



Instituto Superior de Engenharia do Porto

Duarte Santos e Lopes

# Sistemas Hápticos no Apoio à Educação: Estudo da Aerodinâmica

Porto, Novembro de 2009

Duarte Santos e Lopes

Licenciado em Engenharia Informática

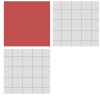
pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto

# **Sistemas Hápticos no Apoio à Educação: Estudo da Aerodinâmica**

Dissertação de Mestrado em Sistemas Gráficos e Multimédia

Dissertação realizada sob a orientação do  
**Prof. Doutor Carlos Vaz de Carvalho**

Porto, Novembro de 2009



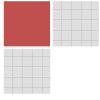
## RESUMO

É considerado um dos problemas na educação o facto de a aprendizagem poder ser muito baseada no uso da teoria. Sendo as experiências do ser humano uma grande parte da forma como vemos e vivemos o mundo, torna-se imprescindível o hábito da prática na formação do nosso conhecimento. Embora a teoria seja sempre necessária na construção de conceitos, deve ser complementada com a experiência de forma a consolidar a aprendizagem para melhor noção da realidade.

Esta dissertação descreve uma didáctica para a integração de dispositivos hápticos aplicados à educação, concebendo assim um novo e inovador método de ensino aliado à prática. Dependendo da aceitação por parte dos alunos, este método de uso de tecnologia na educação para fins práticos pode revelar-se revolucionário. Experiências que seriam difíceis de realizar tornam-se possíveis de simular de uma forma real com a ajuda dos sistemas hápticos, em que a variedade de matérias que as aplicações podem simular é vasta.

Especificamente, este trabalho fundamenta-se no estudo da aerodinâmica no voo com recurso a uma aplicação desenvolvida para o efeito e à potencialidade do aparelho háptico Novint Falcon, um *interface* sensorial táctil entre uma pessoa e um computador, de custo relativamente baixo em relação à generalidade dos preços deste tipo de dispositivos.

Os testes que estudantes realizaram à aplicação revelaram grande interesse e curiosidade pela novidade da tecnologia háptica e apreciação no conceito do seu uso prático na educação. De forma geral, todos os alunos que participaram no ensaio do programa transmitiram *feedback* positivo, expressando maior ganho de motivação e desejo em ver este sistema aplicado a outras disciplinas.



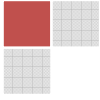
## **ABSTRACT**

It's considered one of the problems in education the fact that learning can be a lot based in the use of theory. As the experiences of the human being play a large part in the way that we perspective the world, it becomes essential the habit of practice in the formation of our knowledge. Although the theory is always necessary in the concept construction, it must be supplemented by experience to consolidate learning into a better notion of reality.

This dissertation describes one methodology to integration of haptic devices applied in education, designing in this way a new and innovated method of teaching allied to practice. Depending on the acceptance by students, this method of using technology in education for practical purposes may be revolutionary. Experiences that would be difficult to perform become possible to simulate in a real way with the help of haptic systems, where the range of subjects that applications can simulate is vast.

Specifically, this project is based in the study of flight aerodynamics with resource to the potentiality of the Novint Falcon Haptic device, which is a tactile sensory interface between a person and a computer, relatively inexpensive compared to the general costs of these types of devices.

The tests that students performed to the application revealed great interest and curiosity for the novelty of haptic technology and appreciation in the concept of his practical use in education. In general, all students that participated in the test of the program transmitted positive feedback, expressing higher gain in motivation and desire to see this system applied to others disciplines.



## **AGRADECIMENTOS**

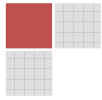
Um agradecimento em particular ao meu orientador, Prof. Doutor Carlos Vaz de Carvalho, pela sua importante orientação e aconselhamento.

Ao Prof. Doutor Paulo Coelho de Oliveira.

Ao meu amigo José Esteves da Costa pelas suas ideias no início deste projecto e um agradecimento especial ao meu amigo Paulo Braga de Sá pelo seu conhecimento de aviões que originou boas discussões sobre a aerodinâmica e pela revisão de textos.

A todos os estudantes que testaram o simulador. As vossas opiniões foram muito importantes.

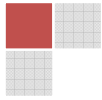
Por fim, à minha família que sem o seu apoio simplesmente não era possível a realização deste projecto.



## ÍNDICE

|   |             |
|---|-------------|
| <b>RESUMO</b> .....   | <b>III</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                       | <b>IV</b>   |
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                 | <b>V</b>    |
| <b>ÍNDICE</b> .....   | <b>VI</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                               | <b>VIII</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                               | <b>X</b>    |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....                          | <b>XI</b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                   | <b>1</b>    |
| 1.1 Enquadramento .....                                     | 2           |
| 1.2 Questões de Investigação .....                          | 4           |
| 1.3 Objectivos.....   | 5           |
| 1.4 Motivações .....  | 6           |
| 1.5 Organização da Dissertação .....                        | 7           |
| <b>2 CONCEITOS E ESTADO DA ARTE</b> .....                   | <b>8</b>    |
| 2.1 Sistemas Hápticos .....                                 | 10          |
| 2.1.1 Wired Glove.....                                      | 12          |
| 2.1.2 <i>Feedback</i> de Força Háptica.....                 | 12          |
| 2.1.3 Aparelho de Levitação Magnética (Maglev Haptics)..... | 14          |
| 2.1.4 VirtuSphere.....                                      | 15          |
| 2.1.5 Omni-Directional Treadmill .....                      | 17          |
| 2.1.6 3rdSpace Vest .....                                   | 18          |
| 2.2 Ferramentas de Desenvolvimento.....                     | 20          |
| 2.2.1 X3D .....   | 20          |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.2 H3DAPI.....                                 | 20        |
| 2.3 Experiências e Projectos.....                 | 22        |
| 2.3.1 Project HaptEK16 .....                      | 22        |
| 2.3.2 BACH.....                                   | 23        |
| 2.3.3 Curictus Virtual Rehab System.....          | 24        |
| 2.3.4 Oral Surgery Simulator.....                 | 26        |
| 2.3.5 Virtual Injection Simulation for Botox..... | 27        |
| <b>3 CONCEITOS DE AERONÁUTICA .....</b>           | <b>29</b> |
| 3.1 O Avião .....                                 | 29        |
| 3.2 O Fenómeno Natural do Vento .....             | 33        |
| 3.3 O Ar nas Asas do Avião .....                  | 35        |
| 3.4 Forças Aplicadas ao Avião .....               | 47        |
| <b>4 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO .....</b>        | <b>52</b> |
| 4.1 Metodologia.....                              | 52        |
| 4.1.1 Identificação do problema .....             | 52        |
| 4.1.2 Pesquisa bibliográfica .....                | 53        |
| 4.1.3 Implementação da simulação .....            | 54        |
| 4.1.4 Validação da simulação .....                | 56        |
| 4.2 Concepção .....                               | 56        |
| 4.3 Implementação.....                            | 57        |
| 4.3.1 Descrição técnica.....                      | 57        |
| 4.3.2 A simulação .....                           | 64        |
| 4.4 Análise de Resultados .....                   | 70        |
| 4.4.1 Teste de conhecimentos.....                 | 70        |
| 4.4.2 Análise da motivação dos alunos .....       | 71        |
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>                         | <b>74</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>         | <b>76</b> |

