideração, os autores concluem que não existe um método *feedback* para todo o tipo de tarefas.

Com base nos resultados da literatura anterior, é possível concluir que não existe um método preferível para todo o tipo de tarefas e que a sua eficácia está diretamente ligada à perícia do aluno e da dificuldade da tarefa. Teranishi *et al.*, (2017, 2018) nos seus estudos concluíram que na fase inicial da aprendizagem, em que o aluno aprende a forma geral da letra é melhor a utilização do modo semi-guiado enquanto que o modo guiado se torna mais eficaz para aprender os detalhes da letra. Comparando estes resultados com os de Basteris *et al.* (2012), e Nishino *et al.* (2011) é possível inferir que uma provável causa do modo guiado ter apresentado melhores resultados reside no facto de os indivíduos que realizaram os testes terem uma idade considerável, logo o seu conhecimento sobre as formas gerais das letras seria estabelecido rapidamente por informação visual, necessitando apenas de aprender os detalhes das mesmas. O mesmo raciocínio pode ser feito em relação ao facto de Eid *et al.* (2007), ter constatado que no caso dos principiantes se tenha verificado maiores benefícios na utilização do modo semi-guiado, pois haveria necessidade de aprender também a forma geral da letra.

Bayart *et al.* (2005) desenvolveram um sistema háptico com o objetivo de desenvolver um protótipo para pesquisa háptica por computador e conseqüentemente gerar simulações interativas e reais para a indústria. No entanto reconheceram também o seu potencial para o ensino da escrita, incluindo um modo de orientação que se adapta ao desempenho do utilizador. Numa fase inicial do treino o aluno é guiado pelo dispositivo que reproduz a trajetória de referência, na segunda fase um modo que apenas aplica forças corretivas no sentido da trajetória, na terceira um modo que também aplica forças corretivas quando este se desvia do trajeto a percorrer, mas neste caso não existe indicação do sentido a percorrer, terminando sem orientação háptica.

Com este método de assistência háptica os autores assumem ter evitado a dependência pelo “professor”, embora não tenham sido encontradas diferenças significativas entre os grupos que

utilizaram este método, os que treinaram sozinhos e os que utilizaram o modo guiado durante todo o treino, tendo atribuído este facto à baixa dificuldade do carácter escolhido para o treino.

Heuer & Luttgen (2014), no seu estudo compararam orientação decrescente com a orientação crescente e avaliaram o desempenho através de métricas temporais e espaciais. De maneira a suprimir o papel passivo do indivíduo, durante o treino alternaram entre ensaios com orientação e sem orientação. Apresentando em primeiro lugar uma demonstração visual, seguida de um ensaio com orientação e um ensaio sem orientação. Os resultados demonstraram que no geral não foi verificada uma superioridade de um método em relação ao outro, afirmaram que tal poderia ter acontecido devido à inclusão da estratégia de alternar entre ensaios com e sem orientação, o que presumivelmente terá os mesmos efeitos que a orientação decrescente.

Apesar das evidências que suportam a minimização de erros (assistência háptica) durante os treinos, há várias teorias que sugerem que deveríamos ser cuidadosos com esta abordagem. Tal como mencionado anteriormente, a teoria das dificuldades desejáveis (Bjork, 1994; Linn and Bjork, 2006), postula que a introdução de dificuldades, como a alteração das condições de treino e redução do *feedback*, apesar de normalmente piorar o desempenho durante o treino, pós treino proporciona uma melhor retenção, pois leva a uma postura mais ativa e participativa (Lee *et al.*, 1994; Schmidt & Bjork, 1992). Para além disso aumentando a dificuldade da tarefa, é promovida a realização de erros e segundo Schmidt & White (1972), a deteção e correção de erros impulsiona a adaptação motora e a aquisição de habilidades motoras.

Dito isto, é possível inferir que um modo de *feedback* háptico que aumente a frequência e a magnitude dos erros em vez de os minimizar poderá ser bastante benéfico para a aprendizagem de habilidades motoras (Lee & Choi, 2014; Lee & Choi, 2010; Marchal-Crespo *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2005), em particular a caligrafia (Park *et al.*, 2019; Williams *et al.*, 2016).

Williams *et al.* (2016), realizaram um estudo para comparar a eficácia do treino háptico sob a condição de minimização de erros com a condição de maximização de erros numa tarefa onde traçam curvas. Para avaliar os movimentos analisaram tanto métricas temporais como espaciais.

Constataram então que embora os testes de retenção imediata (15 minutos depois do treino) tenham mostrado bons resultados, estes foram piorando em condições pós-treino. Foi constatado também que o grupo de minimização de erros embora tenha tido a tendência para um pior desempenho que o grupo de controlo nos testes de retenção imediata, esta diferença não foi significativa no teste de retenção executado no dia a seguir. Outro resultado interessante é o facto de o desempenho geral do grupo de controlo ter sido semelhante ao grupo de amplificação de erros em qualquer um dos testes, o grupo de amplificação de erros atingiu consistentemente melhores resultados que o grupo de minimização de erros tanto nos testes de retenção como de transferência (mesma tarefa que no teste de

retenção mas invertida). Os autores atribuem este resultado à natureza do *feedback* de amplificação de erros, que impede um bom desempenho, mas promove uma experiência com maior frequência de erros, promovendo a sua deteção e correção, o que poderá ser mais benéfico que guiar o movimento com precisão.

## 4. Sistema desenvolvido

Como apresentado na introdução deste documento, o objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema háptico para treino da escrita à mão. O sistema desenvolvido consiste num dispositivo háptico controlado através de um computador comum, uma plataforma que cria um plano de escrita a 52mm acima da base dispositivo e de uma extensão de caneta que permite tornar a experiência do utilizador semelhante à escrita tradicional.

A aplicação do utilizador foi desenvolvida utilizando o *kit* de ferramentas *OpenHaptics* e a sua biblioteca *Haptic Device API* (HDAPI), que fornece funções de baixo nível para interação com o Dispositivo Háptico (DH), e a *Qt Vs Tools*, uma extensão do *Visual Studio* que implementa no *Visual Studio* as funcionalidades do *Qt*, uma *framework* multiplataforma para o desenvolvimento de interfaces gráficas. Em conjunto com o *QCustomplot*, uma biblioteca para plotagem e visualização de dados que torna possível a visualização em tempo real das trajetórias através da sua representação num gráfico (neste contexto um *plot*) na forma de curvas paramétricas compostas por vetores ordenados. A escolha e configuração do exercício a realizar é efetuada através da interface gráfica, enquanto que a obtenção do estado, cálculo e envio de forças é realizado pelo *HapticManager*, um módulo do software que está encarregue do controlo e conexão com o dispositivo háptico. Nas secções seguintes descreve-se os componentes de hardware, nomeadamente, o joystick háptico, a plataforma de escrita e extensão da caneta e o módulo de software que compõe a aplicação desenvolvida. A arquitetura do software desenvolvido está mostrada na Figura 1.

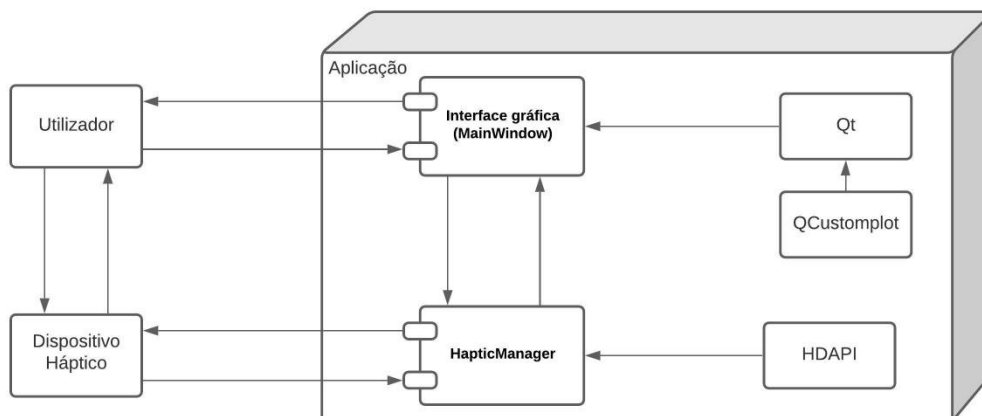


FIGURA 1 - ARQUITETURA DO SISTEMA.

#### 4.1. Joystick háptico

Com o objetivo de criar uma ferramenta útil na aprendizagem da escrita, foi usado o dispositivo háptico Touch da 3D Systems. Na Figura 2 é exibido o dispositivo háptico Touch.



FIGURA 2 - DISPOSITIVO HÁPTICO TOUCH DA 3D SYSTEMS.

##### 4.1.1 Descrição técnica

O Touch é um dispositivo motorizado que aplica *feedback* de força na mão do utilizador. O dispositivo apresenta seis graus de liberdade (representados na Figura 3), mas apenas os três primeiros são ativos. O controlo do dispositivo é realizado por um computador comum conectado através de uma ligação USB permitindo a sua fácil utilização em diversas aplicações como: controlo robótico, modelação 3D, simulações, treino de habilidades motoras, entre outras. (3D Systems, 2020). As características do dispositivo háptico estão representadas na Tabela 4.

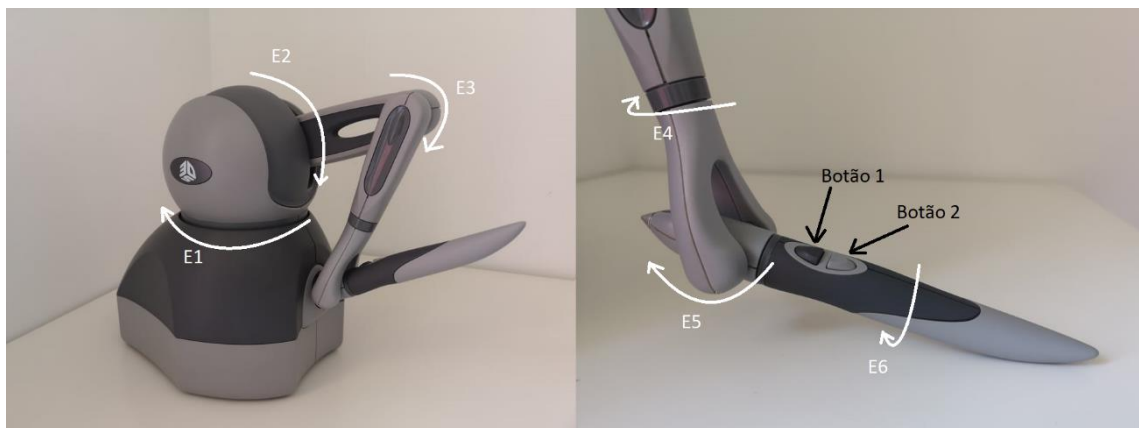


FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE E BOTÕES DO TOUCH.

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DO 3D SYSTEMS TOUCH (ADAPTADO DE [HTTPS://WWW.3DSYSTEMS.COM/HAPTICS-DEVICES/TOUCH/SPECIFICATIONS](https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/specifications))

<b>Graus de liberdade</b>	6
<b>Espaço de trabalho disponível</b>	160 largura x 120 altura x 70 profundidade mm
<b>Amplitude do movimento</b>	Movimento da mão
<b>Resolução espacial</b>	Aproximadamente 0,055 mm
<b>Força máxima disponível</b>	3,3 N
<b>Rigidez</b>	Eixo x -> 1,26 (N/mm) Eixo y -> 2,31 (N/mm) Eixo z -> 1,02 (N/mm)
<b>Feedback de força (três graus de liberdade)</b>	X, Y, Z
<b>Sensorização de posição (6 graus de liberdade)</b>	X, Y, Z ( <i>encoders</i> digitais) [Pitch, rol, yaw ( <i>potenciômetros</i> com uma linearidade de $\pm 5\%$ )]

#### 4.1.2 Ambiente de programação do dispositivo

O sistema foi implementado em linguagem C++ , utilizando *kit* de ferramentas *OpenHaptics* e a sua biblioteca HDAPI (*Haptic Device Application Programming Interface*) para controlo e comunicação com o dispositivo, HDAPI fornece funções de baixo nível para acesso ao dispositivo, possibilitando o desenvolvimento de renderizações hápticas através da implementação direta de forças, exigindo algoritmos de renderização de força, gestão da sincronização *thread-safe* de estruturas e estados de dados do *servo loop*. (*OpenHaptics - Toolkit Version 3.5.0*, 2018)

A HDAPI consiste em dois componentes principais: O dispositivo e o escalonador de processos (*scheduler*). As *callbacks* do escalonador de processos permitem ao programador agendar comandos para serem executados dentro/durante a *thread* do *servo loop*. As *callbacks* podem ser agendadas como síncronas e assíncronas

**O dispositivo:** As chamadas do dispositivo envolvem gestão do seu estado, definição de parâmetros e envio de forças. Esta *interface* permite também a gestão de múltiplos dispositivos.

As rotinas do dispositivo podem ser divididas em três categorias principais:

- **Inicialização do dispositivo**, inclui tudo o que é necessário para comunicar com o dispositivo. Normalmente envolve a criação de um ponteiro do dispositivo, ativar forças e calibrar o dispositivo.
- **Segurança do dispositivo**, inclui rotinas para lidar com verificações de segurança do *feedback* de força, como: excesso de força ou velocidade, temperatura dos atuadores. Alguns mecanismos de segurança são controlados pelos *drivers* do dispositivo ou *hardware* subjacente e não podem ser substituídos.
- **Estado do dispositivo**, inclui obtenção e verificação de estado, como consulta de botões, posição, velocidade e matrizes de transformação do *endpoint*.

**O escalonador:** O escalonador gere uma *thread* de alta frequência e alta prioridade denominada de *servo loop*, esta é utilizada para enviar forças e receber informações sobre o estado do dispositivo. O *servo loop* opera dentro de um *frame* háptico, garantindo a consistência do estado do dispositivo. No início do *frame* o dispositivo é atualizado e são gravadas todas as informações sobre o seu estado para serem utilizadas dentro desse *frame*, no fim do *frame* são enviados novos estados como forças. De

forma a ser possível fornecer *feedback* háptico estável, este tem de ser executado a uma taxa uniforme de 1KHz ou maior. (*OpenHaptics - Toolkit Version 3.5.0*, 2018).

## 4.2. Plataforma para escrita e extensão da caneta

Para que o treino háptico proporcionado pelo sistema seja eficaz, este deverá ser ergonómico, de maneira a permitir a concentração no exercício, e assemelhar-se com a tarefa real o mais possível. Deste modo foi, utilizada uma plataforma que estabelece o plano de escrita do sistema 52 mm acima da base do dispositivo (Mendes et al., 2020) e uma caneta impressa em 3D para realizar uma extensão da caneta do dispositivo mais ergonómica.

O facto de criar um plano de escrita é bastante importante pois o espaço de trabalho do dispositivo não inclui o plano da base, sendo necessário criar um plano onde o utilizador possa escrever, simulando uma folha comum. Na Figura 4 está exibida a plataforma usada.



**FIGURA 4 – PLATAFORMA USADA COMO PLANO DE ESCRITA.**

A utilização da extensão da caneta (Figura 5) permite uma postura mais ergonómica, utilizada quando se manuseia uma caneta, ao contrário da caneta original do dispositivo que, para além de possuir um dos seus eixos no local onde seria colocada a mão, ainda possui um diâmetro grande, comparando com uma caneta.





**FIGURA 5 - EXTENSÃO DE CANETA IMPRESSA EM 3D.**

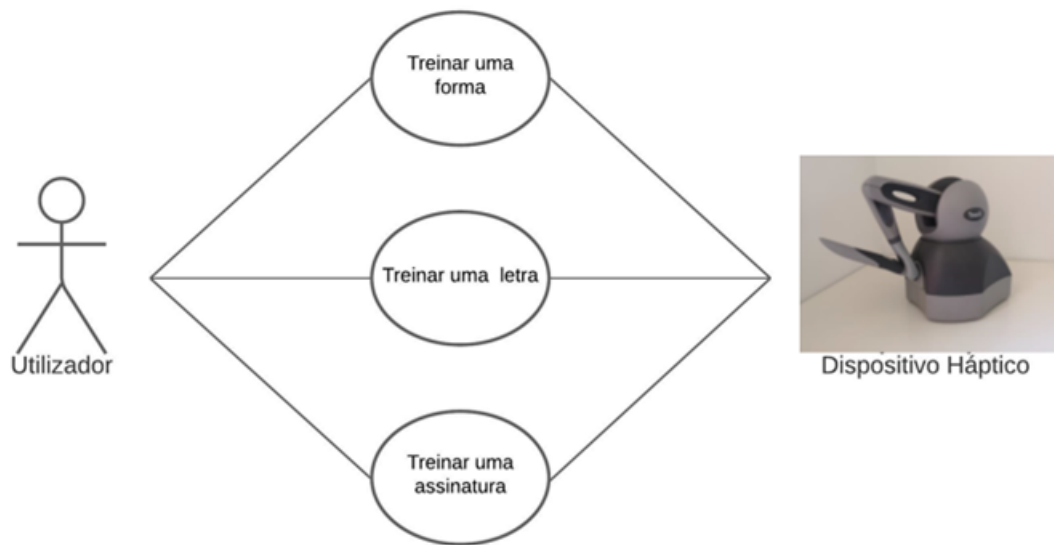
Embora a extensão da caneta tenha bastante potencial pois possui as dimensões de uma caneta comum, o facto do dispositivo apenas possuir os três primeiros eixos atuados impede a sua utilização pois o corpo da caneta original exerce força no eixo 5 que ao não ser cancelada pelos motores é bastante desconfortável para o utilizador, impedindo o seu objetivo de imitar a tarefa real. Na Figura 6 está exibida a extensão da caneta quando acoplada ao dispositivo háptico.



**FIGURA 6 - EXTENSÃO DE CANETA ACOPLADA AO DISPOSITIVO HÁPTICO.**

### **4.3. Utilização do sistema**

O sistema desenvolvido é capaz de auxiliar a aprendizagem da escrita fornecendo três exercícios: treinar uma forma geométrica, uma letra ou uma assinatura e permitindo a sua configuração de maneira a adaptar às necessidades do utilizador.



**FIGURA 7 – DIAGRAMA DE CASO DE USO DOS MÓDULO DE SOFTWARE DO SISTEMA DESENVOLVIDO.**

Na Figura 7 está representado o diagrama de casos de uso do sistema implementado. Foi também desenvolvida uma interface gráfica (Figura 8), com o objetivo de permitir uma utilização simples do sistema, por isso a escolha do exercício a realizar e do modo de orientação é feita através de botões e a configuração do exercício através de dois *sliders*, um para regular o tempo de execução da trajetória que varia entre 4 e 10 segundos e outro para regular a ampliação da trajetória que varia entre 5 e 30.

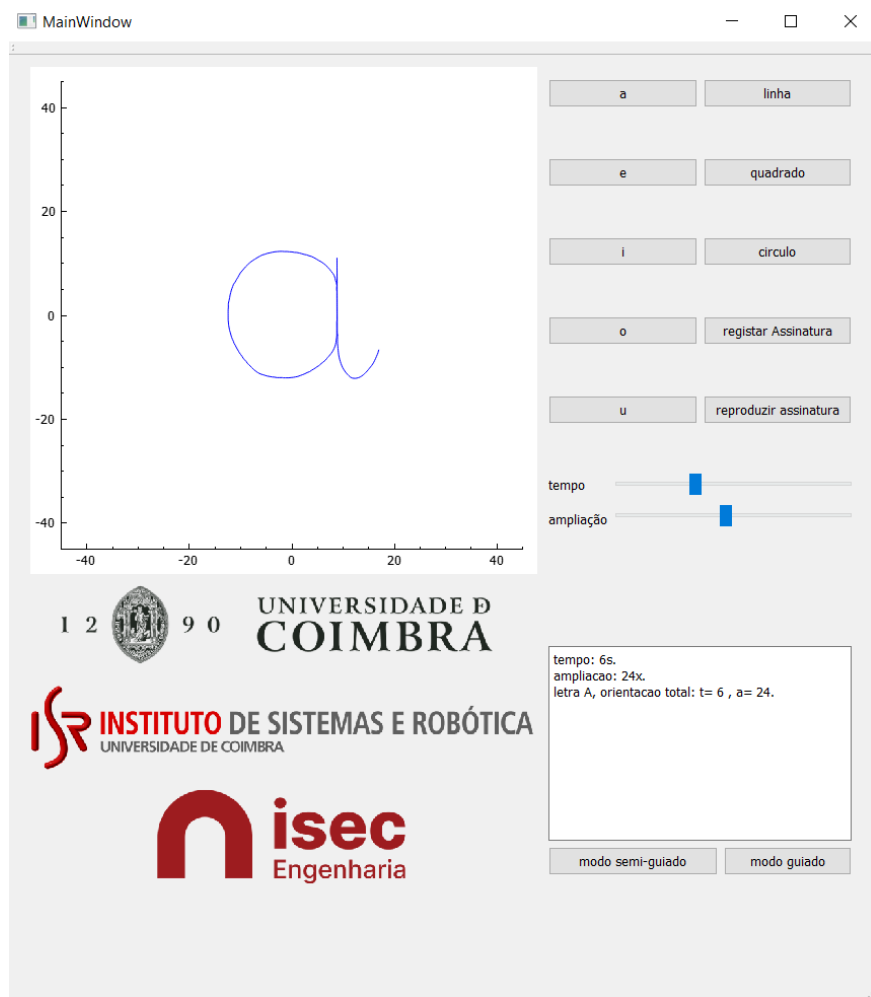


FIGURA 8 - INTERFACE GRÁFICA UTILIZADA PARA CONTROLO DO SISTEMA DESENVOLVIDO.