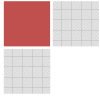


## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1: Evolução histórica do paradigma educacional .....  | 3  |
| Fig. 2: Novint Falcon .....  | 13 |
| Fig. 3: Novint Falcon com extremidade de arma.....   | 13 |
| Fig. 4: Constituição do Maglev Haptics.....  | 15 |
| Fig. 5: VirtuSphere transparente .....   | 16 |
| Fig. 6: VirtuSphere para treino militar/segurança.....   | 17 |
| Fig. 7: Omni-Directional Treadmill .....   | 18 |
| Fig. 8: ODT do laboratório de investigação do exército americano .....   | 18 |
| Fig. 9: Localização dos pneumáticos .....  | 19 |
| Fig. 10: 3rdSpace Vest .....   | 19 |
| Fig. 11: HaptEK16 .....  | 22 |
| Fig. 12: PrintScreen do programa BACH .....  | 23 |
| Fig. 13: Dois aparelhos hápticos necessários para a aplicação.....   | 24 |
| Fig. 14: Curictus Virtual Rehab System.....  | 25 |
| Fig. 15: Protótipo Kobra.....  | 27 |
| Fig. 16: Adaptador para colocação de seringa.....  | 28 |
| Fig. 17: Printscreen do Virtual Injection Simulation for Botox .....   | 28 |
| Fig. 18: Tipos de asa: .....   | 31 |
| Fig. 19: Tipos de fuselagem: .....   | 31 |
| Fig. 20: A – Ailerons; B – Flaps; C – Elevadores; D – Leme; E – Hélice.....  | 32 |
| Fig. 21: Slats e flaps .....   | 33 |
| Fig. 22: Deslocação do vento pela diferença da pressão atmosférica .....   | 34 |
| Fig. 23: Escoamento de água num tubo de diâmetro variável.....   | 35 |
| Fig. 24: Corrente de ar a atravessar uma asa de avião .....  | 36 |
| Fig. 25: As mesmas parcelas de ar que se dividem no início da asa, juntam-se no fim da asa.....                        | 37 |
| Fig. 26: Fluxo do ar no instante 1 .....   | 38 |
| Fig. 27: Fluxo do ar no instante 2 .....   | 38 |
| Fig. 28: Fluxo do ar no instante 3 .....   | 39 |
| Fig. 29: A deflexão do ar é originada pela força do ar (acção). A força oposta é a força de sustentação (reacção)..... | 40 |

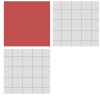


|   |    |
|---|----|
| Fig. 30: Efeito Coandă .....  | 41 |
| Fig. 31: Água a aderir à superfície da ponta de uma colher .....  | 42 |
| Fig. 32: O ângulo $\alpha$ é o ângulo de ataque.....  | 43 |
| Fig. 33: Pressões criadas na asa com certo ângulo de ataque e perfil de arco no topo .....                    | 43 |
| Fig. 34: Gráfico que mostra a relação entre ângulo de ataque e valor da força de sustentação.....             | 44 |
| Fig. 35: Simulador de fluxo de ar numa asa com perfil simétrico (experiência 1).....                          | 45 |
| Fig. 36: Simulador de fluxo de ar numa asa com perfil assimétrico (experiência 2) .....                       | 46 |
| Fig. 37: As 4 forças aplicadas a um avião em voo.....   | 47 |
| Fig. 38: Forças sobre um avião durante a subida com velocidade constante e taxa de ascensão constante .....   | 49 |
| Fig. 39: Forças sobre um avião durante a descida com velocidade constante e taxa de descensão constante ..... | 49 |
| Fig. 40: Interface do Simulador de forças aerodinâmicas .....   | 65 |
| Fig. 41: Avião na descolagem .....  | 66 |
| Fig. 42: Avião a subir sem ângulo de ataque.....  | 67 |
| Fig. 43: Avião a subir com ângulo de ataque positivo .....  | 67 |
| Fig. 44: Avião a descer com ângulo de ataque negativo.....  | 68 |
| Fig. 45: Avião abrandando a velocidade .....  | 69 |
| Fig. 46: Gráfico percentual do inquérito realizado pelos alunos .....   | 72 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Dispositivos hápticos .....   | 14 |
| Tabela 2: Relação ângulo de ataque e força de sustentação numa asa com perfil simétrico .....   | 45 |
| Tabela 3: Relação ângulo de ataque e força de sustentação numa asa com perfil assimétrico ..... | 46 |
| Tabela 4: Lista de custo/benefícios de aparelhos hápticos.....                                  | 55 |



## LISTA DE ABREVIATURAS

SDK – Software Development Kit

ODT - Omni-Directional Treadmill

Moodle - Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment

FAI - *Fédération Aéronautique Internationale*

RV – Realidade Virtual

GDL – Graus de Liberdade

CPU - Central Processing Unit (Unidade central de processamento)

X3D – *Extensible 3D*

XML – *Extensible Markup Language*

API - *Application Programming Interface* (Interface de programação de aplicativos)

VRML - *Virtual Reality Modeling Language* (Linguagem para modelagem de realidade virtual)

ISO – *International Organization for Standardization*

OpenGL – Open Graphics Library

STL – Standard Template Library

BACH - Broadband Analysis of Collaborative Haptics

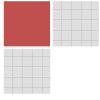
AVC – Acidente Vascular Cerebral

OSS - Oral Surgery Simulator

FD – Force Dimension

STP – Sensable Technologies PHANTOM

STTP – Sensable Technologies PHANTOM Premium



## 1. INTRODUÇÃO

*“Quem entender a maior irrealidade  
dará forma à maior realidade”*

Hugo Hofmannsthal, “O livro dos Amigos”

Não interessa quão poderosa ou elegante é uma tecnologia subjacente à computação multimédia, é o interface de utilizador que determina como o sistema vai ser utilizado (MacIntyre e Feiner, 1996). Grilo et al. (2001) afirma que a realidade virtual (RV) define cenários em como o utilizador vai interagir e navegar através de canais multi-sensoriais (imagens, sons, tacto, etc) de forma imersiva num ambiente tridimensional sintético criado por computador. O objectivo desta tecnologia é reproduzir ou simular a realidade de modo a amplificar a sensação de verdade ao indivíduo. Com a realidade virtual o utilizador utiliza os seus sentidos, especialmente os movimentos naturais tridimensionais do corpo para visualizar, manipular e explorar os dados da aplicação em tempo real e a grande vantagem deste tipo de interface é que o conhecimento intuitivo do utilizador do mundo físico torna-se benéfico para dominar o mundo virtual (Kirner apud Netto et al., 2004). A RV não representa só mundos reais, como também se estende a mundos falsos, ou seja, é possível a criação de ambientes imaginados, não existentes no universo em que vivemos mas que possuem elementos (p. ex. ícones e símbolos) nessa realidade ficcional que se apreende e têm significado para o sujeito como um universo real ou próximo do que conhece. Para amplificar o sentido de presença ou imersão num ambiente virtual é necessário que percepção sensorial seja realizada em tempo real com a ajuda de equipamentos interactivos que garantem a entrada de dados e resposta (*feedback*) adequada. Sendo o “rato” a forma de interacção mais comum, tornou-se claro a necessidade de outro tipo de interacção mais aprofundada ou realista

Uma importante componente da comunicação multi-sensorial que alguns dispositivos interactivos disponibilizam é o sentido de toque. É sabido que a sensação de toque é inevitável para entender o mundo real (Iwata, 2008) e os sistemas hápticos proporcionam essa possibilidade de toque.

A palavra háptico é um adjetivo com o significado de “relativo ao tacto; táctil”. Vem do “gr[ego] haptikós,ê,ón”, "próprio para tocar, sensível ao tacto" (Marinheiro, 2007). Assinalou-se do inglês *haptics* (em português adaptado para “háptica”) para denominar a ciência do toque, sendo esta aplicada ao estudo e simulação da pressão, textura, vibração e outros sentidos manifestados com o toque.

Pela primeira vez no quotidiano das pessoas, há equipamentos capazes de aprimorar a interacção com o meio, embora a falta de popularidade derivada do seu alto custo e a falta de padronização de acesso (que muitas vezes não funcionam como *joysticks* comuns) são dois factores que ainda inibem o uso de dispositivos hápticos (Farias et al., 2006).

Torna-se claro que à medida que a computação progride, maior será a paleta sensorial do ser-humano. É provável que o sentido do toque será o próximo sentido a exercer um importante papel nesta evolução (Hollis, 2004).

## 1.1 Enquadramento

A utilização do computador e seus acessórios são um excelente equipamento aplicado ao ensino porque permite o uso e produção de simuladores, possibilitando assim o estudo prático de variados assuntos que seriam difíceis ou impossíveis de experienciar na vida real. Moran (apud Demeterco e Alcântara, 2004, p. 78) defende que a tecnologia proporciona um novo encantamento pela escola, ao abrir as suas paredes e possibilitar que os alunos e professores compartilhem os seus conhecimentos. Branson (apud Martins e Campestrini, 2004) apresenta um modelo (Fig. 1) da evolução do paradigma educacional aplicável à utilização de computadores na educação, mostrando que no passado o professor seria o transmissor e único detentor do conhecimento e o aluno apenas o receptor.

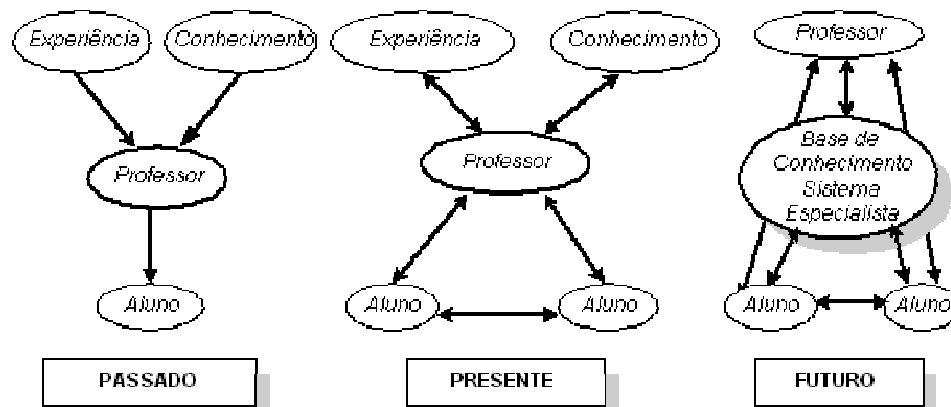


Fig. 1: Evolução histórica do paradigma educacional (Martins e Campestrini, 2004)

De acordo com Branson (apud Martins e Campestrini, 2004), no presente, tendo em conta as interações já existentes entre aluno e docente, este continuaria a ser a única origem de conhecimento e experiência e que a tendência direcciona-se para um arquétipo centralizado na tecnologia dos sistemas especialistas e na base do conhecimento, em que o foco será o estudante e a interação entre alunos e professor realizada com a ajuda da base de conhecimento/sistemas especialistas.

De facto, as mudanças existem mas a adaptação das novas metodologias de ensino-aprendizagem ainda se confrontam com o modelo tradicional de ensino (Pereira et al., 2007). Freire (apud Pereira et al., 2007), declarava que era necessário o docente saber que “ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção”. O procedimento tradicional da formação de conhecimento baseia-se apenas no aspecto cognitivo, em que a teoria e a prática são transmitidas pelo professor, interagindo de forma activa como agente principal, transformando assim, o aluno como um agente passivo. Conforme este tipo de educação, não há incentivo nem espaço para promover o educando (Pereira et al., 2007).

Os sistemas hápticos possibilitam esse incentivo através de um novo tipo de interação com o computador, facilitando mergulhar num ambiente virtual 3D com uma sensação de realidade superior, inexistente nos sistemas de manipulação clássicos. Os avanços e capacidades desta tecnologia lançam um novo modo de aprendizagem no campo da educação. Este tipo de sistema permite simular a sensação de toque, força, peso, formas e até mesmo texturas, logo os alunos poderão perceber e entender conceitos físicos de uma forma prática e realista. A utilização deste recurso é um método

inovador e criativo na concepção e transmissão do conhecimento com intenção também na fomentação da motivação e interesse por parte dos estudantes.