O utilizador pode escolher entre executar uma das trajetórias pré-registadas, como uma vogal ou uma forma geométrica simples, ou registar a trajetória que deseja executar utilizando a opção de registar assinatura que pode ser utilizada para treinar uma assinatura ou qualquer letra ou palavra registada.

Se o utilizador selecionar uma das trajetórias previamente registadas tem a opção de escolher entre os dois modos de orientação implementados, o “full” (modo guiado), ou o “escantilhão” (modo semi-guiado), enquanto que ao utilizar a opção de registar não existe feedback mas ao reproduzir a assinatura o indivíduo está restringido ao modo “full”.

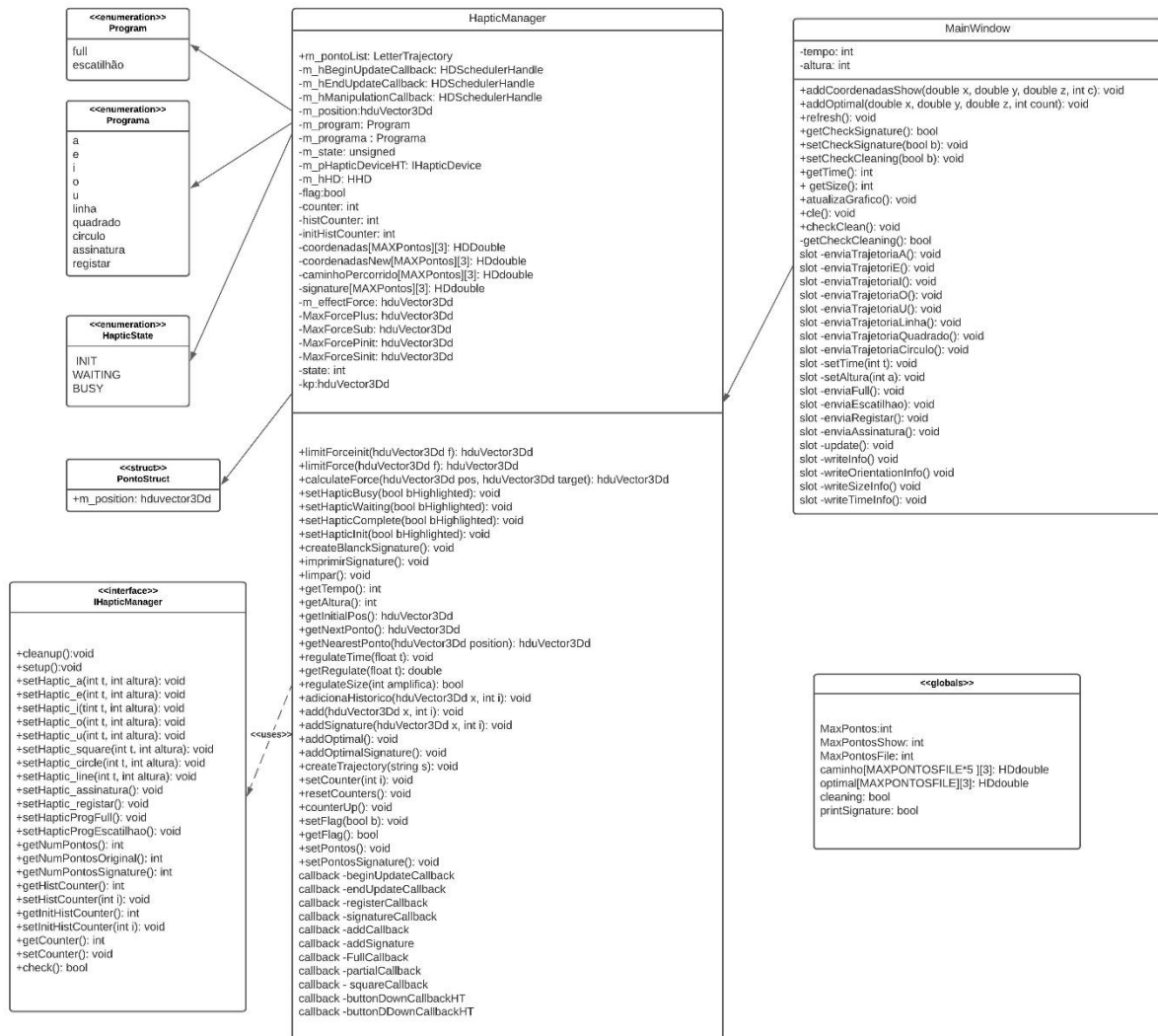
Após a configuração e escolha da trajetória a executar, são exibidas numa caixa de texto, as configurações do exercício escolhido. À medida que vão sendo escolhidos diferentes exercícios, e a sua informação adicionada à caixa de texto, vão sendo mantidas a informações dos ensaios anteriores.

#### 4.4. Arquitetura do Módulo de Software

Para o software proposto foram criadas duas classes para além do *main*:

- HapticManager – Encarrega-se de estabelecer a ligação entre as interações hápticas e a lógica e estado da aplicação. É responsável por estabelecer a ligação com o dispositivo háptico, obter informações sobre o estado do dispositivo como a posição da extremidade do seu braço, orientação, velocidade, estados dos botões e enviar forças para o mesmo. É também responsável por calcular e limitar as forças a enviar para o DH e iniciar a *thread* háptica (*servo loop*). Consoante a escolha dos parâmetros do exercício que é realizada através da interface gráfica e que são comunicados à classe HapticManager utilizando as funções disponibilizadas pela sua interface IHapticManager, com a classe HapticManager pode-se adaptar a trajetória do exercício escolhido, alterando a sua dimensão e tempo de execução. Por fim, dependendo do exercício e modo de orientação escolhido, o HapticManager está também encarregue de agendar na *thread* háptica a *callback* correspondente.
- MainWindow - É responsável pela implementação da interface gráfica, que permite ao utilizador, escolher os parâmetros e o exercício a realizar e também obter *feedback* visual através da representação da trajetória de referência do exercício a realizar e a trajetória real realizada pelo utilizador.

FIGURA 9 - DIAGRAMA DE CLASSES DO MÓDULO DE SOFTWARE.



## 4.4.1 Descrição das principais variáveis e funções

### 4.4.1.1 Classe HapticManager

A variável `m_hHD` corresponde ao ponteiro do dispositivo háptico atual enquanto a variável `m_pHapticDeviceHT` corresponde ao ponteiro da interface `IHapticManager` implementada pela classe `HapticManager`.

A função `setup()` é utilizada diretamente pelo *main* e é responsável por criar a `IHapticManager`, agendar as *callbacks* que permitem a funcionalização dos botões do dispositivo e as *callbacks* responsáveis pela atualização do dispositivo e envio de forças para o mesmo.

Na Tabela 5 indicam-se as variáveis que armazenam: o estado do sistema (`m_state`), o exercício a realizar (`m_programa`) e o modo de orientação (`m_program`). Estas destinam-se a controlam todo o sistema. Para tornar o código mais simples foram restringidas a conjuntos finitos de valores, recorrendo a enumerações (representados no diagrama e na coluna “Valor na variável”). Foram também criadas funções para leitura (*getter*) e manipulação (*setter*) dos valores nestas variáveis, apresentados nas respetivas colunas da Tabela 5.

**TABELA 5 - VARIÁVEIS E FUNÇÕES DE MANIPULAÇÃO DO SISTEMA.**

<b>Variável</b>	<b>Valor da variável</b>	<b>getter</b>	<b>setter</b>
m_state	INIT	getState()	setHapticInit()
	WAITING		setHapticWaiting()
	BUSY		setHapticBusy()
	COMPLETE		setHapticComplete()
m_programa	a	getPrograma()	setHaptic_a()
	e		setHaptic_e()
	i		setHaptic_i()
	o		setHaptic_o()
	u		setHaptic_u()
	linha		setHaptic_line()
	quadrado		setHaptic_square()
	círculo		setHaptic_circle()
	assinatura		setHaptic_assinatura()
	registar		setHaptic_registar()
m_program	full	getProgram()	setHapticProgFull()
	escantilhao		setHapticProgEscantilhao()

Para cada exercício a realizar, existe um método que é chamado em resposta à ativação do botão da interface gráfica. O objetivo é preparar o sistema para a execução do exercício. Considerando o exemplo do exercício referente à letra “a” que está representado na Figura 10.



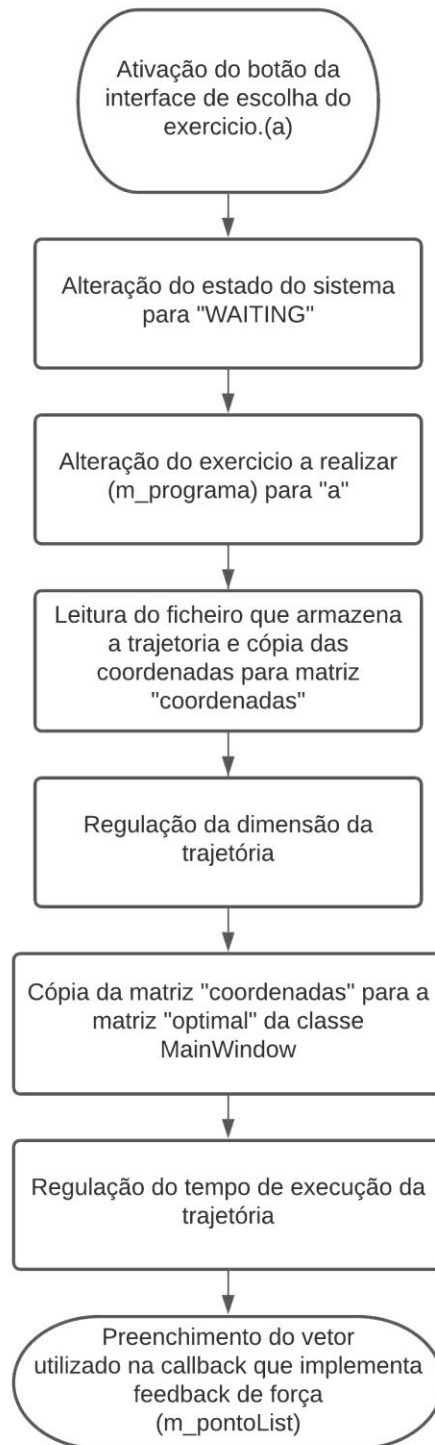


FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO `setHaptic_a()`.

O método `setHaptic_a(double tempo, double altura)`:

- Invoca a função `setHapticWaiting()` que altera a variável `m_state` para “WAITING” (1), altera a variável `m_programa` para “a”.
- Executa a função `createTrajectory()` que lê o ficheiro onde a trajetória do exercício “a” se encontra guardado e a armazena na matriz `coordenadas`.

- Executa a função `regulateSize()` que regula a dimensão da trajetória do exercício a realizar.
- Chama a função `addOptimal()` que copia a trajetória armazenada na matriz coordenadas para a matriz `optimal` pertencente à classe `MainWindow`.
- Invoca função `regulateTime()` que regula o tempo de execução do exercício adicionando pontos intermédios à trajetória .
- Executa a função `setPontos()` que preenche o vetor das posições da trajetória que vai ser utilizado como referência pelas callbacks que implementam o *feedback* de força.

No caso do registo da assinatura, a função `setHaptic_assinatura()` atribui à variável `m_programa` o valor “registar”, invoca a função `setHapticWaiting()` que altera o valor da variável `m_state` para “WAITING” .

No caso da reprodução da assinatura a função `setHaptic_assinatura()` altera o valor da variável `m_programa` para “assinatura”, chama a função `setHapticWaiting()` que altera o valor da variável `m_state` para “WAITING” , chama a função `setHapticProgFull()` que altera o valor da variável `m_program` para “FULL”, chama também a função `addOptimalSignature()` que chama a função `addOptimall()` pertencente à classe `MainWindow` e que preenche a matriz “optimal”, e a função `setPontosSignature()` que preenche o vetor a ser utilizado pela callback que implementa o modo guiado.

A comunicação com o servo loop é realizada através de callbacks manipuladas através do seu ponteiro, como apresentado na Tabela 6.

**TABELA 6 - CALLBACKS IMPLEMENTADAS**

<b>Callback</b>	<b>Ponteiro</b>	<b>Função</b>
beginUpdateCallback	m_hBeginUpdateCallback	Obtenção do estado do DH
endUpdateCallback	m_hEndUpdateCallback	Envio de forças para o DH – (m_effectForce – vetor que armazena a força)
registerCallback	m_hManipulationCallback	Registrar a assinatura para treino
signatureCallback	m_hManipulationCallback	Reproduzir a assinatura
FullCallback	m_hManipulationCallback	Implementação do modo guiado
partialCallback	m_hManipulationCallback	Implementação do modo semi-guiado
addCallback	<i>não tem ponteiro</i>	Adicionar as coordenadas atuais na matriz que armazena o histórico de posições
addSignature	<i>não tem ponteiro</i>	Adicionar as coordenadas da posição atual na matriz que armazena a trajetória da assinatura
squareCallback	m_hManipulationCallback	Implementação do algoritmo que implementa o exercício do quadrado através de uma máquina de estados
buttonDownCallbackHT	m_pHapticDeviceHT	Responder ao pressionar do botão 1 do DH
buttonDDownCallbackHT	m_pHapticDeviceHT	Responder ao pressionar do botão 2 do DH

As trajetórias de referência estão armazenadas em arquivos CSV (*comma separated values*) que são lidos pela função createTrajectory() e armazenadas na matriz “coordenadas”.

As coordenadas das trajetórias dentro da classe HapticManager foram armazenadas dentro dos objetos apresentados na Tabela 7.

**TABELA 7 - OBJETOS DA CLASSE HAPTICMANAGER.**

<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tipo</b>	<b>Método que preenche o objeto</b>
coordenadas	Coordenadas pré regulação da dimensão e tempo de execução	matriz	createTrajectory()
coordenadasNew	Coordenadas da trajetória de referência após regulação de dimensão e tempo de execução.	matriz	regulateTime()
caminhoPercorrido	coordenadas do histórico de posições.	matriz	adicionaHistorico()
signature	Coordenadas de referência para a assinatura.	matriz	addSignature()
m_position	Coordenadas de cada uma das posições da trajetória de referência.	vetor	setPontos() setPontosSignature()
m_pontoList	Trajatória de referência composta por vários vetores m_position	vetor	setPontos() setPontosSignature()

A matriz “coordenadas” armazena a trajetória antes de ser regulada a sua dimensão e tempo de execução, a matriz “coordenadasNew” guarda as coordenadas da trajetória de referência após regulação de dimensão e tempo de execução, enquanto que a matriz “caminho” armazena o histórico das posições percorridas pelo utilizador e a matriz “signature” guarda a trajetória de referência da assinatura registada. O vetor m\_position contem as coordenadas de cada posição da trajetória de referência e o seu conjunto compõe o vetor m\_pontoList.

É importante referir que as funções add(), addOptimal(), addOptimalSignature() são responsáveis por invocar métodos da classe MainWindow que preenchem as estruturas que armazenam as trajetórias na classe MainWindow. A função add() preenche a matriz que armazena o histórico de posições, a função addOptimal() preenche a matriz que armazena a trajetória de referencia e a matriz addOptimalSignature preenche a matriz que armazena a trajetória de referencia da assinatura registada.

Na Tabela 8 estão representadas as funções que regulam a trajetória de referência.

**TABELA 8 - FUNÇÕES QUE REGULAM A TRAJETÓRIA.**

Nome	Descrição
regulateSize()	Regulação da dimensão da trajetória.
regulateTime()	Regulação do tempo de execução da trajetória.
getRegulate()	Obtenção do fator de regulação da distância entre pontos da trajetória

As funções `regulateSize()` e `regulateTime()` regulam a dimensão e tempo de execução da trajetória. Para garantir que os pontos da trajetória não estão espaçados mais de 0.5mm, um valor obtido através de experimentação que evita que o utilizador tenha noção da transição entre pontos da trajetória, foi criada a função `getRegulate()`, mas devido às trajetórias utilizadas e à gama de valores escolhidos para o tempo de execução e ampliação esta não é utilizada.

**TABELA 9 - FUNÇÕES UTILIZADAS NAS CALLBACKS PARA CALCULO DE FORÇAS.**

Nome	Função
<code>calculateForce()</code>	Calculo da força a enviar para o dispositivo.
<code>getInitialPos()</code>	Obtenção da posição inicial da trajetória.
<code>getNextPonto()</code>	Obtenção da posição seguinte da trajetória.
<code>getNearestPonto()</code>	Obtenção da posição da trajetória mais próxima da extremidade do dispositivo
<code>limitForceInit()</code>	Limitação da força enviada ao dispositivo durante a fase de aproximação.
<code>limitForce()</code>	Limitação da força enviada ao dispositivo durante a fase de execução.

Na Tabela 9 estão representadas as funções utilizadas nas callbacks de calculo de forças.

A função `calculateForce()` calcula a força a enviar para o DH através da multiplicação do ganho proporcional (`hduVector3Dd kp`) e o erro de posição. O erro de posição é determinado através da subtração da posição atual, obtida através da função `getInitialPos()`, `getNextPonto()` ou `getNearestPonto()`, dependendo modo de orientação utilizado e a fase do exercício.

A força calculada pela função `calculateForce()` sofre posteriormente uma limitação de segurança que é realizada pela função `limitForceInit()`, consoante os valores de `MaxForcePinit`, `MaxForceSinit`, e a função `limitForce()` que limita consoante os valores de `MaxForcePlus` e `MaxForceSub`.

Foram também implementadas algumas variáveis e métodos que devido à sua função necessitam de contexto para serem explicadas, por isso nesta secção apenas vão ser mencionadas.

Adicionalmente, existem cinco variáveis para controlar algumas funções do sistema, enumeradas na Tabela 10, que serão detalhadas em secções seguintes.

**TABELA 10 – VARIÁVEIS DE CONTROLO DO SISTEMA.**

Nome	Tipo	<i>getter</i>	<i>setter</i>
Flag	Booleano	getFlag()	setFlag()
counter	Inteiro	getCounter()	setCounter()
histCounter	Inteiro	getHistCounter()	setHistCounter()
initHistCounter	Inteiro	getInitHistCounter()	setInitHistCounter()
state	Inteiro	Variável global	

#### 4.4.1.2 Classe MainWindow

A maioria dos métodos e variáveis criadas nesta classe são utilizadas para dar funcionalidade aos elementos da interface gráfica implementada. Os elementos da interface como os botões da classe QPushButton e o controlo deslizante (*slider*) da classe QSlider emitem “sinais” em determinadas situações que por sua vez estão conectados pela função *connect* a *slots* criados pelo programador. Os *slots* são os métodos invocados como resposta ao sinal ao qual estão conectados.

As variáveis tempo e altura armazenam os valores dos controladores deslizantes da interface. Cada vez que o valor do controlo deslizante é alterado, é emitido o sinal *valueChanged()* e executada função que lhe está associada. No caso do controlo deslizante do tempo, será invocada a função *setTime()* e no caso da ampliação, será a função *setAltura()*.