Durante a última década tem havido um rápido desenvolvimento no número e tipos de aparelhos hápticos e aplicações de realidade virtual (Jones et al., 2005). No entanto, de acordo com Nam e Shafieloo (2006), a tecnologia háptica embora promissora como um meio de transmitir conceitos da ciência física para diferentes grupos de utilizadores, a investigação existente nas modalidades de aprendizagem dos alunos, em particular no ensino da ciência ainda é escassa.

Pode-se concluir pela falta ou rara de informação disponível e pelos métodos educativos exercidos nas escolas de hoje, que a tecnologia háptica ainda não está inserida como ferramenta educativa e segundo Jones et al. (2005), a maioria destas aplicações hápticas tem centrado o seu uso no treino de cirurgias, odontologia e navegação de voos. Certamente esta tecnologia ainda terá de se afirmar como uma tecnologia emergente e estabelecer-se como mecanismo de interacção convencional no apoio à aprendizagem do mesmo modo como, por exemplo, o teclado o é hoje.

## 1.2 Questões de Investigação

Do referido anteriormente resulta a minha hipótese de trabalho que pode ser apresentada desta forma: a utilização de sistemas hápticos na simulação de fenómenos físicos permite aumentar a motivação dos alunos pela aprendizagem e eficácia deste processo.

As questões de investigação que se colocam estão relacionadas com a tentativa de saber quais as reacções, consequências e justificações da inserção dos novos sistemas hápticos na educação.

Inerente a este projecto sobre sistemas hápticos surgem as seguintes questões:

- a) Proporciona interesse, motivação e gratificação por parte dos alunos, no modo prático de transmissão de conhecimento através da interacção

com um computador e estudo em ambientes virtuais que simulam a prática da realidade?

- b) Caso a motivação e interesse dos alunos seja maior do que os modos de ensino tradicionais, a diferença de como os estudantes encaram a matéria será suficiente para justificar os custos da compra de equipamento e software ou desenvolvimento de software?
- c) Qual a reacção do docente face às novas tecnologias aplicadas à educação? Resistência ou aceitação?

### 1.3 Objectivos

Os objectivos principais da dissertação são:

- 1) Recolha de informação bibliográfica que ajude a resolver as questões de investigação e desenvolvimento do programa de simulação. Por exemplo, dados sobre outros projectos similares, dispositivos hápticos existentes, conhecimento sobre a física do avião e programação.
- 2) Investigação da matéria sobre a física e aerodinâmica do avião para referência dos estudantes ou, caso necessário, para o docente.
- 3) Desenvolvimento de uma nova ferramenta de ensino e aprendizagem de aerodinâmica. A ideia é conseguir que os alunos assimilem a concepção, funcionamento e desfechos do comportamento de um avião segundo variáveis que o definem, recebendo o feedback físico apropriado, facultado pelo dispositivo háptico adaptado a uma simulação destinada para o efeito.
- 4) Demonstrar e elucidar sobre as linguagens de programação usadas para o processo técnico da criação do programa de modo a servir como um



apoio inicial e/ou referência para outros trabalhos futuros envolvendo sistemas hápticos.

- 5) Validar a ferramenta desenvolvida. No desfecho desta dissertação será necessária a realização e conclusão de um estudo de avaliação de modo a adquirir informação importante sobre se este instrumento interactivo é ou não, uma peça útil no apoio à aprendizagem.

Na globalidade, este trabalho tem como finalidade dar um contributo para o aproveitamento do mecanismo háptico na tentativa de melhorar/transformar a norma de ensino actual.

## 1.4 Motivações

O facto de possuir um gosto por tecnologia multimédia foi a motivação mais pertinente para a concretização deste projecto. Considero o assunto de ambientes virtuais imersivos e cada vez mais interactivos e realistas altamente interessante. Uma vez que os sistemas hápticos são uma tecnologia em desenvolvimento e a dar os primeiros passos da sua utilização no habitual computador pessoal também é do meu interesse obter conhecimento e competências nesta área. Também me gratifica saber que o meu trabalho pode colaborar na construção de novas formas de ensino, que eu creio e espero apoiarão os estudantes na compreensão de matérias físicas.

Observo com grande expectativa e admiração o que esta tecnologia nos trará no futuro, certamente um contacto com um mundo virtualmente realista em todos os sentidos.

Não posso deixar de mencionar o apoio da minha família que também contribuiu para a força e motivação necessárias para a realização desta dissertação.

## 1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos da seguinte forma:

O primeiro capítulo contextualiza este projecto, tentando explicar o porquê do desenvolvimento deste assunto de novas formas de ensino. Aborda as questões de investigação, os objectivos e as motivações que levaram ao estudo deste tema.

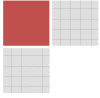
O capítulo dois descreve a componente conceptual da situação da educação, do estado da arte dos sistemas hápticos, das linguagens de programação que foram utilizadas para o desenvolvimento da aplicação háptica e ainda apresenta projectos criados por empresas ou instituições de investigação que utilizam sistemas hápticos.

No capítulo três explica toda a teoria da física do voo necessária para a compreensão do simulador de forças aerodinâmicas mostrando diferentes teorias mas também com a realização de experiências existentes *on-line* complementadas com análises e conclusões para uma parte mais prática. Neste capítulo também é descrito a *interface* e funcionamento do protótipo de simulação de forças.

O quarto capítulo refere-se ao plano de acções que foram necessárias para a realização deste trabalho, descrevendo as etapas seguidas. As etapas começam pela identificação do problema, pesquisa bibliográfica, implementação da simulação e validação da simulação.

O capítulo cinco desenvolve como foi efectuado a avaliação do protótipo, descrevendo as questões aplicadas aos estudantes sobre o simulador, a opinião dos mesmos através da realização de um questionário e a consequente análise.

No sexto capítulo é apresentado as conclusões, dando resposta às questões de investigação e perspectivas em relação a este trabalho no futuro.



## 2. CONCEITOS E ESTADO DA ARTE

*“Qualquer tecnologia suficientemente  
avançada é indistinta de magia”*

Arthur C. Clarke

As novas tecnologias, tais como o computador e a *internet*, têm o potencial de introduzir novas formas de aprendizagem para além do paradigma tradicional de professor-aluno. Segundo Martins et al. (Martins e Campestrini, 2004), o computador tem várias virtudes, sendo uma delas a capacidade de diferentes interações, enriquecendo assim as experiências dos sujeitos, cooperando no seu desenvolvimento e possibilitando a construção de conhecimento pelo próprio indivíduo através da exploração autónoma e independente.