Existem 10 botões para escolha do exercício a executar, cada um deles contém o seu próprio sinal *clicked()* conectado ao slot que prepara o exercício e o sistema, como o método *enviaTrajetoriaA()*.

Se o sistema se encontrar no estado “INIT” ou “WAITING” (se a variável *m\_state* tem o valor “INIT” ou “WAITING”) a função *enviaTrajetoriaA()* executa a função *setHaptic\_a()* pertencente à classe *HapticManager* que trata da configuração do sistema, representa a trajetória de referência na interface gráfica (função *refresh()*) e invoca também a função *writeInfo()* que exhibe na caixa de texto da interface as informações do exercício selecionado ou informa que é impossível selecionar o exercício

É importante indicar que no caso da assinatura, o *slot* *enviaAssinatura()* apenas executa a função *setHaptic\_assinatura()*. Esta, configura o sistema para executar a reprodução de assinatura se, para além do sistema se encontrar no estado “INIT” ou no estado “WAITING”, também já existir uma trajetória para a assinatura previamente registada pelo utilizador (inferida pela função *getCheckSignature()* ao verificar booleano “*printSignature*”),

Para além dos 10 botões para escolha do exercício a realizar existem também 2 botões para escolha do modo de orientação.

À semelhança dos botões descritos anteriormente, estes também contêm o sinal clicked() conectado a *slots* que chamam funções da classe HapticManager. O botão “modo guiado” está conectado à função enviaFull() que, invoca a função setHapticProgFull() (altera a variável m\_program para “full”) e executa a função writeOrientationInfo() que apresenta na interface uma mensagem a indicar se a alteração do modo de orientação foi executado. O botão “modo semi-guiado” está conectado à função enviaEscatilhao() que invoca a função setHapticProgPartial() (que altera a variável m\_program para “escatilhao”) e também executa a função setOrientationInfo().

Os objetos que armazenam as trajetórias para utilização na classe MainWindow são apresentadas na Tabela 10.

**TABELA 10 - OBJETOS QUE ARMAZENAM TRAJETÓRIAS NA CLASSE MAINWINDOW.**

<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tipo</b>	<b>Método que preenche o objeto</b>	<b>Método do lado da classe HapticManager</b>
caminho	Armazenar o histórico de posições	HDdouble	addCoordenadasShow()	add()
optimal	Armazenar a trajetória de referência	HDdouble	addOptimal()	addOptimal() addOptimalSignature()

Por último, mas não menos importante, falta mencionar o elemento da interface gráfica que permite a exibição das trajetórias dos exercícios, o *plot*, um widget da classe QCustomPlot.

Foram desenvolvidas duas funções para realizar a representação das trajetórias no plot, nomeadamente, refresh() e a atualizaGráfico(). A primeira está encarregue da representação da trajetória de referência que está armazenada na matriz “optimal” e a segunda de representar a trajetória real que está armazenada na matriz “caminho”.

Ambas criam uma trajetória da classe QCPCurve, preenchem-na com as coordenadas da trajetória, mantendo a sua ordem e representam-na no *plot* da interface gráfica.

Para efetuar a representação das trajetórias do gráfico foi utilizado um temporizador, da classe QTimer, e um conjunto de funções e variáveis que interagem entre si, apresentadas na Tabela 11 e detalhadas na secção 4.4.

**TABELA 11 – MEMBROS RESPONSÁVEIS PELA MANUTENÇÃO DO PLOT**

<b>Nome</b>	<b>Função/variável</b>
cleaning	Variável (tipo Booleano)
printSignature	Variável (tipo Booleano)
update()	Método
atualizaGrafico()	Método
refresh()	Método
checkCleaning()	Método
cle()	Método
getCheckClean()	Método
setCheckCleaning()	Método



#### 4.4.1 Inicialização do sistema

O diagrama seguinte mostra um fluxograma típico de uma aplicação HDAPI para renderização de objetos virtuais.

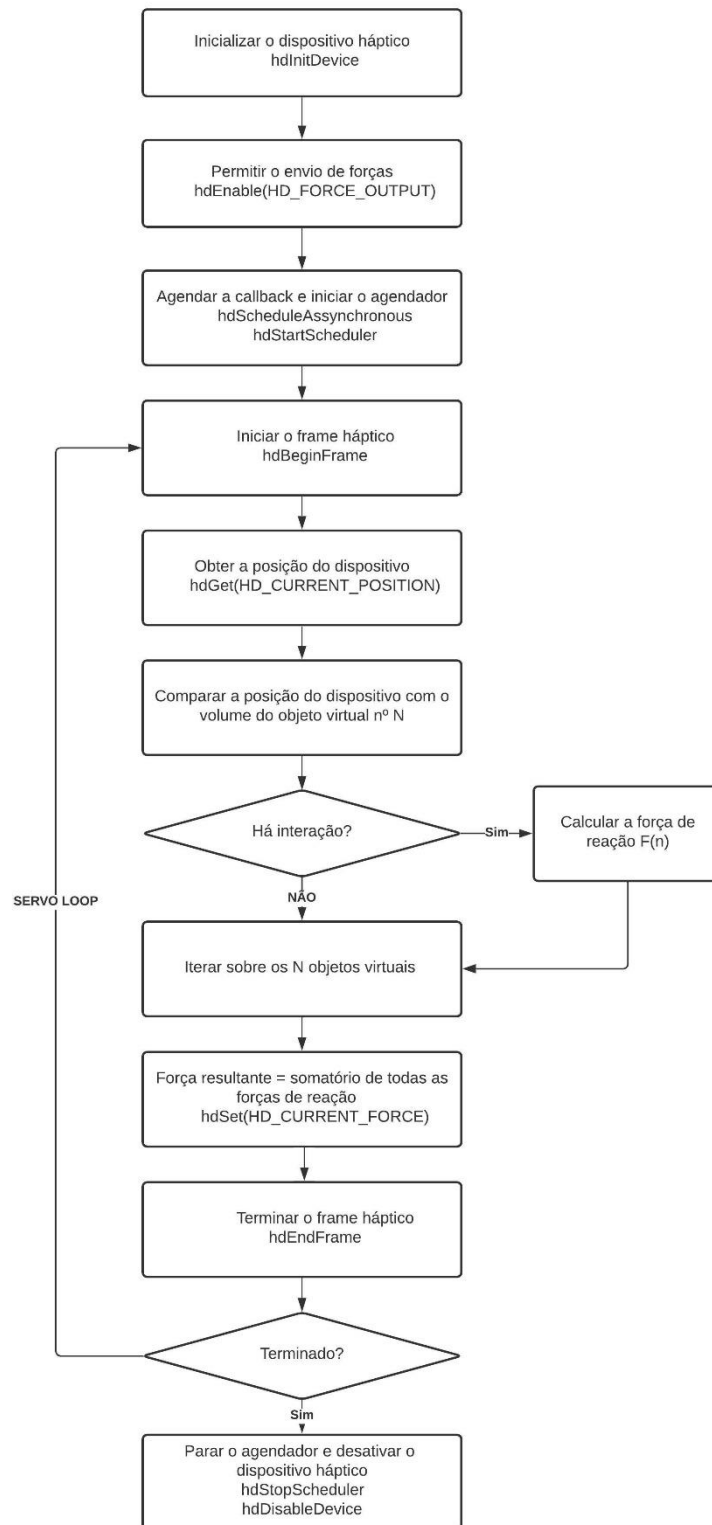
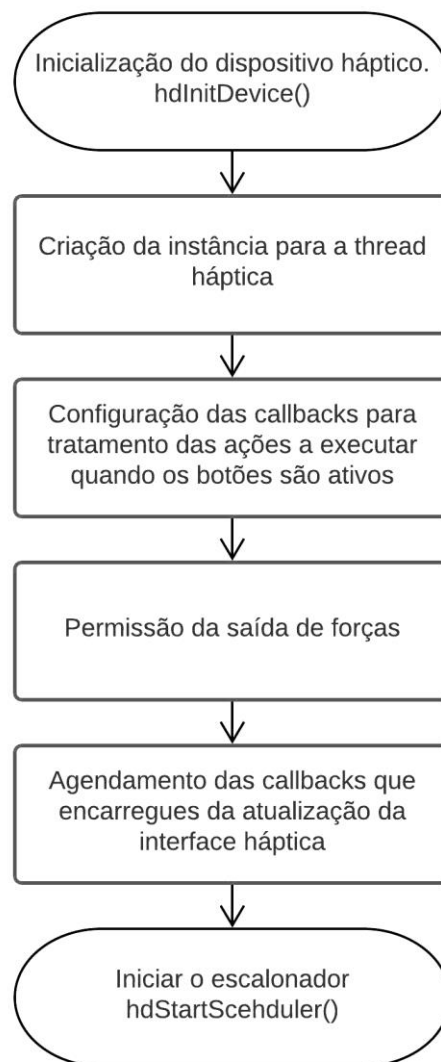


FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DE UM PROGRAMA TÍPICO HDAPI-ADAPTADO DE (*OpenHaptics - Toolkit Version 3.5.0*, 2018)

O padrão geral de uma aplicação HDAPI é inicializar o dispositivo, permitir forças, agendar *callbacks* assincronamente para definir efeitos de força e iniciar o escalonador. Quando a aplicação termina o dispositivo e o escalonador são limpos

A inicialização da aplicação, exibida na Figura 12, segue o mesmo padrão, mas são adicionados alguns passos: o agendamento das *callbacks* que permitem a responder ao premir dos botões (terceiro passo), e o agendamento das *callbacks* encarregues da atualização do estado do dispositivo (quinto passo) e que permitem consistência de dados dentro do *frame* háptico

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DA INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA



No terceiro passo são agendadas as *callbacks* que são executadas como resposta ao pressionar dos botões, a *buttonDownCallbackHT* que responde ao premir do botão 1 e é responsável pelo agendamento assíncrono das *callbacks* que realizam o *feedback* de força e registo da assinatura e a *buttonDDownCallbackHT* que responde ao premir do botão 2 e é responsável pelo desagendamento das *callbacks* responsáveis pelo *feedback* de força e por apagar a trajetória real exibida na interface gráfica..

No quinto passo, são agendadas duas *callbacks* assíncronas para atualização do dispositivo. A primeira *callback*, *beginUpdateCallback*, força a atualização do estado do dispositivo armazenando todas as suas informações substitui o vetor que guarda a força a ser enviada para o dispositivo por um vetor nulo, enquanto que a segunda, *endUpdateCallback*, acede a esse mesmo vetor que já se encontra preenchido com a força calculada e envia-o para o dispositivo.

#### 4.4.2 Passos necessários à execução de um exercício.

Uma aplicação HDAPI segue o padrão geral: inicializar o dispositivo, permitir forças, agendar *callbacks* assincronamente para definir efeitos de força e iniciar o escalonador. Quando a aplicação termina, o dispositivo e os ponteiros/*callbacks* agendadas pelo escalonador são removidas.

O módulo de *software* desenvolvido nesta dissertação é mais complexo que a aplicação *hdapi* típica pois permite o controlo do dispositivo através dos botões da caneta do mesmo e envolve o escalonamento de diferentes *callbacks* assíncronas dependendo do algoritmo de orientação háptica a utilizar. Na Figura 13 é exibido o diagrama de estados do sistema.

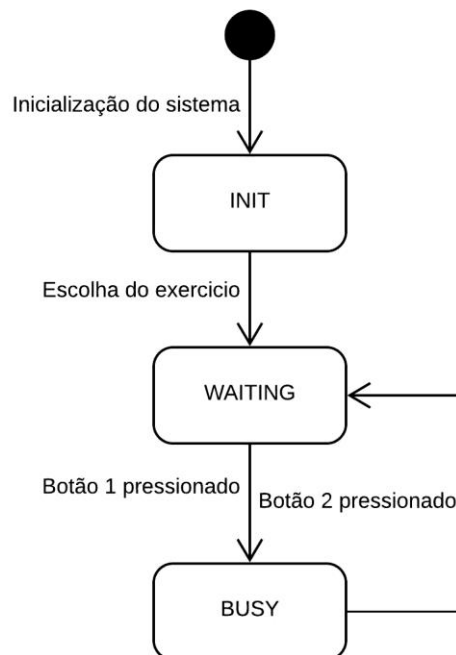


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE ESTADOS DO SISTEMA.

Após a inicialização do sistema, este entra no estado “INIT”, no qual aguarda a configuração do exercício a realizar. O utilizador pode escolher entre treinar uma forma geométrica, que é útil como

processo de habituação ao dispositivo háptico, ou para os utilizadores com maiores dificuldades, treinar uma letra, treinar uma assinatura ou qualquer outra palavra/letra registada pelo instrutor.

O utilizador poderá anteriormente a escolher o exercício, seleccionar o modo de orientação háptico, ajustar a dimensão e o tempo de execução do exercício. Caso tal não aconteça, como predefinição será seleccionado o modo guiado, a dimensão 10 e o tempo 4. Ao escolher o exercício que deseja executar, pressionando no botão da interface do exercício em causa, o sistema transita para o estado “WAITING” onde, para além de ser possível alterar as configurações do exercício (para efetivar as alterações da configuração dos parâmetros escolhidos, o utilizador deverá seleccionar novamente o exercício que deseja realizar), é agora também possível pressionar o botão 1 da caneta do dispositivo, transitando para o estado “BUSY” e agendando a *callback* correspondente ao exercício seleccionado. Neste estado apenas é possível regular o tempo e ampliação do exercício seguinte, e efetuar o desagendamento da *callback* (ao pressionar o botão 2 da caneta), que irá terminar o exercício em execução e alterar o estado do sistema novamente para “WAITING”.

Se o individuo optar por treinar a sua assinatura, esta deverá ser registada previamente pelo terapeuta. Para tal, o terapeuta deverá escolher o programa “registar assinatura” através da interface gráfica, pressionar o botão 1 da caneta para iniciar e o botão 2 para finalizar o registo. Após o registo da assinatura, ou de qualquer outra palavra que o individuo pretenda aprender, este poderá agora seleccionar o programa “reproduzir assinatura” e premir o botão 1 para iniciar a sua reprodução e o botão 2 para terminar a reprodução, desagendendo a *callback*.

Em qualquer uns dos programas, estão bloqueadas as alterações enquanto este executa e o sistema encontra-se no estado “BUSY”, sendo obrigatório pressionar o botão 2 no fim de um ensaio para escolha de um novo ensaio ou alterações dos parâmetros do mesmo.

#### **4.5. Visualização das trajetórias na interface gráfica**

Nesta secção vão ser descritas em detalhe as diferentes estratégias utilizadas para efetuar a representação das trajetórias na interface gráfica. Quando utilizado o modo de orientação guiado é possível visualizar tanto a trajetória de referência como a trajetória real, tal não acontece quando utilizado o modo semi-guiado, em que é apenas possível visualizar a trajetória de referência.

#### 4.5.1 Representação direta da trajetória de referência na interface gráfica

A representação da trajetória de referência, que está representada na Figura 14, é realizada em consequência da escolha do exercício. Quando o utilizador escolhe um dos exercícios, ao premir o botão correspondente da interface, se o sistema se encontrar no estado “INIT” ou “WAITING”, para além do método `setHaptic_a()` (detalhada na Secção 4.4.1.1), também é executado o método `refresh()` que após executar a função `clearPlottables()` (disponibilizada pela biblioteca *QCustomplot*) para limpar o *plot*, percorre a matriz *optimal*, cria uma curva (*optimalCurve*), preenche-a com as coordenadas armazenadas na matriz *optimal* e representa essa curva no *plot*.

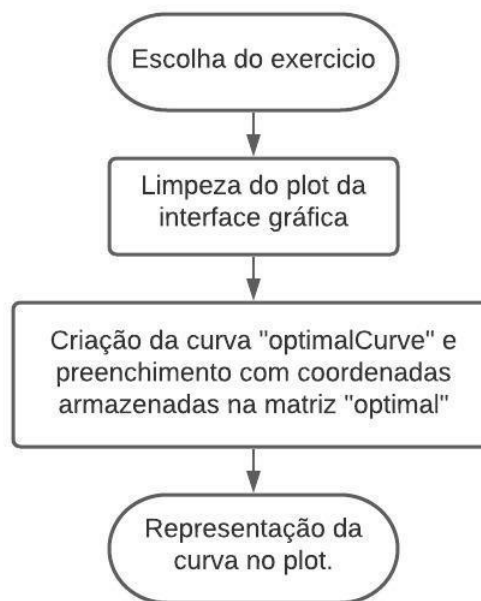


FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DIRETA DA TRAJETÓRIA DE REFERÊNCIA NO PLOT.

Ao utilizar o botão “reproduzir assinatura” a sequência de processos realizados é idêntica à descrita anteriormente, se o utilizador já tiver registado previamente a trajetória.

Quando o utilizador pressiona o botão “registar assinatura”, a trajetória anteriormente representada é apagada mediante a utilização da função `cle()` que executa a função `clearPlottables()` para remover as curvas associadas ao *plot* e a função `replot()` para atualizar o *plot*.

#### 4.5.2 Representação da trajetória real

Como já referido, o *servo loop* tem uma taxa de atualização de 1000Hz e é a essa taxa que são obtidas as coordenadas da posição da extremidade do dispositivo. No entanto, a atualização do *plot* da interface gráfica deverá ser realizada a uma taxa muito menor, pois para além do nosso cérebro não ser capaz de distinguir taxas de atualização tão elevadas, também tornaria o sistema muito lento.

Consequentemente, é utilizada uma *callback* assíncrona que, a cada iteração do *servo loop* (se o exercício estiver na fase de execução), regista na matriz caminho a posição atual da extremidade do dispositivo e atualiza o valor da variável “histCounter” (setHistCounter()) que mantém o registo do número de posições registadas.

Foi configurado um temporizador que invoca a função update() a cada 33ms (correspondendo a 30Hz). A função update(), por sua vez, executa duas outras funções, a atualizaGrafico() e a checkClean(). Nesta secção apenas vai ser abordada a função atualizaGrafico() pois é a função que realiza a representação da trajetória real.

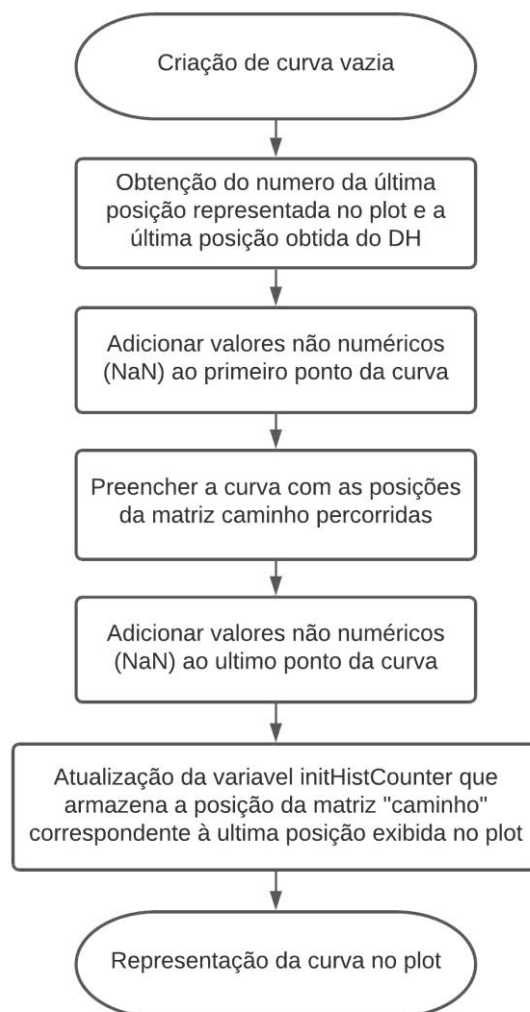


FIGURA 15 - FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO ATUALIZA Grafico().

Na Figura 15 está representado o fluxograma da função atualizaGrafico() e a sua descrição em baixo.

- Criação de uma curva vazia (letterCurve)
- preenchimento da curva criada com as coordenadas das posições da matriz “caminho” compreendidas entre, a última posição representada no plot (getInitHistCounter()) e a última posição do DH lida, “histCounter”, (getHistCounter()).
- Preenchimento da primeira e última posição da curva com valores não numéricos, de maneira a não unir as extremidades da curva à origem.
- Atribuição do valor da variável “histCounter” à variável “initHistCounter” (setInitHistCounter()) que armazena agora a posição matriz “caminho” correspondente à última posição representada no gráfico.
- Representação da curva criada no *plot*.

#### 4.5.3 Apagar a trajetória real para novo ensaio

De maneira a apagar a trajetória efetuada sem ser necessário escolher uma nova, o que é bastante útil quando é necessário repetir um ensaio, foi decidido que seria vantajoso implementar essa funcionalidade no botão 2 da caneta. Para o efeito, foi criado um booleano, denominado de *cleaning*, cujo valor é alterado para verdadeiro como consequência de premir o botão 2 da caneta. Assim, sempre

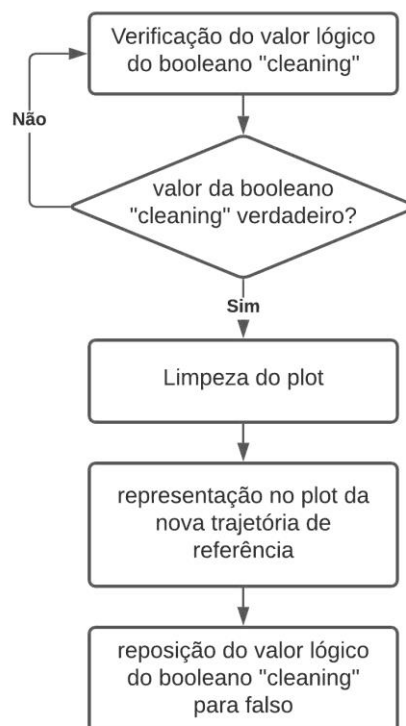


FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO CHECKCLEAN().

que o temporizador dispara, como já foi referido anteriormente, este executa a função *update()*, que por sua vez invoca a função *atualizaGrafico()* e a *checkClean()*. Contudo, para o *refresh* das trajetórias, apenas é utilizada a função *checkClean()* cujo fluxograma está representado na Figura 16.

A função *checkClean()* verifica o valor do booleano *cleaning* e se este for verdadeiro executa a função *cle()* que apaga as trajetórias representadas *plot* da interface gráfica. Representa a nova trajetória de referência, armazenada na matriz “optimal”, no *plot*, executando a função *refresh()* e por fim altera o valor do booleano “cleaning” para falso (*setCheckCleaning()*)

#### 4.6. Parâmetros da trajetória

Antes da escolha do ensaio a realizar é necessário selecionar o fator de ampliação da letra ou forma a treinar, e o tempo de execução, se utilizado o modo guiado. Se utilizado o modo semi-guiado, apenas é necessário selecionar o fator de ampliação.

Todas as trajetórias originais utilizadas neste sistema têm dimensões semelhantes, na ordem dos 2 milímetros, o que permite utilizar o mesmo fator de ampliação para qualquer programa escolhido. A escolha do fator de ampliação é efetuada com recurso a um controlo deslizante (*slider*). A ampliação da trajetória consiste na multiplicação de cada coordenada da trajetória pelo fator de ampliação escolhido.

A regulação do tempo de execução é um pouco mais complexa. O *servo loop* tem uma taxa de atualização de aproximadamente 1000 Hz, o que significa que em 1 segundo este percorre 1000 posições trajetória de referência. Para regular o tempo de execução, a estratégia utilizada foi a de criar uma função que acrescenta posições intermédias igualmente espaçadas, possibilitando a regulação do tempo de execução de cada ensaio sem diminuir a velocidade de atualização do *servo loop*, o que tornaria o *feedback* de força instável. No anexo A é descrito o algoritmo da regulação do tempo em detalhe.

#### 4.7. Mecanismo de controlo

No decorrer deste trabalho foi utilizado um controlador P (proporcional) para controlo da posição, cujo diagrama está representado na Figura 17.



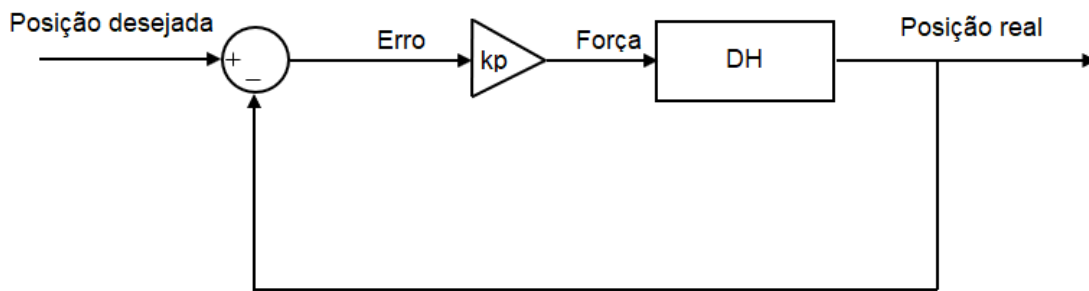


FIGURA 17 - CONTROLADOR PROPORCIONAL.

O controlador proporcional segue a equação abaixo representada, onde  $F$  representa a força calculada,  $pos_d$  corresponde à posição desejada,  $pos_{atual}$  representa a posição atual, e  $K_p$  o ganho proporcional. Na equação a baixo,  $(pos_d - pos_{atual})$ , representa o erro de posição.

$$F = K_p \cdot (pos_d - pos_{atual})$$

#### 4.8. Modos de orientação

No sistema desenvolvido foram implementados dois modos de orientação distintos, o modo guiado em que o indivíduo é guiado pela trajetória ponto por ponto, e o modo semi-guiado, no qual não são aplicadas forças tangenciais, o que permite que o indivíduo percorra a trajetória à velocidade que pretende e inverta o seu sentido, não estando sujeito a forças, a menos que se desvie da trajetória de referência. Como no modo guiado o indivíduo é orientado ponto por ponto, o tempo de execução da trajetória é estipulado pelo algoritmo, tendo o utilizador a capacidade de o modificar consoante as necessidades.

Ambos os modos de orientação são compostos por duas fases: a fase de aproximação que é idêntica em ambos e a fase da execução. Como o próprio nome indica, a fase de aproximação é a fase inicial em que o dispositivo háptico se aproxima lentamente da posição inicial da trajetória. Esta fase é essencial pois permite ao utilizador começar o ensaio em qualquer parte do *workspace* sem estar sujeito a um movimento brusco. Quando o dispositivo se encontra a menos de 0.2mm da posição inicial é atribuído o valor lógico de verdadeiro ao booleano “*flag*”, sinalizando que o dispositivo está agora na fase de execução.

#### 4.8.1 Modo guiado

No modo guiado, cujo fluxograma está representado na Figura 18 a cada iteração, é necessário obter posição atual do dispositivo e utilizar um contador que registre o número da iteração do *servo loop* a partir de quando foi iniciada a segunda fase (de maneira a ser possível identificar a posição desejada da trajetória de referência). O dispositivo percorre a matriz de referência e assume como posição desejada as coordenadas que se encontram na linha correspondente ao valor do contador.

A força a enviar para o dispositivo é então calculada utilizando o controlador proporcional com um ganho igual 0.9 e armazenada no vetor `m_effectForce`, que será lido pela callback `endUpdateCallback()` e enviado para o dispositivo. Quando o valor do contador atinge o número de pontos da trajetória de referência, o algoritmo termina o cálculo da força e o vetor enviado para o dispositivo passa a ser nulo.

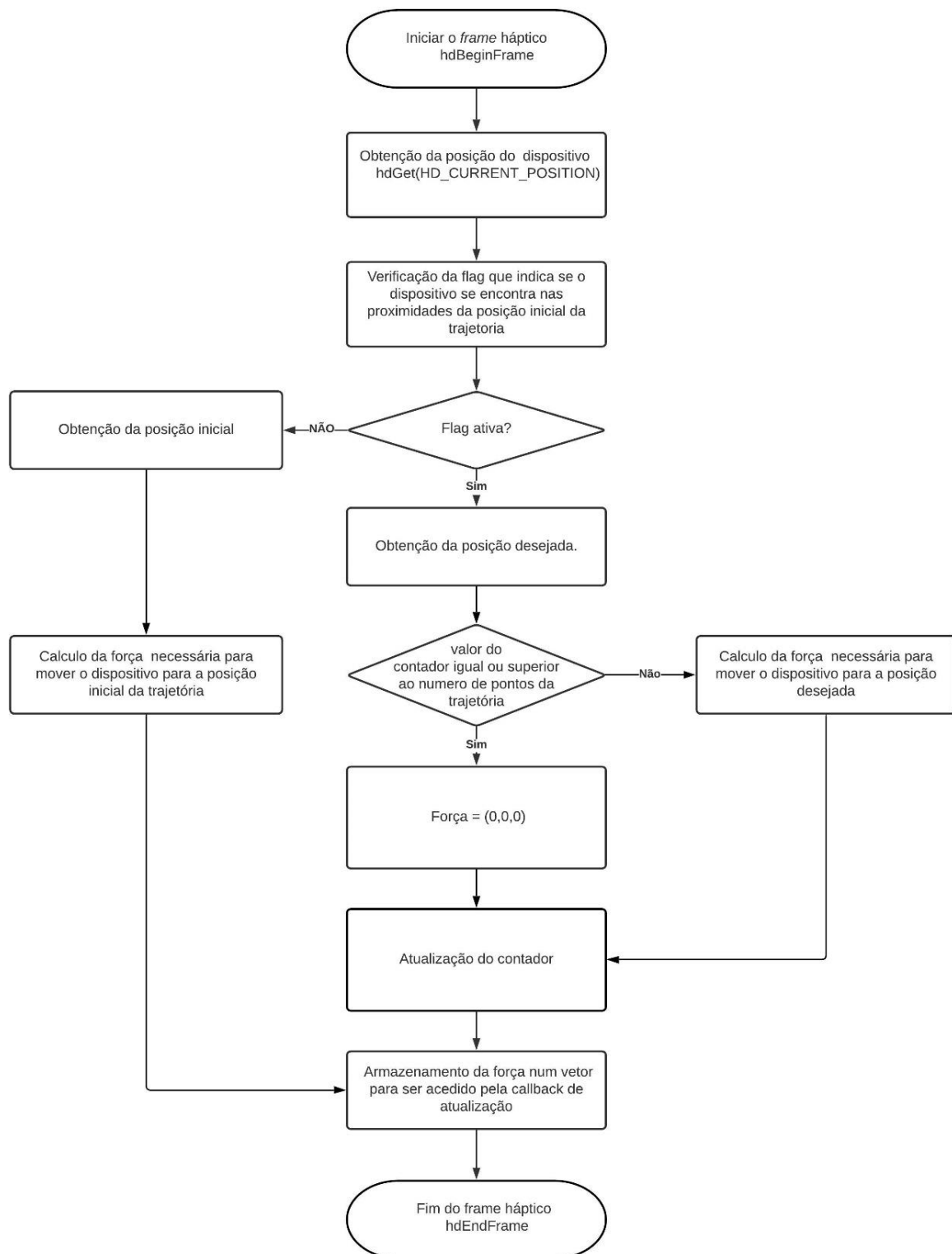


FIGURA 18 - CALLBACK DO ALGORITMO DO MODO GUIADO

#### 4.8.2 Modo semi-guiado

No modo semi-guiado, exibido na Figura 19 a cada iteração a posição desejada é a posição mais próxima da posição atual do dispositivo. Para obter essa posição, foi criada uma função que percorre a matriz que armazena o percurso de referência, calcula a distância entre cada ponto do percurso e a posição atual do dispositivo, e devolve o ponto que corresponde à menor. À semelhança do modo guiado, a força é calculada utilizando o controlador proporcional.

Devido à elevada taxa de atualização do *servo loop*, quando o dispositivo se desloca sobre o percurso, este aparenta mover-se livremente. Na realidade, estão a ser aplicadas forças de intensidade muito baixa que o atraem para o ponto mais próximo do percurso. Como a posição desejada é atualizada a 1000Hz, a menos que o indivíduo se desvie do percurso de referência, por muito rápido que este se movimente, a distância entre a posição desejada e a posição atual do dispositivo deverá ser sempre menor que 0.5mm.

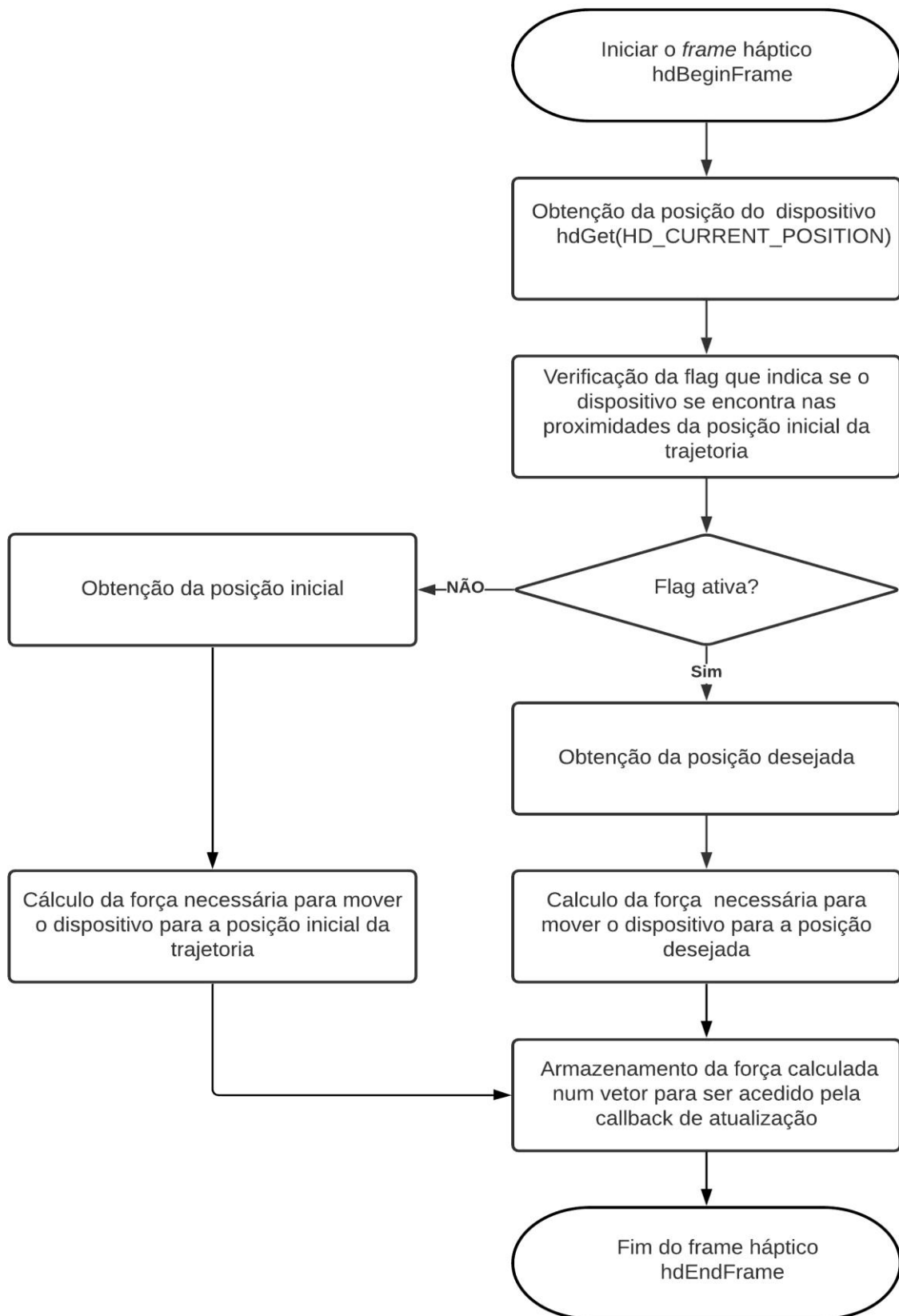


FIGURA 19 - CALLBACK DO ALGORITMO DO MODO SEMI-GUIADO.

## 4.9. Exercícios da escrita desenvolvidos

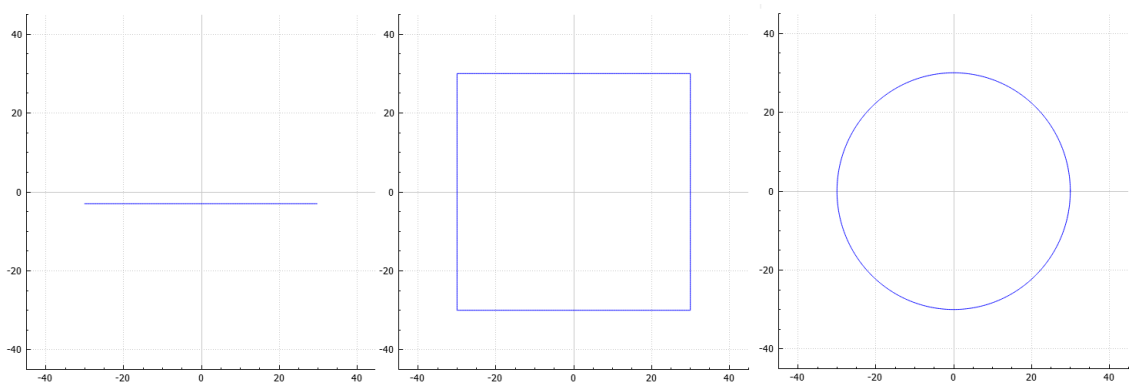
As trajetórias dos exercícios da mão, compostas por coordenadas (x,y,z), foram desenvolvidas com recurso ao Matlab, e armazenadas em ficheiros CSV (*comma separated values*). Foram desenvolvidos vários exercícios de dificuldade crescente:

- trajetórias de formas geométricas simples que permitem a adaptação do utilizador ao hardware e software do sistema e para corresponder às limitações das pessoas mais incapacitadas.
- exercícios de reprodução de letras
- exercício que permite ao utilizador treinar a assinatura,

Sendo que este último, poderá ser utilizado para treinar qualquer tipo de letra ou frase que o terapeuta desejar gravar.

### 4.9.1 Exercícios de adaptação

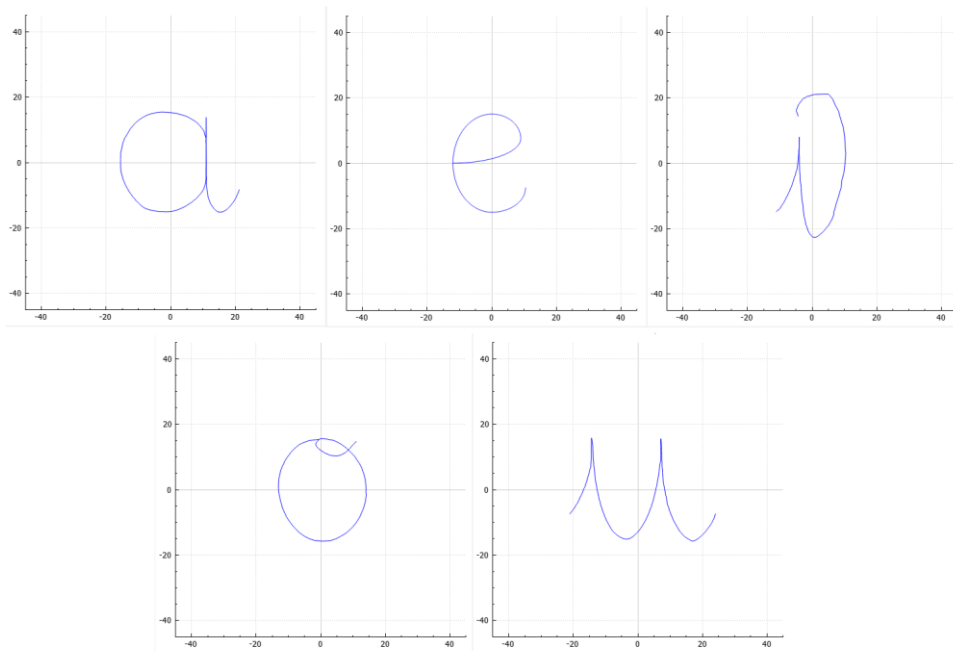
Com o objetivo de promover a adaptação ao hardware e software do sistema, foram também implementados exercícios simples de formas geométricas, nomeadamente um segmento de reta, um quadrado e um círculo, exibidos na Figura 20. É possível escolher entre os dois modos de orientação, sendo que, quando selecionado o modo guiado é possível regular a dimensão da trajetória e o tempo de execução do exercício, de maneira a adaptar o exercício às necessidades do utilizador.