“Nos mundos virtuais, o aluno é um agente activo, que constrói o seu conhecimento na interacção entre sujeito e objecto. Nesse pressuposto, o computador (e o ambiente computacional, em particular o mundo virtual) torna-se uma ferramenta que possibilita a interacção entre o sujeito e o objecto” (Demeterco e Alcântara, 2004, p. 80).

Demeterco e Alcântara (2004, p.80) mencionam ainda que o processo de aprendizagem passa pela construção do conhecimento por parte do sujeito na interacção com o objecto, devendo ser:

- a) Inovador – que possua a capacidade de mudança, pois não se sabe quais os conhecimentos e habilidades exigidas no futuro.
- b) Significativo – que faça sentido para a vida pessoal e profissional, que os processos educativos forneçam um entendimento geral dos fenómenos.
- c) Autogerido – que cada um se conheça e responsabilize pelas suas condições e modos de aprender.
- d) Participativo – que saiba trabalhar em equipa, consolidando o conceito do colectivo e individual, fortalecendo assim o respeito de si mesmo e terceiros.
- e) Antecipatório – educar para construir e adaptar-se a mudanças, mediante conhecimentos básicos que facilitem enfrentar situações novas e resolver problemas.

- f) Criativo – descobrir e criar a partir das suas experiências e conhecimentos, isto é, incorporar novos saberes a situações reais aplicando a criatividade e imaginação.

Um dos grandes problemas no ensino que o computador pode solucionar é os diferentes ritmos de aprendizagem dos alunos. Lollini (apud Martins e Campestrini, 2004), refere que o computador não causa bloqueio cognitivo derivado de traumas emocionais, uma vez que o computador não grita, não pune, não humilha, não julga o comportamento do utilizador, permite repetir os procedimentos as vezes que forem necessárias por uma metodologia de tentativa e erro (o estudante aprende errando) e ainda estimula o desenvolvimento cerebral pois exige uma acção activa por parte do utilizador. O computador ainda trata um erro como um alerta e imediatamente possibilita a sua correcção, além de facilitar diferentes soluções para o mesmo problema. São estas características do computador aplicadas à aprendizagem que o tornam adaptável ao desfasamento dos ritmos de aprendizagem.

Embora este método de ensino informatizado possa provocar insegurança em alguns professores menos informados por receio de uma máquina vir a substituir os métodos tradicionais de instrução, o professor continua a manter um papel fundamental como estimulador e mediador do processo de aprendizagem.

“O emprego de novas tecnologias na educação é recebido, muitas vezes, com alguma reserva. A preocupação se fundamenta no receio de que o uso da tecnologia esteja descomprometido com os objectivos pedagógicos, apresentando-se como uma solução capaz de resolver todos os problemas da educação” (Demeterco e Alcântara, 2004, p. 79).

O docente deverá aprender constantemente e certificar que os softwares ou ferramentas tecnológicas estão actualizados e a cumprir os seus objectivos pedagógicos (Martins e Campestrini, 2004), para além de aclarar qualquer dúvida que o aluno possa eventualmente reter. Segundo Silva (2005), o professor deve agir como intermediário entre os conteúdos da aprendizagem e a actividade construtiva para assimilação. Desse modo, a relação entre docente e estudante torna-se um contacto importante para o bom funcionamento educativo. Para isso acontecer é necessário que a interacção aluno-professor seja realizada de forma horizontal para que possa haver liberdade de expressão e análise dos diferentes resultados obtidos (Demeterco e Alcântara, 2004, p. 81).

As formas pedagógicas são imensas e utilizáveis em modo *on-line* e *off-line*. Actualmente a *internet* é o maior utensílio de comunicação e o maior repositório de informação a nível global. Este fabuloso meio de acesso às informações e comunicações está a proporcionar um verdadeiro renascimento educacional (Jones, 1997).

As ferramentas virtuais de educação vão desde manuais, e-books (livros electrónicos), simuladores imersivos ou não imersivos (por exemplo, os piloto de aviões de médio e grande porte treinam o seu desempenho em simuladores imersivos), multi-mídia (áudio e vídeo) e cursos *online* (e-learning).

Os simuladores são das ferramentas mais marcantes pelo seu teor prático. O simular ou o jogo do faz-de-conta é uma das características mais prematuras do ser humano, estando em média presente desde os dois anos de idade (Mendes e Fialho, 2003).

Também existem ferramentas de ensino e discussão de matérias tais como os fóruns, blogues, *wikis* (conteúdos desenvolvidos e editados pelos utilizadores), os cursos Moodle (software livre) que é um sistema de gestão de aprendizagem baseado em trabalho colaborativo, etc. O conceito do Moodle foi criado pelo educador e cientista de computadores Martin Dougiamas. Nas palavras do próprio: “...tem alunos a aprender com outros alunos e assim constrói-se comunidades. A aprendizagem é melhor quando é colaborativa e isso impulsiona em muito o desenvolvimento do Moodle” (Dougiamas, 2008)

Os sistemas hápticos (na qual esta dissertação se fundamenta) são outra tecnologia emergente na sua utilização como ferramenta de ensino.

## 2.1 Sistemas hápticos

Foi nos anos 50 que surgiu a tecnologia dos sistemas hápticos. O laboratório Argonne National Lab, nos Estados Unidos desenvolveu o primeiro tele-operador eléctrico para lidar remotamente com substâncias radioactivas.

Os sistemas hápticos são maioritariamente utilizados na área da RV e estão a ganhar ampla aceitação, adicionando a sensação de toque em soluções que continham apenas visão (Wikipédia, 2008a).

Vários tipos diferentes de dispositivos foram inventados que facultam a interacção háptica com toda a mão, braço ou até todo o corpo. No caso do rato e do joystick, estes não são considerados dispositivos hápticos, uma vez que apenas providenciam *input* ao computador. Se forem adicionados motores ou outro tipo de actuadores a estes dispositivos, já se pode apreciar uma interacção háptica, devido ao facto de servirem, não apenas como mecanismos de *input*, mas também como mecanismos de *output*.

Actualmente os sistemas hápticos podem ser utilizados como tele-operadores, simuladores, jogos, pesquisas, medicina, literatura, robótica, arte e design.

Um exemplo da utilização de comando háptico no campo dos jogos é o volante para simuladores de jogos, que são programados para possibilitar a “sensação” da estrada. À medida que o utilizador faz a curva ou acelera, o volante responde resistindo à mudança de direcção ou perdendo o controlo.