**FIGURA 20 - TRAJETÓRIAS DE EXERCÍCIOS DE FORMAS GEOMÉTRICAS DESENVOLVIDAS**

## 4.9.2 Exercícios para treino de letras

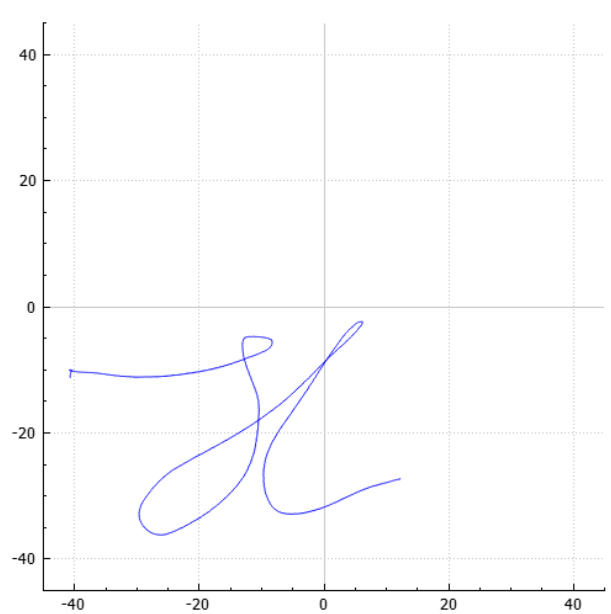
Para treinar a escrita das letras, foram escolhidas as 5 vogais, pelo facto de serem normalmente as primeiras letras aprendidas pelas crianças. Também nestes exercícios é possível escolher entre um dos dois modos de orientação, regular a dimensão das letras e o seu tempo de execução quando escolhida o modo guiado, pois como explicado anteriormente, no caso do modo semi-guiado, o utilizador é que decide quando terminar o exercício ao pressionar o botão 2 da caneta. As trajetórias dos exercícios das letras desenvolvidos estão representadas na Figura 21.



**FIGURA 21 -TRAJETÓRIAS DOS EXERCÍCIOS DAS LETRAS.**

### 4.9.3 Exercício para treino da assinatura

O exercício de treino de assinatura consiste na reprodução de uma assinatura registada previamente. Este exercício está restringido ao modo guiado pois normalmente a assinatura apresenta uma forma complexa demais para o individuo beneficiar do tipo de exploração que o modo semi-guiado permite. Este exercício foi desenvolvido para o treino da assinatura, mas pode ser utilizado para treinar qualquer palavra ou letra que o utilizador registre.

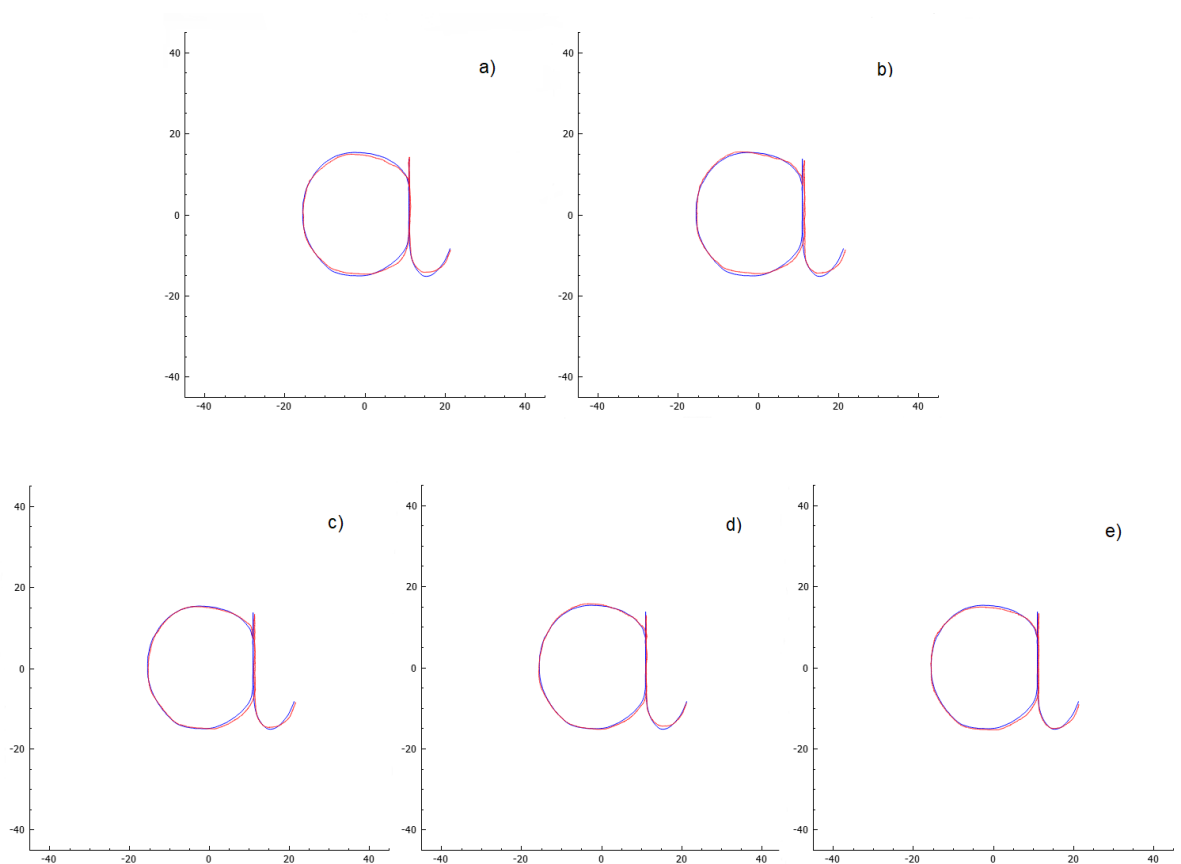


**FIGURA 22 - EXEMPLO DE ASSINATURA REGISTRADA**

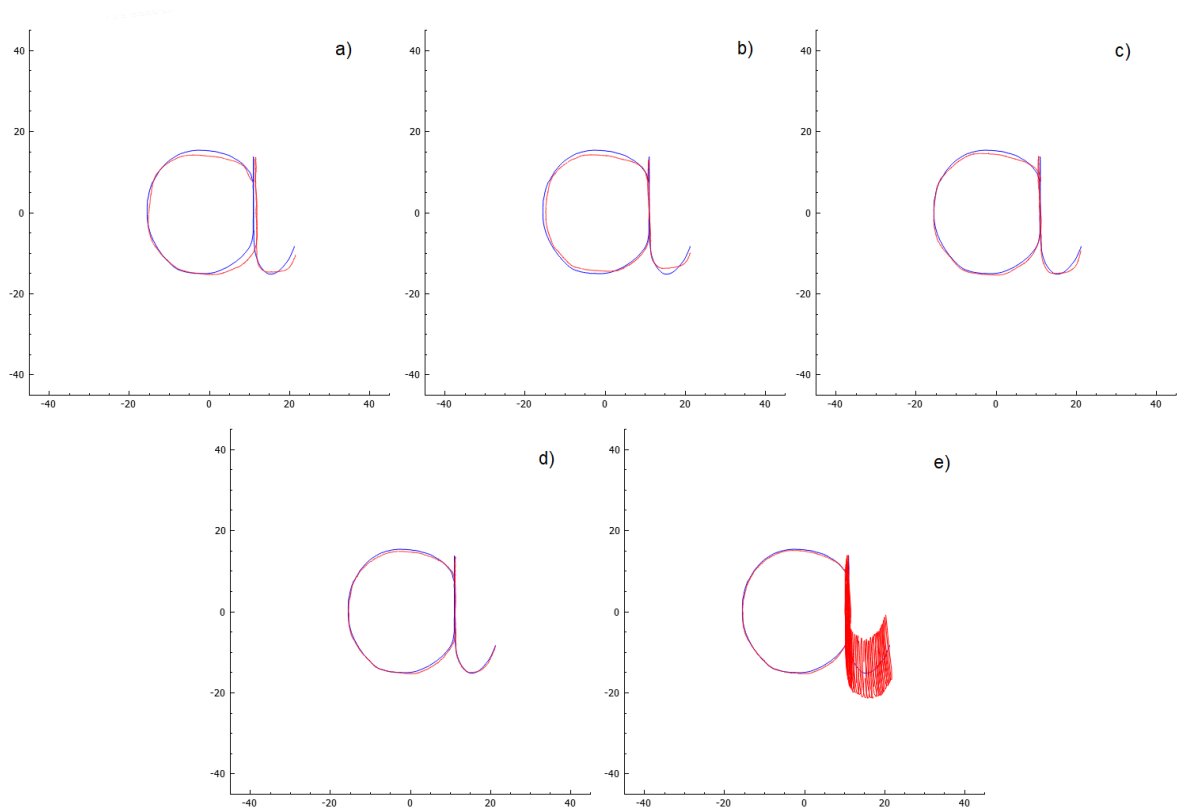


## 4.10. Ajuste de parâmetros do sistema

Como indicado na seção 4.7 foi utilizado um controlador proporcional para controlar o dispositivo háptico. A partir de experimentação concluiu-se que como valor do ganho proporcional podia ser utilizada a gama de valores compreendida entre 0.7 e 1.1 (Figura 23). Foi ainda possível verificar que quando o ganho proporcional toma valores abaixo de 0.6 (Figura 24) as forças calculadas são insuficientes para fazer uma reprodução fiel da letra trajetória e acima de 1.2 começa a ser notório o efeito de *overshooting* (Figura 24) que para além de diminuir a fluidez do movimento ainda o torna instável quando assume valores elevados.



**FIGURA 23 - EXERCÍCIOS DA LETRA "A" EXECUTADOS COM GANHOS PROPORCIONAIS VÁLIDOS (A=0,7; B=0,8; C=0,9; D=1,0; E=1,1), A VERMELHO ESTÁ REPRESENTADA A TRAJETÓRIA REALIZADA PELO INDIVÍDUO E A AZUL A TRAJETÓRIA DE REFERÊNCIA.**



**FIGURA 24 - EXERCÍCIOS DA LETRA "A" REALIZADOS COM GANHOS INVÁLIDOS (A=0.4; B=0.5; C=0.6; D=1.2; E=1.3)**

## 4.11. Experiências de validação

Para testar o sistema proposto, foram realizados 2 treinos (letra “a” e letra “o”), cada um composto por 2 sessões. Os treinos foram realizados com a mão não-dominante de maneira a diminuir a familiarização com as letras treinadas.

As sessões de treino foram compostas por 9 ensaios de treino realizados sob o modo guiado e 6 testes realizados sem *feedback* háptico. Dos 6 testes realizados 3 foram executados antes dos ensaios de treino e os outros 3 realizados após os ensaios de treino. Nesta secção apenas vão ser exibidos 3 dos ensaios de treino para cada sessão, os resultados para os restantes ensaios de treino podem ser encontrados no anexo B.

### 4.11.1 Resultados

Nas Figuras 25 e 26 estão exibidas as trajetórias para 3 dos ensaios 9 de treino, e os testes que compõem a primeira sessão de treino da letra “a” respetivamente. Os restantes 6 ensaios de treino podem ser encontrados no anexo B. Enquanto que nas Figuras 27 e 28 estão exibidas as 3 trajetórias dos 9 ensaios de treino e os testes que compõem a primeira sessão de treino da letra “o”.

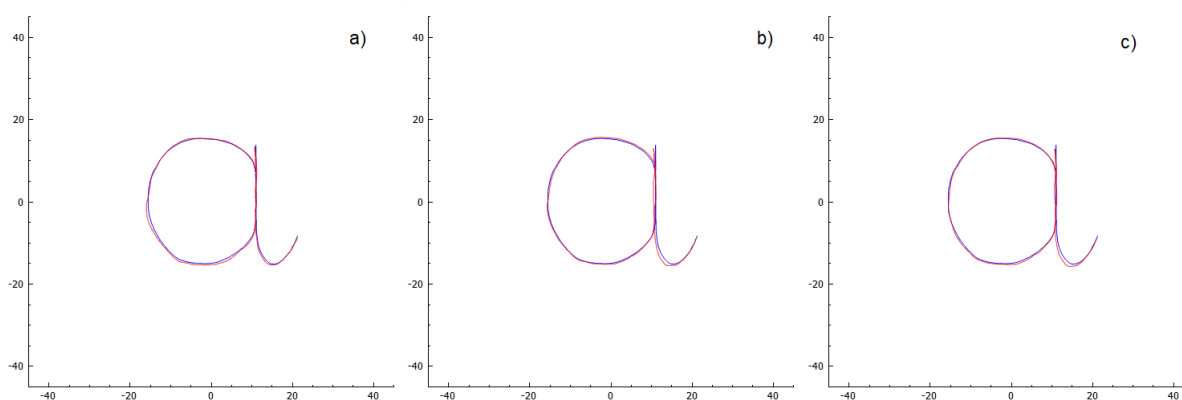
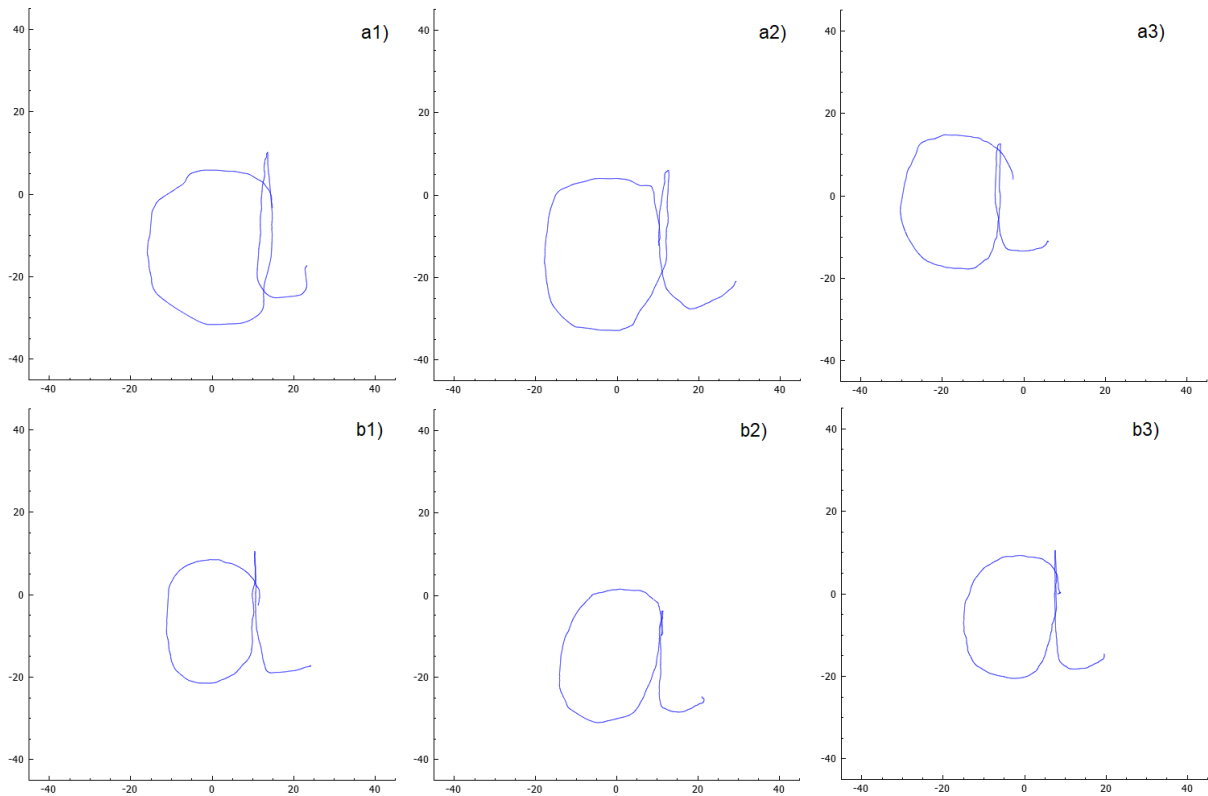
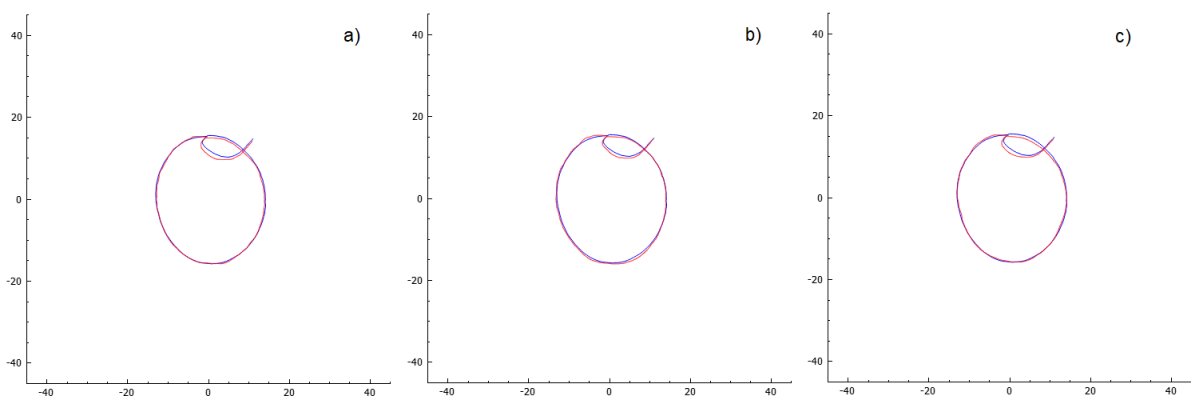


FIGURA 25 – TRAJETÓRIAS DE 3 DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA PRIMEIRA SESSÃO, DA LETRA "A".

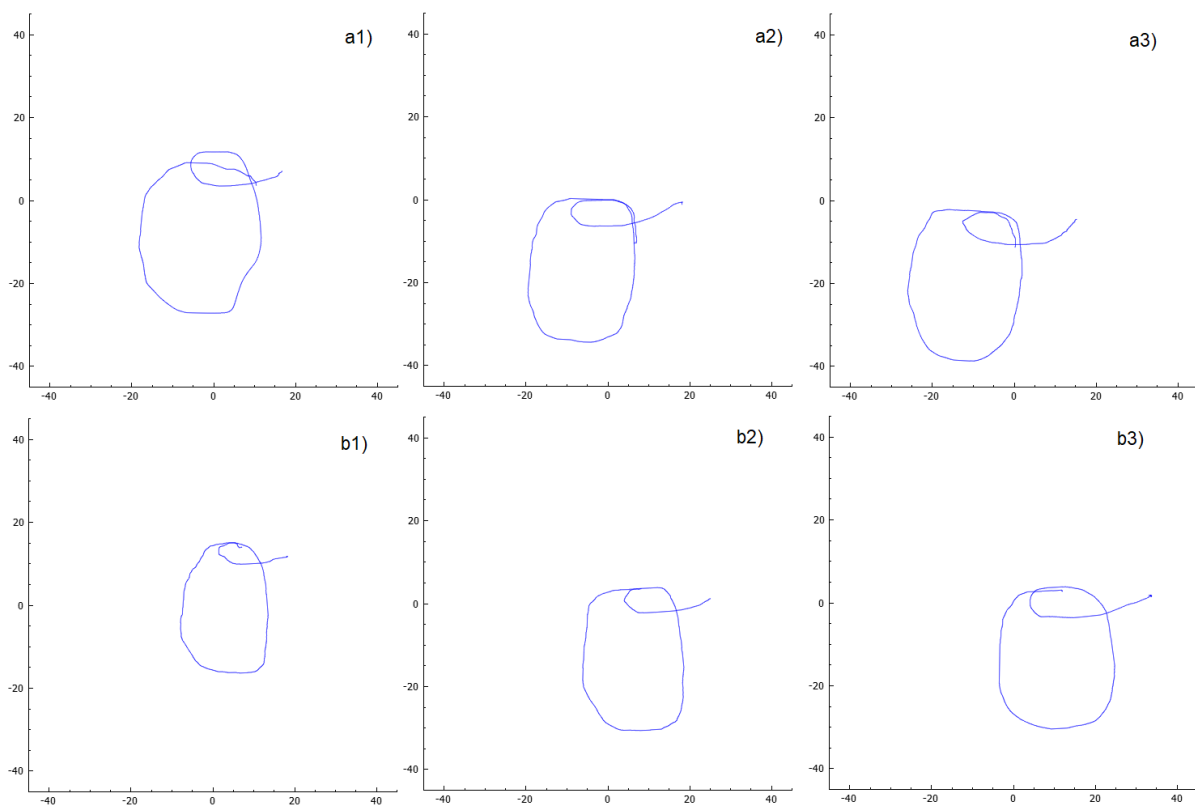
Na figura 29 a 32 estão representadas as trajetórias realizadas durante a segunda sessão de treinos. Nas Figuras 29 e 30 estão exibidas as trajetórias para 3 dos ensaios 9 de treino, e os testes que compõem a primeira sessão de treino da letra “a” respetivamente. Enquanto que nas Figuras 31 e 32 estão exibidas as 3 trajetórias dos 9 ensaios de treino e os testes que compõem a primeira sessão de treino da letra “o”.



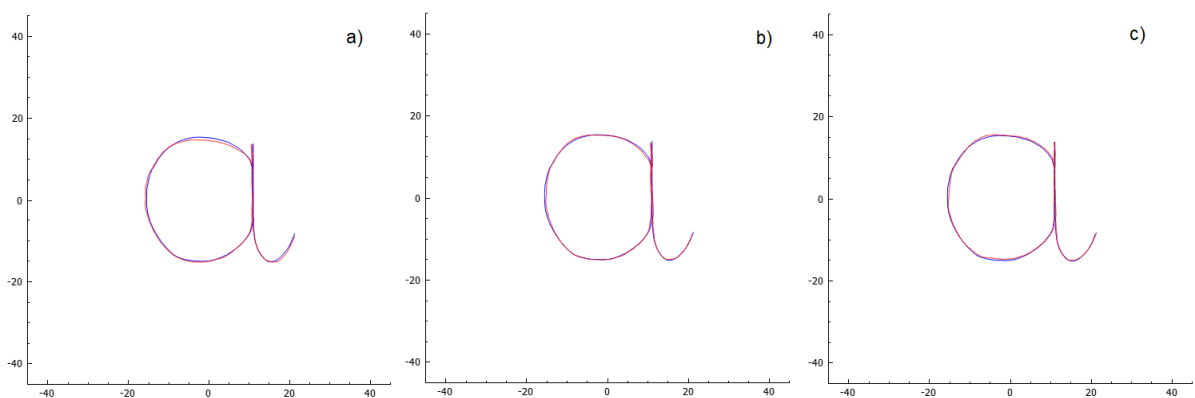
**FIGURA 26 – TRAJETÓRIAS DOS TESTES DA PRIMEIRA SESSÃO DE TREINO DA LETRA "A" (A1, A2 E A3 - PRÉ-TREINO; B1, B2, B3 - PÓS-TREINO).**



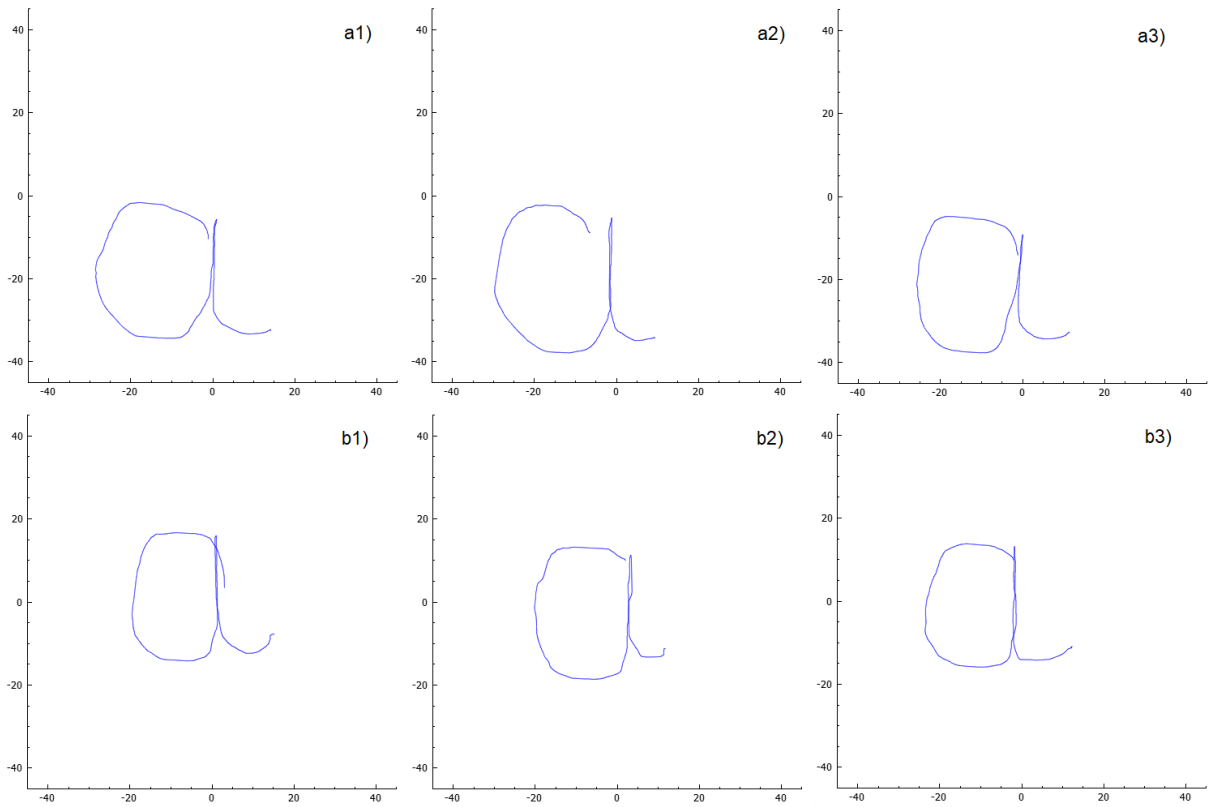
**FIGURA 27 -TRAJETÓRIAS DE 3 DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA PRIMEIRA SESSÃO DA LETRA "O".**



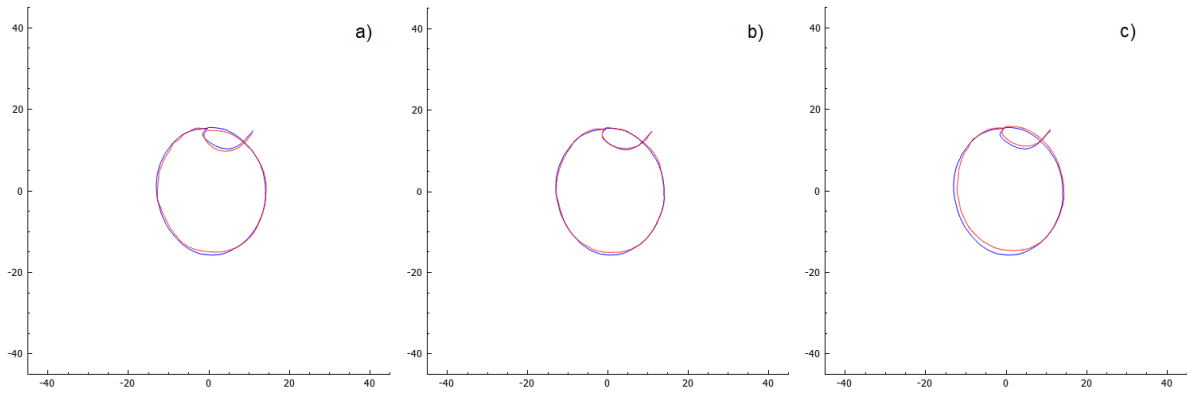
**FIGURA 28 - TRAJETÓRIAS DOS TESTES DA PRIMEIRA SESSÃO DE TREINO DA LETRA "O" (A1, A2 E A3 - PRÉ-TREINO; B1, B2, B3 - PÓS-TREINO).**



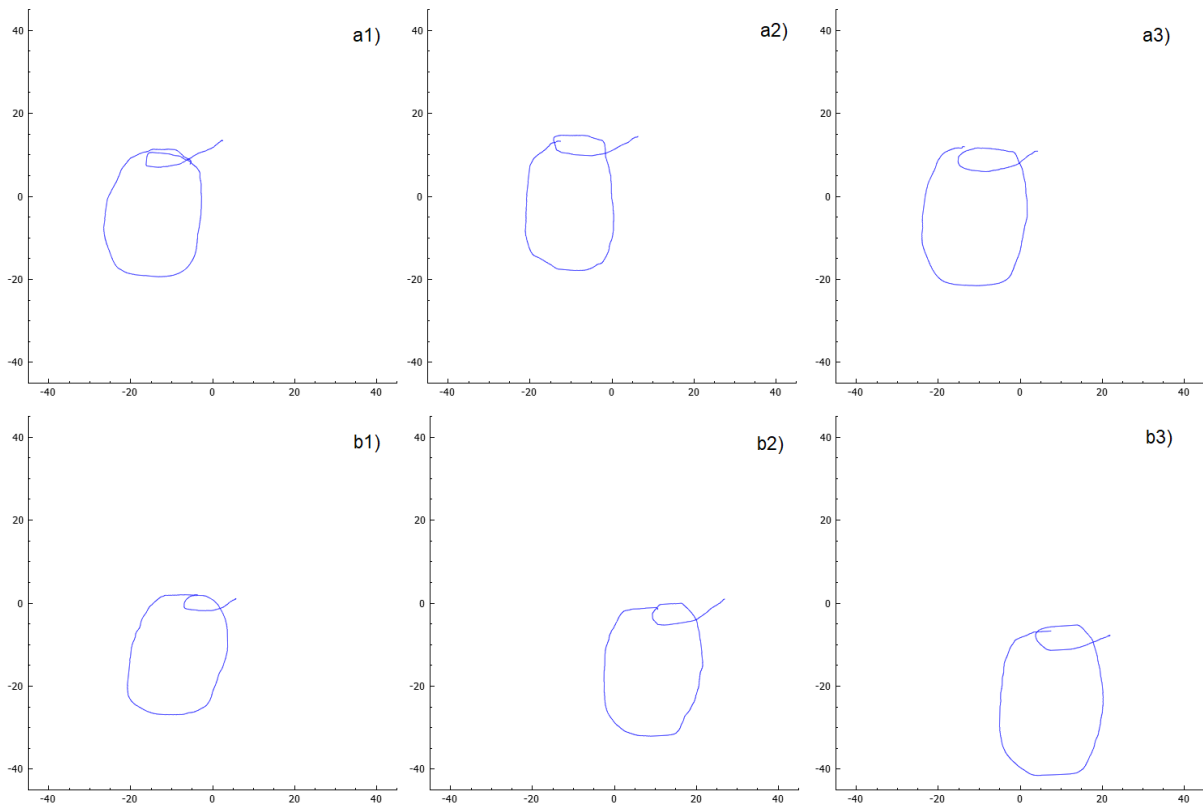
**FIGURA 29 – TRAJETÓRIAS DE 3 DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA SEGUNDA SESSÃO, DA LETRA "A".**



**FIGURA 30 - TRAJETÓRIAS DOS TESTES DA SEGUNDA SESSÃO DE TREINO DA LETRA "A" (A1, A2 E A3 - PRÉ-TREINO; B1, B2, B3 - PÓS-TREINO).**



**FIGURA 31 - TRAJETÓRIAS DE 3 DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA SEGUNDA SESSÃO, DA LETRA "O".**



**FIGURA 32 - TRAJETÓRIA DOS TESTES DA SEGUNDA SESSÃO DE TREINO DA LETRA "O" (A1, A2 E A3 - PRÉ-TREINO; B1, B2, B3 - PÓS-TREINO).**

#### 4.11.2 Discussão

Analisando os resultados das experiências de validação, é possível verificar que em todas as sessões de treino, os testes pós-treino obtiveram melhores resultados que os teste pré-treino em termos de correspondência da forma entre a trajetória de referência e a trajetória realizada pelo individuo, no entanto é possível verificar que as trajetórias realizadas durante o treino, quando estava presente o *feedback* háptico apresentam resultados nitidamente melhores que os resultados apresentados durante os testes, quando não estava presente o *feedback* háptico, para além disso é possível ainda verificar que a variação entre as trajetórias de treino é mínima quando comparada com as trajetórias dos testes (pré e pós treino). A combinação destes resultados leva a concluir que, embora o *feedback* háptico tenha produzido bons resultados, a correspondência da forma durante o treino é insuficiente para inferir sobre o progresso do aluno.



## 5. Conclusões e trabalho futuro

### 5.1. Conclusão

O propósito da presente dissertação é o desenvolvimento de um sistema háptico de treino da escrita à mão que seja facilmente modificável, o que permite a adição de novas funcionalidades ao sistema. Assim espera-se que este sistema possa ser utilizado em futuros trabalhos no sentido de tornar o sistema numa ferramenta completa e autónoma, capaz de avaliar qualitativamente e quantitativamente a qualidade de escrita do utilizador e inferir sobre a fase de aprendizagem em que este se encontra de maneira a fornecer o tipo de *feedback* háptico mais adequado às necessidades do indivíduo, complementando a função de um terapeuta.

O sistema desenvolvido permite executar 3 tipos de exercícios com diferentes níveis de dificuldade, fornecendo dois modos de *feedback* háptico: guiado e semi-guiado.

Para além do *feedback* háptico, o sistema fornece também *feedback* visual através de uma interface gráfica que exhibe a trajetória de referência sobreposta pela trajetória real efetuada pelo utilizador. Este estímulo visual é muito importante pois permite que o indivíduo compare a sua trajetória com a trajetória de referência, tendo consciência do progresso alcançado.

Em suma, o sistema desenvolvido permite o treino da escrita à mão e reduz o grau de dependência no que diz respeito à intervenção do terapeuta. O terapeuta continua a ser necessário, nomeadamente para a decisão quanto ao tipo de *feedback* a utilizar e para que se possa efetuar o registo de uma assinatura, de forma a que seja reproduzida e para que seja feita uma avaliação do progresso do utilizador. No entanto é agora possível que um terapeuta acompanhe e auxilie vários alunos ao mesmo tempo diminuindo os custos da terapia tradicional. Por fim, o sistema em causa é bastante promissor e as perspetivas futuras de o tornar num pacote completo de apoio à aprendizagem da escrita tornam-no bastante interessante, apesar da sua eficácia não ter sido verificada em crianças e pessoas debilitadas, devido à situação atual de pandemia por Covid-19.

### 5.2. Limitações e Trabalho Futuro

Para atingir o propósito de desenvolver um sistema autónomo que consista num pacote completo para o ensino da escrita e que não necessite da intervenção de um terapeuta, são necessárias várias melhorias. O sistema atual apenas fornece 2 tipos de *feedback* háptico, não executa qualquer tipo de avaliação de resultados, nem mantém o registo dos resultados dos exercícios entre sessões de treino, apenas estão disponibilizados exercícios referentes às vogais. Para além das limitações referentes ao software, também o dispositivo háptico tem limitações pois para além de apenas conter 3 dos seus 6 eixos ativos, a sua força máxima é de apenas 3.3N, dando a sensação de frágil

Para atingir os objetivos finais do sistema e colmatar as limitações atuais do mesmo são apresentadas as seguintes sugestões:

- Implementação de novos algoritmos de *feedback* háptico como a orientação háptica progressiva, perturbação háptica tipo ruído e perturbação háptica repulsiva.

- Desenvolvimento e implementação de um algoritmo capaz de avaliar a caligrafia e consequentemente inferir sobre as capacidades e necessidades do indivíduo.

- Consoante as necessidades do indivíduo, ser capaz de fornecer *feedback* háptico que maior apresenta melhores resultados.

- Implementação de uma base de dados que permita o armazenamento dos treinos realizados e que possa ser acessada através da internet de maneira a permitir a sua análise não só pelo indivíduo e os seus encarregados de educação, mas também por um terapeuta através do seu consultório.

- Utilização de um dispositivo háptico capaz de fornecer *feedback* de força nos 6 graus de liberdade disponíveis de maneira a tornar possível a utilização da caneta desenvolvida com o objetivo de proporcionar uma melhor experiência de utilização e mais semelhante com a realidade.

- Utilização de um dispositivo que seja capaz de fornecer uma maior força máxima, evitando a sensação de ser frágil.

- Realizar sessões de treino em crianças e indivíduos que por algum motivo tenham perdido a capacidade de escrever, de maneira a poder testar os modos de orientação já implementados bem como os modos sugeridos nesta secção.



## **Anexos**



## ANEXO A

```
void HapticManager::regulateTime(float t) //t(segundos);
{
    int nPointOriginal = getNumPontosOriginal();
    int time = t; //tempo de execução do exercicio
    double v = t * 1000 / (nPointOriginal-1);
    int vv = trunc(v); //parte inteira
    double vvv = v - vv; //parte decimal
    double firstover = vvv;
    double over = vvv; //variavel que mantem o registo do resto()
    int conta = 0; //variavel que regista a linha na matriz do ponto a acrescentar

    for (int i = 0; i < nPointOriginal; i++) {
        HDdouble diffx = coordenadas[i + 1][0] - coordenadas[i][0];
        HDdouble diffz = coordenadas[i + 1][2] - coordenadas[i][2];
        if (over < 1) {
            HDdouble dx = diffx / vv;
            HDdouble dz = diffz / vv;
            for (int l = 0; l <= vv; l++) { //troquei 0 +por 1
                coordenadasNew[conta][0] = coordenadas[i][0] + l * dx;
                coordenadasNew[conta][1] = coordenadas[i][1];
                coordenadasNew[conta][2] = coordenadas[i][2] + l * dz;
                conta++;
            }
            conta = conta - 1;
            over = over + firstover;
        }
        else {
            HDdouble dx = diffx / (vv + 1);
            HDdouble dz = diffz / (vv + 1);
            for (int j = 0; j <= vv + 1; j++) {
                coordenadasNew[conta][0] = coordenadas[i][0] + j * dx;
                coordenadasNew[conta][1] = coordenadas[i][1];
                coordenadasNew[conta][2] = coordenadas[i][2] + j * dz;
                conta++;
            }
            conta = conta - 1;
            over = over - trunc(over);
        }
    }
    for (int j = conta; j < MAXPontos; j++) {
        coordenadasNew[j][0] = 2000000;
        coordenadasNew[j][1] = 2000000;
        coordenadasNew[j][2] = 2000000;
    }
}
```

Figura 33 - Algoritmo responsável por regular o tempo de execução dos exercícios.