No campo da medicina, vários interfaces hápticos para simulações médicas têm sido muito úteis para o treino de procedimentos invasivos e na concretização de cirurgias remotas utilizando tele-operadores. Tele-operação significa “fazer trabalho à distância”. Por exemplo em cirurgias robóticas, um cirurgião pode utilizar tecnologia de manipulação em micro escala para realizar uma cirurgia a nível microscópico. No futuro, cirurgiões experientes poderão trabalhar a partir de uma estação de trabalho central, realizando operações remotamente, com configuração da máquina e preparação do paciente efectuado por enfermeiros no local. Uma vantagem particular deste tipo de trabalho é que o cirurgião pode realizar mais operações do mesmo género e com menos cansaço. Segundo o *site* da Wikipédia (2008a), está documentado estatisticamente que o operador consegue obter melhores resultados para os seus pacientes se executar mais cirurgias do mesmo tipo.

Outra área de interesse na utilização dos processos hápticos é na arte. Existe a utilização de aparelhos hápticos na arte virtual, como por exemplo, em sintetizadores de som ou design/animação gráfica. O dispositivo háptico permite ao artista contacto directo com o instrumento virtual que por sua vez é capaz de produzir som ou imagens em tempo

real. Por exemplo, a simulação de uma corda de violino produz vibrações em tempo real na corda do mecanismo háptico de acordo com a pressão e expressividade aplicada pelo artista. No caso de designers e modeladores, estes podem requerer um elevado grau de liberdade de dispositivos de entrada, que oferecem uma resposta de toque relativo à superfície que eles estão a criar ou a desenhar. Consequentemente, este modo, permite um fluxo de trabalho mais rápido e natural do que os métodos tradicionais.

### 2.1.1 Wired Glove

A “Wired glove” é um dispositivo de entrada do tipo luva para ambientes de RV. Vários sensores são usados para capturar informação física, como por exemplo, dobrar os dedos. Em alguns sistemas, detectores de movimentos são anexos para reconhecer a posição global ou a rotação da luva. Estes movimentos são depois interpretados pelo software que acompanha a luva e os gestos podem ser classificados em informação relevante. Um exemplo desta aplicação seria o reconhecimento de linguagem gestual ou outros simbolismos. Apenas algumas versões mais caras destas luvas providenciam feedback háptico, que simulam a sensação de toque.

### 2.1.2 Feedback de Força Háptica

Especificamente sobre o dispositivo Novint Falcon, este é um comando de jogos que vem substituir o “rato” ou “joystick”. Basicamente, o Falcon é um pequeno “motor” que permite sentir e interagir dentro de jogos de computador 3D. O Falcon deixa o utilizador controlar o jogo em três dimensões e ao mesmo tempo sentir a resposta das forças também em três dimensões de forma fiel à realidade. Este aparelho move-se para a esquerda, direita, cima e baixo tal e qual como um “rato” mas também para dentro e para fora de modo a possibilitar uma experiência mais realista de toque 3D dentro de um jogo.



Fig. 2: Novint Falcon (ifeelpixel.com, 2009)

Os motores de jogo estão sincronizados com os dados gráficos e físicos do jogo deixando o utilizador sentir texturas, formas, peso e dimensões. É possível alterar a extremidade onde o utilizador movimenta o Falcon. A peça padrão é uma esfera.



Fig. 3: Novint Falcon com extremidade de arma (wired.com, 2008)

Existem outros aparelhos hápticos semelhantes ao Novint Falcon. A Tabela 1 exhibe alguns desses sistemas.











|  | Nome                          | Características   |
|--|-------------------------------|---|
|   | Force Dimension - 3-DOF Delta | Solução versátil para aplicações que exigem grandes forças e grande espaço de trabalho  |
|   | Force Dimension - 3-DOF Omega | Robusto e solução <i>desktop</i> de peso leve   |
|   | Force Dimension - 6-DOF Delta | Solução completa para a mais exigente aplicação háptica   |
|   | Haption Virtuose Range        | Dispositivo modular háptico com recursos de computação próprios, reduzindo a carga do CPU   |
|   | Sensible Phantom Desktop      | Solução portátil de área de trabalho, vencedor de prémios, proporciona posicionamento preciso de entrada e saída com resposta de força de alta-fidelidade |
|   | Sensible Phantom Omni         | Portátil, permite os utilizadores tocar e manipular objectos virtuais   |
|   | Sensible Phantom Premium      | Dispositivo que fornece uma ampla escala de forças na área de trabalho, largueza de movimentos, rigidez e força de motor.                                 |
|  | Sensible Phantom Premium 6DOF | Aparelho que disponibiliza sensores de posição e resposta de força com 6 GDL  |

Tabela 1: Dispositivos hápticos (Inition, 2009b)

### 2.1.3 Aparelho de Levitação Magnética (Maglev Haptics)

Cientistas da universidade Carnegie Mellon desenvolveram um aparelho háptico que simula as forças não através de “braços” mecânicos mas utilizando levitação magnética. Levitação magnética de um corpo rígido empregando forças de Lorentz foi inventada pelo Dr. Ralph Hollis, fundador da Butterfly Haptics em 1984. Em 2007 esta companhia começou a comercializar a tecnologia desenvolvida dentro de uma licença exclusiva da universidade.

Este sistema é capaz de transmitir aos utilizadores uma sensação de toque e textura do objecto de uma forma mais suave e precisa.

Em comparação com o Novint Falcon, que é baseado numa estrutura mecânica, utilizando motores e rolamentos, esta técnica do uso de levitação magnética, teoricamente, oferece uma sensação de toque mais realista. Uma vez que substitui as ligações rígidas, cabos e outras partes mecânicas por uma única parte móvel, apenas sustentada por campos magnéticos, é eliminado o atrito existente.

A disposição deste aparelho consiste na base, que contém em formato hemisférico um conjunto de fortes imãs, e na secção flutuante que possui numa meia esfera seis bobinas metálicas por baixo e um bastão do tipo *joystick* na parte superior.

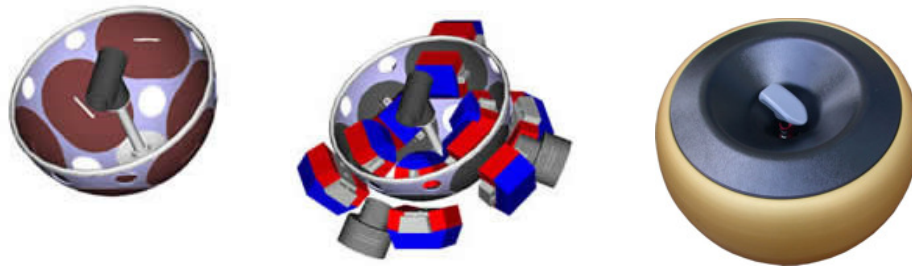


Fig. 4: Constituição do Maglev Haptics (Microdynamic Systems Laboratory, 2009b)

Quando a corrente eléctrica passa pelas bobinas, é criado um campo magnético que causa flutuação à meia esfera, possibilitando desta maneira uma manipulação suave.

A grandeza de maneabilidade através do joystick permite seis graus de liberdade (três eixos de translação e três eixos de rotação). Para medir a posição e orientação da parte flutuante, é empregado sensores ópticos que aproveitam as informações lidas para orientar a posição e orientação de um objecto virtual na aplicação gráfica. Quando o objecto virtual encontra outras superfícies e objectos, os sinais correspondentes são enviados para as bobinas eléctricas da parte flutuante do aparelho, originando uma resposta háptica adequada para o utilizador.

#### 2.1.4 VirtuSphere

A plataforma VirtuSphere consiste numa grande esfera oca feita de plástico ABS, disposta em cima de uma base com rodas que permite a esfera rodar 360 graus em

qualquer direção (6 graus de liberdade). Como detecção de movimento, um simples rato na base é usado como um dispositivo de locomoção de RV. Utilizando um visor móvel e *wireless* montado na cabeça, os utilizadores podem andar dentro da esfera para interagir num ambiente virtual e completamente imersivo.



Fig. 5: VirtuSphere transparente (Virtusphere, 2009)

O sistema VirtuSphere é criado de acordo com especificações de clientes e tipicamente incluem uma esfera de fácil montagem, a plataforma base que permite a rotação da esfera, o visor móvel, sensores 3D, detectores de movimento da esfera, um computador, drivers do dispositivo e software com aplicações 3D. O VirtuSphere é utilizado pelas forças militares, forças de segurança ou outras ocupações perigosas (uma vez que providencia um treino seguro), na saúde, no desporto, no mercado de entretenimento, na educação e museus, na arquitectura e construção de imóveis (providenciando um guia do sítio), em viagens virtuais e turismo, e por fim, em jogos.



Fig. 6: Virtusphere para treino militar/segurança (Virtusphere, 2009)

As vantagens deste sistema são a possibilidade de andar, saltar, rolar, rastejar e correr, virtualmente em distâncias ilimitadas sem encontrar obstáculos físicos do mundo real. Pode-se utilizar sozinho ou em rede, é multi-plataforma e para mudar o objectivo do aparelho basta mudar o software. É também uma solução móvel, transportável num carro de tamanho médio, com montagem realizada em 4 horas.

Como desvantagem, a esfera possui alguma inércia, obrigando o utilizador a aprender a iniciar o movimento correctamente, e mais importante, aprender a parar o movimento. Isto não é completamente natural e induz instabilidade que tem de ser controlada pelo utilizador. Outro problema é que devido ao tamanho da esfera, a área de caminhada não é realmente plano, isto força o utilizador a modificar o modo de andar. A inércia e a área não plana acabam por tornar não natural o simples movimento de andar, por isso este sistema não deve ser utilizado para estudos de locomoção do ser humano.

### 2.1.5 Omni-Directional Treadmill

A companhia Virtual Space Devices tem vindo a desenvolver uma tecnologia de nome omni-directional treadmill (ODT) nos últimos 10 anos, trabalhando principalmente com o exército americano. Um ODT é um dispositivo que permite a locomoção de uma pessoa em qualquer direcção. Combinar o plano infinito de um ODT com um sistema de RV imersivo admite um utilizador andar ou correr livremente através da paisagem digital. A navegação torna-se transparente e natural e a imersão é total.

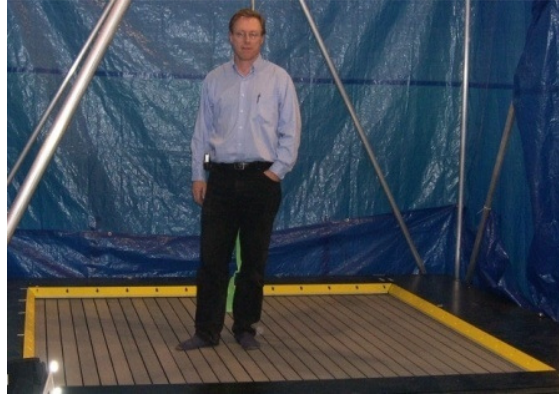


Fig. 7: Omni-Directional Treadmill (Kuntz, 2007)

A superfície de um ODT é plana e contínua. Esta infinita superfície é impulsionada pelo movimento do utilizador com apertado controlo e em comparação com o VirtuSphere, este sistema não tem resíduo de inércia.



Fig. 8: ODT do laboratório de investigação do exército americano (Wikipédia, 2008c)

### 2.1.6 3rdSpace Vest

O 3rdSpace Vest é uma tecnologia patenteada que utiliza um sistema de compressão de ar (pneumáticos) para encher/esvaziar vários bolsos de ar especializados, localizados dentro do colete, tanto à frente como atrás. Os bolsos de ar enchem e produzem uma pancada física contra o utilizador de modo a originar o efeito pretendido.

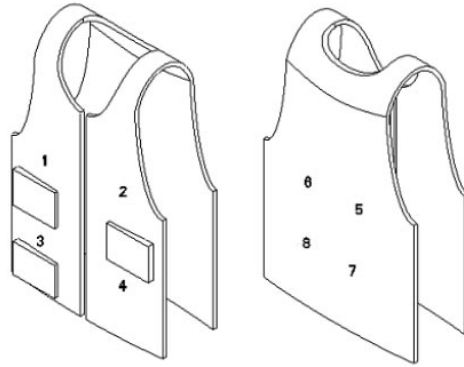


Fig. 9: Localização dos pneumáticos (tngames, 2009)

Este método possibilita o utilizador de sentir impactos de balas, murros ou facadas dentro de um jogo. Essa sensação é simulada através de micro compressores a ar e o embate pode ser comparado a um murro de uma pequena criança. Existem oito zonas activas, quatro à frente e quatro atrás, que simulam a direcção e força do disparo da bala, explosões, etc.



Fig. 10: 3rdSpace Vest (tngames, 2009)

Esta tecnologia foi desenvolvida e está a ser comercializada pela TN Games que ainda disponibiliza um *software development kit* (SDK) para programadores. Pode-se escolher entre diferentes efeitos, tais como diferentes armas, explosões, punhaladas, aceleração e desaceleração para as oito bolsas de ar. A empresa está a planear replicar forças G no próximo lançamento.