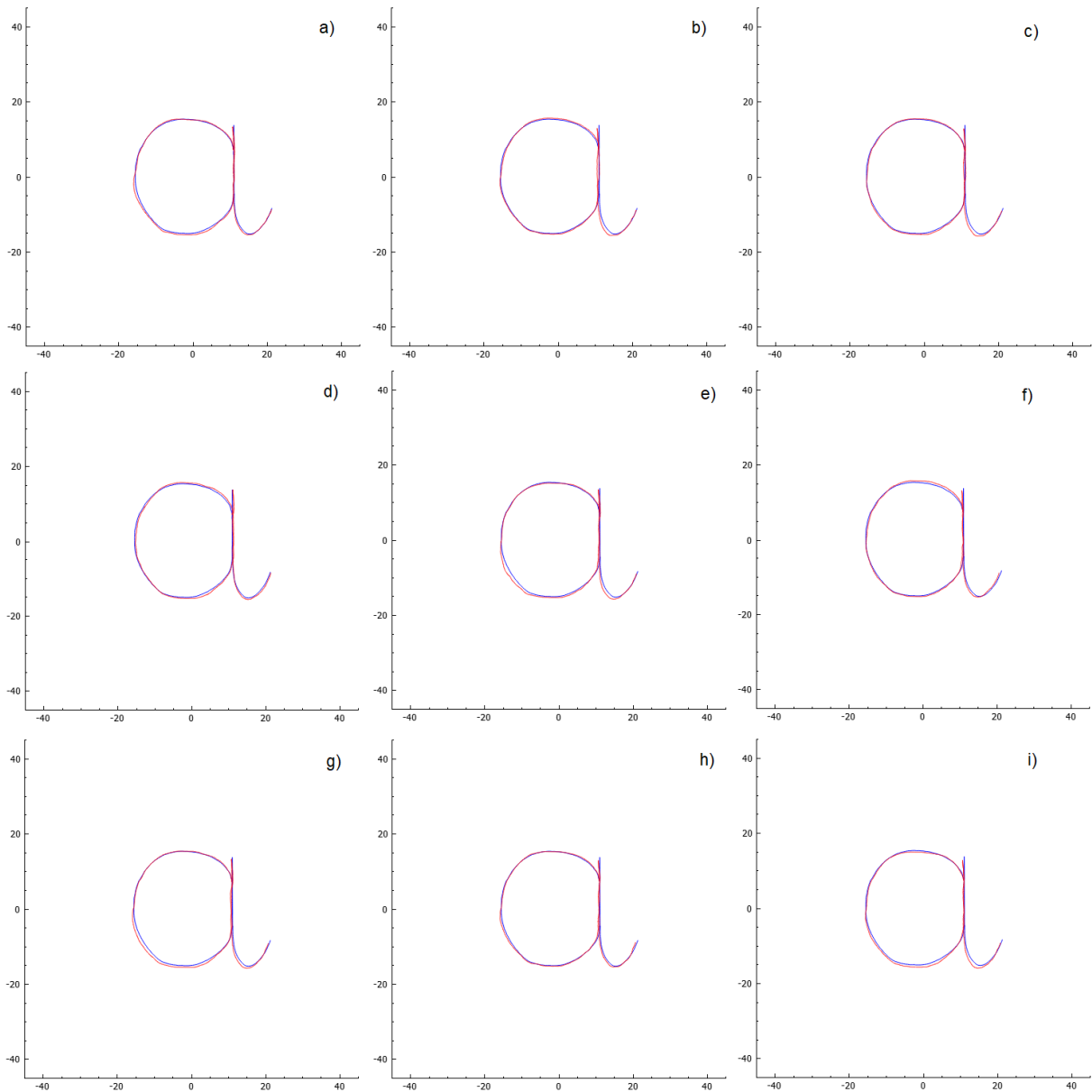
Na figura acima, está representada o método criado para regular o tempo de execução dos exercícios. Em primeiro lugar é calculada a relação entre o número de pontos da trajetória original menos um ( $n_{\text{PointOriginal}}-1$ ) e o número de pontos da trajetória pretendida ( $t*1000$ ). O valor da parte inteira dessa relação é atribuída à variável “vv” enquanto que a parte decimal é atribuída à variável “vvv”.

O algoritmo percorre as linhas da matriz e calcula a distância segundo o eixo x e a distância segundo o eixo z entre as coordenadas da posição em causa e a posição seguinte. Divide ambas as distâncias pela variável vv e acrescenta vv-1 pontos igualmente espaçados entre as duas posições. Na verdade são adicionados vv+1 pontos mas o primeiro e o último ponto coincidem com os pontos da trajetória original por isso não são considerados.

Como a probabilidade dessa razão ser um número natural é muito baixa, foi criada a variável “over” que armazena a parte decimal dessa razão e a cada linha da matriz original que é percorrida é lhe somado o valor inicial da parte decimal, “firstover”, quando o valor dessa variável é maior ou igual a uma unidade, são acrescentados vv pontos igualmente espaçados entre as duas posições.

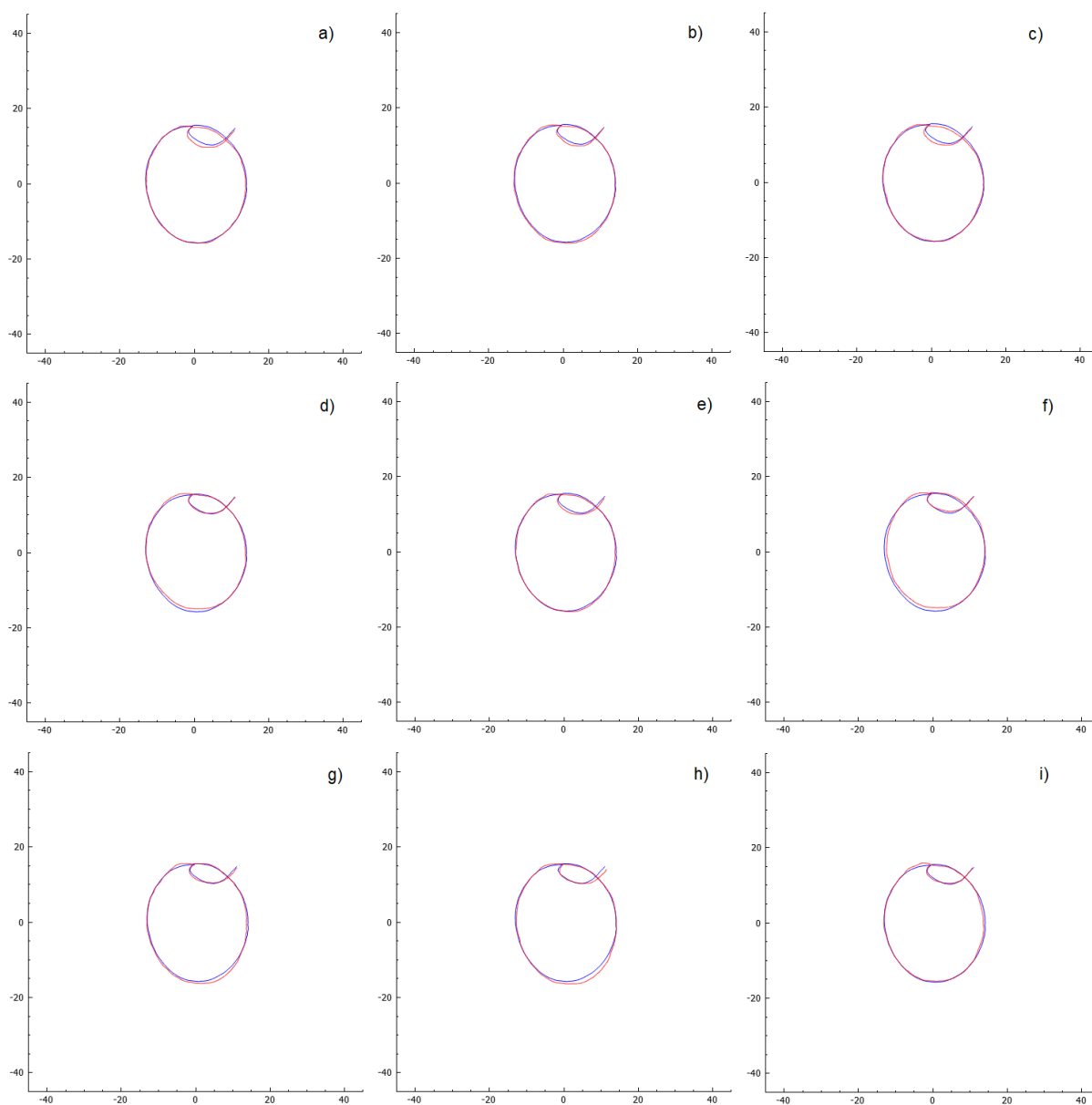
## Anexo B

As figuras contendo a todos os 9 ensaios de treino são aqui exibidas em 4 figuras.

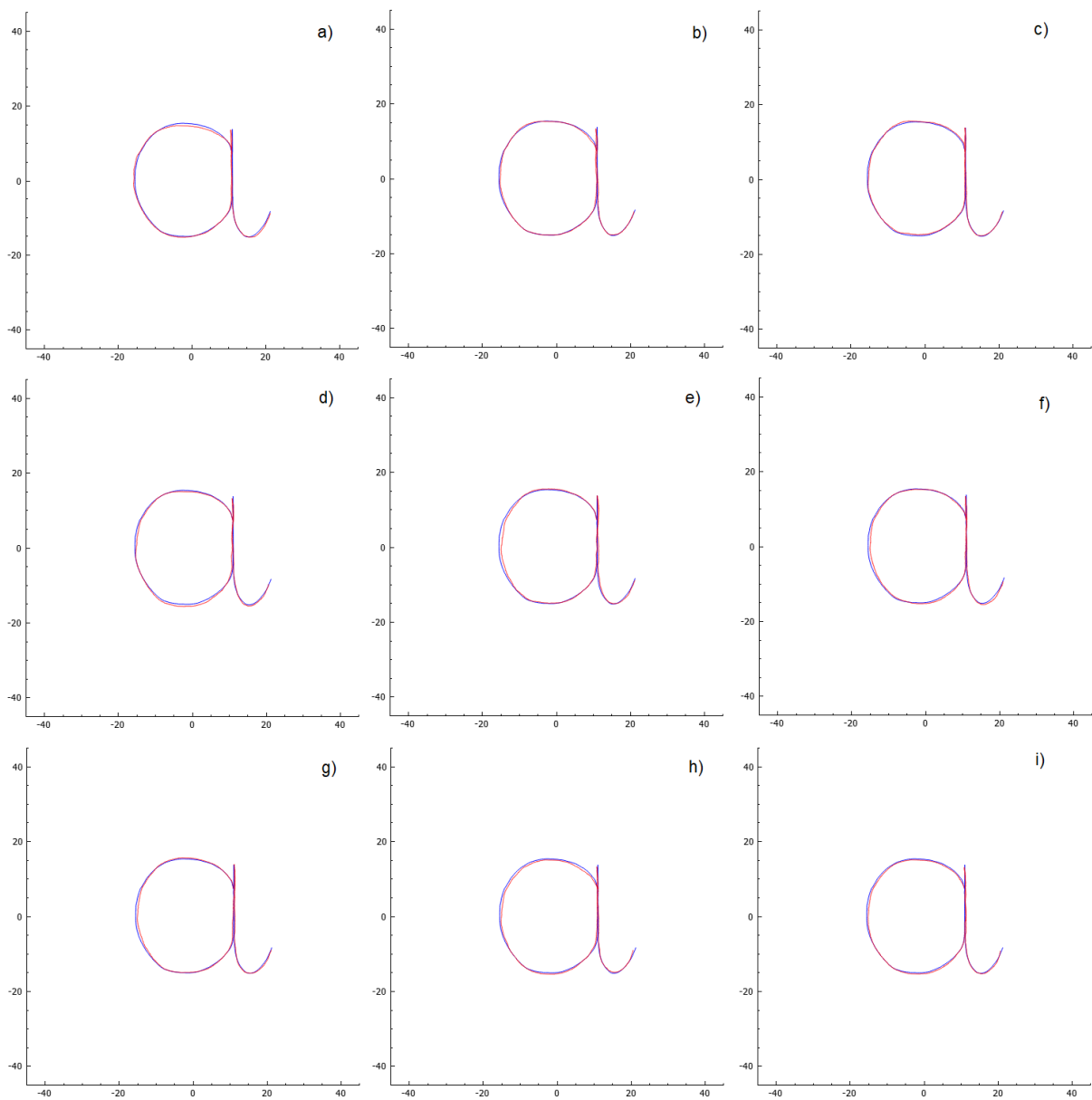


**FIGURA 34 - TRAJETÓRIAS DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA PRIMEIRA SESSÃO DA LETRA "A".**

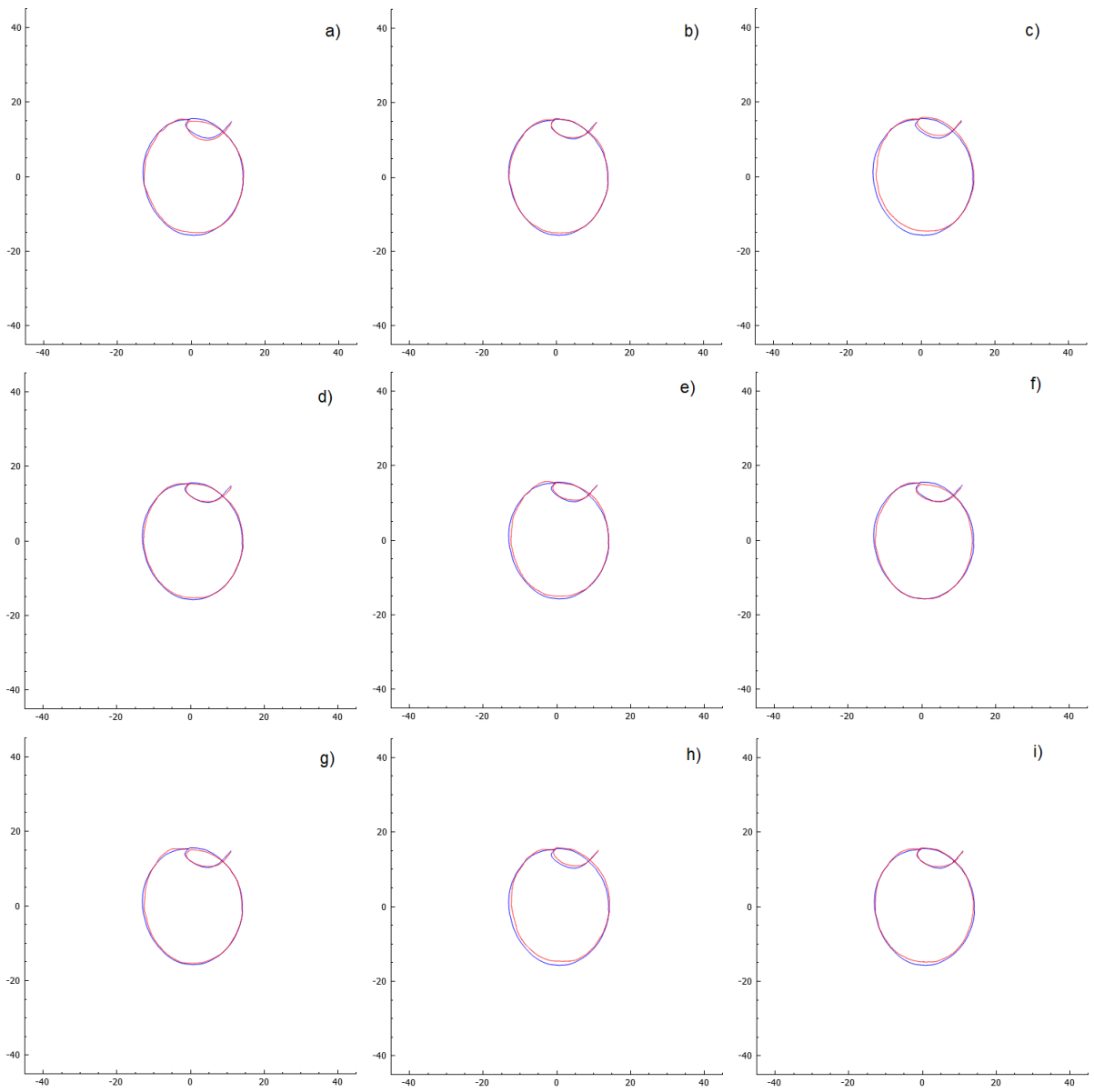




**FIGURA 35 - TRAJETÓRIAS DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA PRIMEIRA SESSÃO DA LETRA "O".**



**FIGURA 36 - TRAJETÓRIAS DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA SEGUNDA SESSÃO DA LETRA "A".**



**FIGURA 37 - TRAJETÓRIAS DOS 9 ENSAIOS DE TREINO DA SEGUNDA SESSÃO DA LETRA "O".**

## Bibliografia

- 3D Systems*. (2020). <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>
- Adams, J. A. (1971). *A CLOSED-LOOP THEORY OF MOTOR LEARNING*. 3(2), 111–150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Amin, M. M., Zaman, H. B., & Ahmad, A. (2013). Visual haptic approach complements learning process of Jawi handwriting skills. *2013 5th International Conference on Information and Communication Technology for the Muslim World, ICT4M 2013, March*. <https://doi.org/10.1109/ICT4M.2013.6518888>
- Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain: A Journal of Neurology*, 113 ( Pt 3, 749–766. <https://doi.org/10.1093/brain/113.3.749>
- Avizzano, C. A., Solis, J., Frisoli, A., & Bergamasco, M. (2002). Motor learning skill experiments using haptic interface capabilities. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 198–203. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2002.1045622>
- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, 30(4), 745–759. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.015>
- Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Haptics in learning to read with children from low socio-economic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(4), 643–663. <https://doi.org/10.1348/026151007X186643>
- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A. C., Chokron, S., & Degos, J. D. (2002). Visually- and motor-based knowledge of letters: Evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40(8), 1363–1371. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00209-3)
- Basteris, A., Bracco, L., & Sanguineti, V. (2012). Robot-assisted intermanual transfer of handwriting skills. *Human Movement Science*, 31(5), 1175–1190. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.12.006>
- Bayart, B., Pocheville, A., & Kheddar, A. (2005). An adaptive haptic guidance software module for I-TOUCH: Example through a handwriting teaching simulation and a 3D maze. *HAVE 2005: IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Their Applications, 2005*, 51–56. <https://doi.org/10.1109/HAVE.2005.1545651>
- Berninger, V. W., Vaughan, K. B., Abbott, R. D., Abbott, S. P., Rogan, L. W., Brooks, A., Reed, E., & Graham, S. (1997). Treatment of handwriting problems in beginning writers: Transfer from handwriting to composition. *Journal of Educational Psychology*, 89(4), 652–666. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.89.4.652>
- Bjork, R. A. (1994). Memory and Metamemory Considerations in the Training of Human Beings. *Metacognition, January 1994*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/4561.003.0011>
- Bjork, R., & Linn, M. (2006). The science of learning and the learning of science. *APS Observer*, 19(3), 2006–2007. [http://bjorklab.psych.ucla.edu/pubs/RBjork\\_Linn\\_2006.pdf%5Cnhttp://www.psychologicalscience.org/index.php/publications/observer/2006/march-06/the-science-of-learning-and-the-learning-of-science.html](http://bjorklab.psych.ucla.edu/pubs/RBjork_Linn_2006.pdf%5Cnhttp://www.psychologicalscience.org/index.php/publications/observer/2006/march-06/the-science-of-learning-and-the-learning-of-science.html)
- Blöte, A. W., & Hamstra-Bletz, L. (1991). A longitudinal study on the structure of handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 34, 983–994.
- Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., & Gentaz, E. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual

- tracking of trajectories. *PLoS ONE*, 3(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001775>
- Boroujeni, M. M., & Meghdari, A. (2009). Haptic device application in persian calligraphy. *Proceedings - 2009 International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2009*, 160–164. <https://doi.org/10.1109/ICCAE.2009.55>
- Bourdin, B. (2000). Is graphic activity cognitively costly? A developmental approach. *Reading and Writing*, 13(3/4), 183–196. <https://doi.org/10.1023/A:1026458102685>
- Burdea, G. C. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. John Wiley & Sons, Inc.
- Burdea, G. C., & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology* (J. W. & Sons (Ed.); second). John Wiley & Sons.
- Cadima, F., & Barreiros, J. (1997). *Percepção Cinestésica e Aprendizagem Motora* (pp. 81–95).
- Cesqui, B., Member, S., Aliboni, S., Mazzoleni, S., Member, M. C. C. A., Posteraro, F., Micera, S., & Member, S. (2008). *On the Use of Divergent Force Fields in Robot-Mediated*.
- Chao, L. L., & Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, 12(4), 478–484. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0635>
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'Année Psychologique*, 106(01), 43. <https://doi.org/10.4074/s0003503306001047>
- Chellali, A., Dumas, C., & Milleville, I. (2010). WYFIWIF: A haptic communication paradigm for collaborative motor skills learning. *Proc. of the IADIS Int. Conf. - Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, CGVCVIP 2010, Visual Commun., VC 2010, Web3DW 2010, Part of the MCCSIS 2010*, 301–308.
- Connolly, B. Y. K., Jones, B., & Jones, B. (1970). *A Development Study of Afferent-Reafferent Integration*.
- Danna, J., & Velay, J. L. (2015). Basic and supplementary sensory *feedback* in handwriting. *Frontiers in Psychology*, 6(FEB). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00169>
- Dias, G., Mendes, P. C., & Mendes, R. (2017). Aprendizagem e controlo motor no ténis. In *Estratégia, percepção e ação*. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-1286-7\\_6](https://doi.org/10.14195/978-989-26-1286-7_6)
- Eid, M. A., Mansour, M., El Saddik, A. H., & Iglesias, R. (2007). A haptic multimedia handwriting learning system. *Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition*, 103–108. <https://doi.org/10.1145/1290144.1290161>
- Emken, J. L., & Reinkensmeyer, D. J. (2005). Robot-enhanced motor learning: Accelerating internal model formation during locomotion by transient dynamic amplification. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 13(1), 33–39. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2004.843173>
- Feder, K. P., & Majnemer, A. (2007). Handwriting development, competency, and intervention. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49(4), 312–317. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00312.x>
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, F. (2002). Haptic guidance: Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Proceedings - 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002*, 40–47. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2002.998939>
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole Pub. Co.
- Flores d'Arcais, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading chinese

- characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6(4), 337–355. <https://doi.org/10.1080/09541449408406519>
- Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). Action as a Binding Key to Multisensory Integration. In *The handbook of multisensory processes*. (pp. 425–441). MIT Press.
- Frenoy, R., Thouvenin, I., & Gapenne, O. (2014). *Handwriting learning systems: Towards an adaptation model in virtual environments*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01131451/>
- Gavens, N., & Camos, V. (2006). *La mémoire de travail : une place centrale dans les apprentissages scolaires fondamentaux*. January.
- Gentile, A. (1987). *Skill Acquisition: Action, movement and neuromotor processes*.
- Graham, S. (1990). The role of production factors in learning disabled students' compositions. *Journal of Educational Psychology*, 82(4), 781–791. <https://doi.org/10.1037//0022-0663.82.4.781>
- Greenfield, P. M. (1991). *This target article has two goals : The first is to relate the ontogeny of hierarchical organization in speech and in combining objects with the hands ( henceforth " manual object combination ") to brain development and brain function . The construction a*. 531–595.
- Grissmer, D., Grimm, K. J., Aiyer, S. M., Murrah, W. M., & Steele, J. S. (2010). Fine motor skills and early comprehension of the world: Two new school readiness indicators. *Developmental Psychology*, 46(5), 1008–1017. <https://doi.org/10.1037/a0020104>
- Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge Point: A Framework for Conceptualizing the Effects of Various Practice Conditions in Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 212–224. <https://doi.org/10.3200/JMBR.36.2.212-224>
- Guthrie, E. R. (1952). *The psychology of learning* (Rev.ed). Harper & brothers.
- Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2003). *Touching for Knowing(vol.53)*. John Benjamins Publishing Company.
- Henmi, K., & Yoshikawa, T. (1998). Virtual lesson and its application to virtual calligraphy system. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2(May), 1275–1280. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677278>
- Hennion, B., Gentaz, E., Gouagout, P., & Bara, F. (2005). Telemaque, a new visuo-haptic interface for remediation of dysgraphic children. *Proceedings - 1st Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems; World Haptics Conference, WHC 2005*, 410–419. <https://doi.org/10.1109/WHC.2005.125>
- Heuer, H., & Lüttgen, J. (2014). Motor learning with fading and growing haptic guidance. *Experimental Brain Research*, 232(7), 2229–2242. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3914-0>
- Hopman, L. (2014). *Cursive over typeface: the importance of teaching handwriting instead of typing* (Issue August). The University of Leiden.
- Huegel, J. C., & O'Malley, M. K. (2009). Visual versus Haptic Progressive Guidance for Training in a Virtual Dynamic Task. *ProQuest Dissertations and Theses*, 3362244, 194. [http://ezproxy.net.ucf.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/304989582?accountid=10003%5Cnhttp://sfx.fcla.edu/ucf?url\\_ver=Z39.88-2004&rft\\_val\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+&+theses&sid=ProQ:ProQuest+Dissertations+&+T](http://ezproxy.net.ucf.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/304989582?accountid=10003%5Cnhttp://sfx.fcla.edu/ucf?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+&+theses&sid=ProQ:ProQuest+Dissertations+&+T)
- James, K. H., & Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network. *Neuropsychologia*, 44(14), 2937–2949. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.06.026>
- Jolly, C., Palluel-Germain, R., & Gentaz, E. (2013). Evaluation of a tactile training for handwriting

- acquisition in French kindergarten children: A pilot study. *Kindergartens: Teaching Methods, Expectations and Current Challenges*, March 2015, 161–175.
- Jongmans, M. J., Linthorst-Bakker, E., Westenberg, Y., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2003). Use of a task-oriented self-instruction method to support children in primary school with poor handwriting quality and speed. *Human Movement Science*, 22(4–5), 549–566. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.009>
- Karlsdotti, R. (1996). Development of cursive handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 659–673. <https://doi.org/10.2466/pms.1996.82.2.659>
- Kato, C., Isoda, H., Takehara, Y., Nakai, T., Matsuo, K., Moriya, T., & Kaneko, M. (1999). Involvement of motor cortices in retrieval of kanji morphograms as detected by functional MRI. *NeuroImage*, 7(4 PART II), 1335–1339. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(18\)31055-3](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(18)31055-3)
- Kim, Y. K., & Yang, X. (2006). Hand-writing rehabilitation in the haptic virtual environment. *Proceedings of the 2006 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Their Applications, HAVE 2006, November*, 161–164. <https://doi.org/10.1109/HAVE.2006.283792>
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Mankinen, J. M. (2005). Visual and haptic exploratory procedures in children's judgments about tool function. *Infant Behavior and Development*, 28(3 SPEC. ISS.), 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2005.05.002>
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Matula, D. E. (1993). Haptic Exploration in the Presence of Vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(4), 726–743. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.19.4.726>
- Lee, H., & Choi, S. (2014). Combining haptic guidance and haptic disturbance: An initial study of hybrid haptic assistance for virtual steering task. *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 159–165. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2014.6775449>
- Lee, H., Han, G., Lee, I., Yim, S., Hong, K., Lee, H., & Choi, S. (2013). Haptic assistance for memorization of 2-D selection sequences. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(6), 643–649. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2283464>
- Lee, J., & Choi, S. (2010). Effects of haptic guidance and disturbance on motor learning: Potential advantage of haptic disturbance. *2010 IEEE Haptics Symposium, HAPTICS 2010*, 335–342. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2010.5444635>
- Lee, T. D., Swinnen, S. P., & Serrien, D. J. (1994). Cognitive effort and motor learning. *Quest*, 46(3), 328–344. <https://doi.org/10.1080/00336297.1994.10484130>
- Li, Y., Huegel, J. C., Patoglu, V., & O'Malley, M. K. (2009). Progressive shared control for training in virtual environments. *World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 332–337. <https://doi.org/10.1109/WHC.2009.4810873>
- Liu, J., Cramer, S. C., & Reinkensmeyer, D. J. (2006). Learning to perform a new movement with robotic assistance: Comparison of haptic guidance and visual demonstration. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-3-20>
- Liu, J., Emken, J. L., Cramer, S. C., & Reinkensmeyer, D. J. (2005). Learning to perform a novel movement pattern using haptic guidance: Slow learning, rapid forgetting, and attractor paths. *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005(D)*, 37–40. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1501046>
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, 19(4), 1492–1500. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00088-0)

- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2005). Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: A study on left-handers. *Neuropsychologia*, 43(12), 1801–1809. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.020>
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T., & Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: a comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119(1), 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.10.019>
- Lurçat, L. (1974). *Études de l'acte graphique*. Mouton.
- Luria, A. R. (1973). *The Working Brain. An Introduction to Neuropsychology*. Penguin Books.
- Luttels, K. (2015). *The Haptic Effect of Writing on Vocabulary Learning*. January. [http://scholar.google.com.my/scholar?start=110&q=theory+in+memorizing&hl=en&as\\_sdt=0,5&as\\_ylo=2015#2](http://scholar.google.com.my/scholar?start=110&q=theory+in+memorizing&hl=en&as_sdt=0,5&as_ylo=2015#2)
- Lüttgen, J., & Heuer, H. (2012). Robotic guidance benefits the learning of dynamic, but not of spatial movement characteristics. *Experimental Brain Research*, 222(1–2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3190-9>
- Magill, R. A., & Anderson, D. I. (2016). *Motor learning and control: concepts and applications*. McGraw-Hill Education.
- Mangen, A. (2009). *The Impact of Digital Technology on Immersive Fiction Reading*. VDM Verlag.
- Mangen, A., & Velay, J.-L. (2010). Digitizing Literacy: Reflections on the Haptics of Writing. *Advances in Haptics*, April. <https://doi.org/10.5772/8710>
- Marchal-Crespo, L., Lopez-Oloriz, J., Jaeger, L., & Riener, R. (2014). Optimizing learning of a locomotor task: Amplifying errors as needed. *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2014*, 5304–5307. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944823>
- Marchal-Crespo, L., Michels, L., Jaeger, L., López-Olóriz, J., & Riener, R. (2017). Effect of error augmentation on brain activation and motor learning of a complex locomotor task. *Frontiers in Neuroscience*, 11(SEP), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00526>
- Matsuo, K., Kato, C., Okada, T., Moriya, T., Glover, G. H., & Nakai, T. (2003). Finger movements lighten neural loads in the recognition of ideographic characters. *Cognitive Brain Research*, 17(2), 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00114-9)
- McDonald, P. V., Van Emmerik, R. E. A., & Newell, K. M. (1989). The effects of practice on limb kinematics in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 21(3), 245–264. <https://doi.org/10.1080/00222895.1989.10735480>
- Mendes, P. A. S., Ferreira, J. P., Coimbra, A. P., Crisóstomo, M. M., & Bouças, C. (2020). Hand Exercise Using a Haptic Device. *Communications in Computer and Information Science*, 1194 CCIS, 449–461. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42520-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42520-3_36)
- Mendes, P. C., Fuentes, J. P., Menayo, R., & Dias, G. (2020). *Variabilidade como método de treino*.
- Merriam-Webster, I. (1983). *Webster's ninth new collegiate dictionary*. (p. 1563 p.). Merriam-Webster. <file://catalog.hathitrust.org/Record/000318759>
- Morris, D., Hong, T., Barbagli, F., Chang, T., & Salisbury, K. (2007). Haptic feedback enhances force skill learning. *Proceedings - Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007*, 21–26. <https://doi.org/10.1109/WHC.2007.65>
- Mullins, J., Mawson, C., & Nahavandi, S. (2005). Haptic handwriting aid for training and rehabilitation. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*,



3(March 2015), 2690–2694. <https://doi.org/10.1109/icsmc.2005.1571556>

- Muratori, L. M., Lamberg, E. M., Quinn, L., & Duff, S. V. (2013). Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation. *Journal of Hand Therapy*, 26(2), 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2012.12.007>
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341–360).
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20(4–5), 695–715. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00073-2)
- Nishino, H., Murayama, K., Kagawa, T., & Utsumiya, K. (2010). A Japanese calligraphy trainer based on skill acquisition through haptization. *Proceedings - International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, AINA, 1225–1232. <https://doi.org/10.1109/AINA.2010.112>
- Nishino, H., Murayama, K., Shuto, K., Kagawa, T., & Utsumiya, K. (2011). A calligraphy training system based on skill acquisition through haptization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2(4), 271–284. <https://doi.org/10.1007/s12652-010-0042-y>
- OpenHaptics - Toolkit Version 3.5.0*. (2018).
- Palluel-Germain, R., Bara, F., De Boisferon, A. H., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - Increases kindergarten children's handwriting acquisition. *Proceedings - Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007, March*, 72–77. <https://doi.org/10.1109/WHC.2007.13>
- Palluel-Germain, Richard, Bara, F., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2006). Early handwriting acquisition: Evaluation of Telemaque, a new visuo-haptic interface. *Proceedings of the Eurohaptics 2006 Conference*, 10–13.
- Park, W., Korres, G., Moonesinghe, T., & Eid, M. (2019). Investigating Haptic Guidance Methods for Teaching Children Handwriting Skills. *IEEE Transactions on Haptics*, 12(4), 461–469. <https://doi.org/10.1109/TOH.2019.2922284>
- Patton, J. L., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2004). Robot-Assisted Adaptive Training: Custom Force Fields for Teaching Movement Patterns. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(4), 636–646. <https://doi.org/10.1109/TBME.2003.821035>
- Patton, J. L., Stoykov, M. E., Kovic, M., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2006). Evaluation of robotic training forces that either enhance or reduce error in chronic hemiparetic stroke survivors. *Experimental Brain Research*, 168(3), 368–383. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0097-8>
- Portillo-Rodriguez, O., Avizzano, C., Sandoval, O., Vilchis-Gonzalez, A., Davila-Vilchis, M., & Bergamasco, M. (2012). Training Motor Skills Using Haptic Interfaces. *Haptics Rendering and Applications, January*. <https://doi.org/10.5772/25676>
- Powell, D., & O'Malley, M. K. (2012). The task-dependent efficacy of shared-control haptic guidance paradigms. *IEEE Transactions on Haptics*, 5(3), 208–219. <https://doi.org/10.1109/TOH.2012.40>
- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(2), 253–279. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0140525X9900182X>
- Reinkensmeyer, D. J., & Patton, J. L. (2009). Can robots help the learning of skilled actions? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 37(1), 43–51. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181912108>
- Rock, I., & Victor, J. (1964). Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, 143(3606), 594–596. <https://doi.org/10.1126/science.143.3606.594>

- Schmidt, R. A. (1975). *A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning*. 82(4), 225–260.
- Schmidt, R. A. (1991). Frequent Augmented *Feedback* Can Degrade Learning: Evidence and Interpretations. In J. Requin & G. E. Stelmach (Eds.), *Tutorials in Motor Neuroscience* (pp. 59–75). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3626-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3626-6_6)
- Schmidt, R. A. (2003). *Motor Schema Theory After 27 Years : Reflections and Implications for a NewTheory*. *March*, 37–41.
- Schmidt, R. A., & Bjork, R. A. (1992). New Conceptualizations of Practice: Common Principles in Three Paradigms Suggest New Concepts for Training. *Psychological Science*, 3(4), 207–217. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00029.x>
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2014). *Motor Learning and Performance: From Principles to Application* (fifth edit). Human Kinetics, Inc.
- Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C. J., Wulf, G., & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor Control and Learning - A Behavioral Emphasis* (sixth).
- Schmidt, R. A., & White, J. L. (1972). Evidence for an error detection mechanism in motor skills: A test of adams' closed-loop theory. *Journal of Motor Behavior*, 4(3), 143–153. <https://doi.org/10.1080/00222895.1972.10734930>
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2000). *Motor learning and performance* (second). Human Kinetics, Inc.
- Seki, K., Yajima, M., & Sugishita, M. (1995). The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33(5). [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)00138-F](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)00138-F)
- Shuto, K., Nishino, H., Kagawa, T., & Utsumiya, K. (2009). A handwritten character training system with haptization of instructor's brush-strokes. *Proceedings of the International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, CISIS 2009*, 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/CISIS.2009.140>
- Sirigu, A., Duhamel, J. R., & Poncet, M. (1991). The role of sensorimotor experience in object recognition: A case of multimodal agnosia. *Brain*, 114(6), 2555–2573. <https://doi.org/10.1093/brain/114.6.2555>
- Solis, J., Avizzano, C. A., & Bergamasco, M. (2002). Teaching to write Japanese characters using a haptic interface. *Proceedings - 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002*, 255–262. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2002.998966>
- Sovik, N. (1974). *DEVELOPMENTAL TRENDS OF VISUAL FEEDBACK CONTROL IN COPYING AND HANDWRITING PERFORMANCES OF CHILDREN AGED 7 THROUGH 11 YEARS*. 919–930.
- Srimathveeravalli, G., Gourishankar, V., & Kesavadas, T. (2007). Comparative study: Virtual fixtures and shared control for rehabilitation of fine motor skills. *Proceedings - Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007*, 304–309. <https://doi.org/10.1109/WHC.2007.31>
- Srimathveeravalli, G., Gourishankar, V., Kumar, A., & Kesavadas, T. (2009). Experimental evaluation of shared control for rehabilitation of fine motor skills. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.3086031>
- Srimathveeravalli, G., Gourishankar, V., & Thenkurussi, K. (2006). Haptic attributes and human motor skills. *14th Symposium OnHaptics Interfaces for Virtual Environment AndTeleoperator Systems 2006 - Proceedings, 2006*, 453–459. <https://doi.org/10.1109/haptic.2006.1627128>
- Srimathveeravalli, G., & Thenkurussi, K. (2005). Motor skill training assistance using haptic attributes. *Proceedings - 1st Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual*

- Environment and Teleoperator Systems; World Haptics Conference, WHC 2005*, 452–457. <https://doi.org/10.1109/WHC.2005.96>
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30(C), 276–315. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)
- Teo, C. L., Burdet, E., & Lim, H. P. (2002). A robotic teacher of Chinese handwriting. *Proceedings - 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002*, 335–341. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2002.998977>
- Teranishi, A., Korres, G., Park, W., & Eid, M. (2018). Combining Full and Partial Haptic Guidance Improves Handwriting Skills Development. *IEEE Transactions on Haptics*, 11(4), 509–517. <https://doi.org/10.1109/TOH.2018.2851511>
- Teranishi, A., Mulumba, T., Karafotias, G., Alja'Am, J. M., & Eid, M. (2017). Effects of full/partial haptic guidance on handwriting skills development. *2017 IEEE World Haptics Conference, WHC 2017, June*, 113–118. <https://doi.org/10.1109/WHC.2017.7989886>
- Thelen, E. (2014). Hidden Skills: A Dynamic Systems Analysis of Treadmill Stepping during the First Year. *The Social History of the American Family: An Encyclopedia*, 56(1). <https://doi.org/10.4135/9781452286143.n496>
- Thoroughman, K. A., & Shadmehr, R. (2000). Learning of action through adaptive combination of motor primitives. *Nature*, 407(6805), 742–747. <https://doi.org/10.1038/35037588>
- Utey, A. (2008). *Motor Control, Learning and Development: Instant Notes* (2 edition). Routledge.
- van Galen, G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10(2–3), 165–191. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90003-G](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90003-G)
- Vinter, A., & Chartrel, E. (2008). Visual and proprioceptive recognition of cursive letters in young children. *Acta Psychologica*, 129(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.05.007>
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In *Traité de psychologie expérimentale*. Presses Universitaires de France.
- Wang, D., Zhang, Y., & Yao, C. (2006). Stroke-based modeling and haptic skill display for Chinese calligraphy simulation system. *Virtual Reality*, 9(2–3), 118–132. <https://doi.org/10.1007/s10055-005-0012-4>
- Wei, Y., Patton, J., Bajaj, P., & Scheidt, R. (2005). A real-time haptic/graphic demonstration of how error augmentation can enhance learning. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005(June 2014)*, 4406–4411. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570798>
- Williams, C. K., Tremblay, L., & Carnahan, H. (2016). It pays to go off-track: Practicing with error-augmenting haptic feedback facilitates learning of a curve-tracing task. *Frontiers in Psychology*, 7(DEC), 2–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.02010>
- Wilson, F. R. (1998). *The Hand: How Its Use Shapes the Brain, Language, and Human Culture*. Pantheon.
- Wright, C. D., & Wright, J. P. (1980). Handwriting: The effectiveness of copying from moving versus still models. *Journal of Educational Research*, 74(2), 95–98. <https://doi.org/10.1080/00220671.1980.10885290>
- Wulf, G., Shea, C. H., & Whitacre, C. A. (1998). Physical-Guidance Benefits in Learning a Complex Motor Skill. *Journal of Motor Behavior*, 30(4), 367–380. <https://doi.org/10.1080/00222899809601351>
- Yang, X. D., Bischof, W. F., & Boulanger, P. (2008). Validating the performance of haptic motor skill

training. *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2008 - Proceedings, Haptics*, 129–135. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2008.4479929>

Yeh, J. S., Lien, T. Y., & Ouhyoung, M. (2002). On the effects of haptic display in brush and ink simulation for Chinese painting and calligraphy. *Proceedings - Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2002-Janua*(January 2015), 439–441. <https://doi.org/10.1109/PCCGA.2002.1167892>

Yokokohji, Y., Hollis, R. L., Kanade, T., Henmi, K., & Yoshikawa, T. (1996). Toward machine mediated training of motor skills - skill transfer from human to human via virtual environment. *Robot and Human Communication - Proceedings of the IEEE International Workshop*, 32–37. <https://doi.org/10.1109/roman.1996.568646>