## 2.2 Ferramentas de Desenvolvimento

### 2.2.1 X3D

X3D é um formato de ficheiro de padrão aberto com uma arquitectura em tempo de execução (*run-time*) para representar e comunicar cenas e objectos 3D. O X3D não é uma API de programação mas um ficheiro que combina geometria e definições de comportamentos, disponíveis em vários formatos de arquivo<sup>1</sup>, sendo uma delas o XML. O desenvolvimento da comunicação em tempo real de dados 3D através de todas as plataformas e aplicações em rede tem sido desenvolvido desde o seu início pela linguagem VRML até ao que se considera mais maduro e refinado X3D. O X3D teve o seu aparecimento de uma revisão da especificação ISO VRML97 e integra os progressos dos recursos disponibilizados nos últimos dispositivos gráficos comerciais. Existem vários níveis de funcionalidade no X3D através da utilização de diversas definições de perfis. Um exemplo desses perfis é o Interchange, conduzido especificamente para ferramentas de criação de conteúdo digital como o AutoCad, 3DStudioMax e Maya por trocar geometrias básicas sem nenhum modelo de execução. X3D é mais do que apenas um formato de ficheiro, é um ISO livre e normalizado para design de cenas gráficas que é facilmente estendido para oferecer novas funcionalidades.

### 2.2.2 H3D API

H3D API é uma API para cenários gráficos, de código livre e multi-plataforma. H3D é totalmente escrito em C++ e utiliza OpenGL para renderização gráfica e HAPI para renderização háptica. HAPI é um motor de renderização háptica de código livre, multi-plataforma, também escrito em C++.

HAPI suporta variados dispositivos hápticos comercialmente disponíveis e é possível escrever a aplicação uma vez e não precisar de alterar o código para utilizar com outro aparelho háptico. Com a HAPI pode-se escolher diferentes algoritmos de renderização, diferentes efeitos de forças e diversos tipos de superfícies para criar a

---

<sup>1</sup> Formato específico, com ou sem padrão, com o objectivo de tratar as informações contidas num arquivo (arquivos de texto, de imagem, de som, etc).

sensação desejada ou então pode-se criar um efeito personalizado. Através do HAPI, o H3DAPI torna-se independente do dispositivo háptico. Presentemente os aparelhos suportados são os dispositivos da Sensable, Force Dimension, o Falcon (da Novint) e HapticMaster (da Moog FCS Robotic).

Actualmente existem muitas API de criação de cenas gráficas disponíveis, igualmente de fonte livre como o H3D mas existem algumas características nesta API que a fazem uma ferramenta proeminente no apoio ao desenvolvimento de aplicações 3D. São elas:

- Normalização – H3D é construído usando vários padrões da indústria tais como o X3D, o XML, o OpenGL e o STL (larga colecção de *templates* em C++ para rápido desenvolvimento de aplicações altamente eficientes).
- Multi-plataforma – Actualmente suportado pelo Windows XP, Linux e Mac OS X, todavia a natureza *open-source* do H3D significa que pode ser facilmente portado para outro sistema operativo.
- Rápido desenvolvimento – H3D é desenhado principalmente para um processo de rápido desenvolvimento. Combinando X3D, C++ e Python consegue-se velocidade de execução onde a performance é crítica e velocidade de desenvolvimento onde a performance é menos crítica.
- Háptico – Simular o sentido do toque num computador é uma tecnologia relativamente recente, por isso há poucas API gráficas que oferecem renderização de toque. Embebido no H3DAPI, existem extensões hápticas do X3D que combinam o sentido de toque com a visão.
- Fonte livre (*Open-Source*) – Nada é escondido do programador, é possível ver ou alterar o código de implementação.



## 2.3 Experiências e Projectos

Esta secção demonstra o que se pode concretizar com a utilização de sistemas hápticos em variadas matérias. É descrito alguns exemplos de experiências ou projectos de índole académica ou empresarial com recurso a dispositivos hápticos.

### 2.3.1 Project HaptEK16

Este projecto explora a interface háptica com representações 3D de sistemas hidráulicos desenhados para simular várias forças e pressões. Este sistema permite aos estudantes experimentar através do *feedback* háptico uma série de arranjos e dimensionamento dos componentes físicos. A Fig. 11 exemplifica o programa com uma experiência mecânica da actividade hidráulica. O estudante pode aplicar força no cilindro esquerdo e sentir a força gerada por essa pressão, e deste modo o estudante é ajudado na compreensão das leis da hidráulica.

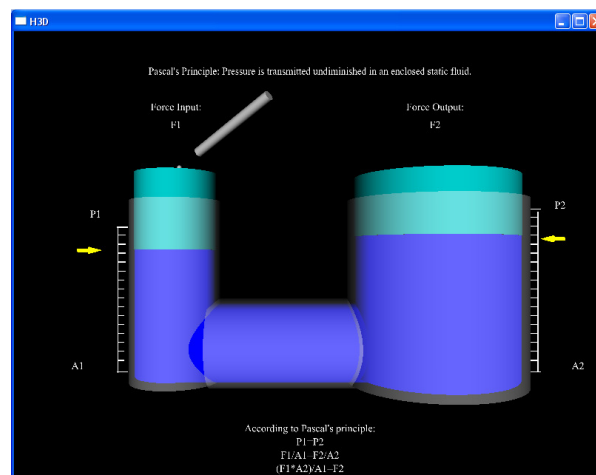


Fig. 11: HaptEK16 (Armstrong Atlantic State University, 2009a)

O simulador ainda foi desenhado e implementado para conter várias actividades para guiar o aprendiz desde o conceito mais simples da pressão (que utiliza dois parâmetros: a força aplicada e a área) até ao mais complexo sistema hidráulico de

levantamento de carros. O sistema HaptEK16 tem o objectivo de facilitar a compreensão de fenómenos e conceitos como também promover novos métodos de ensino e treino. No desenvolvimento deste projecto foram utilizadas as seguintes tecnologias: X3D, Python e H3DAPI.

### 2.3.2 BACH

Actualmente as redes de computadores estão desenhadas para transportar informação que estimula dois sentidos do ser humano: a visão e a audição. Um projecto de nome BACH<sup>2</sup> investiga técnicas que permitirão um sentido humano adicional, o envio do toque pela *internet*. O objectivo primário deste projecto é a investigação de um ambiente distribuído háptico para manipulação colaborativa de objectos através da medição do atraso e *jitter*<sup>3</sup> dos efeitos da rede na performance da tarefa visual-háptica.

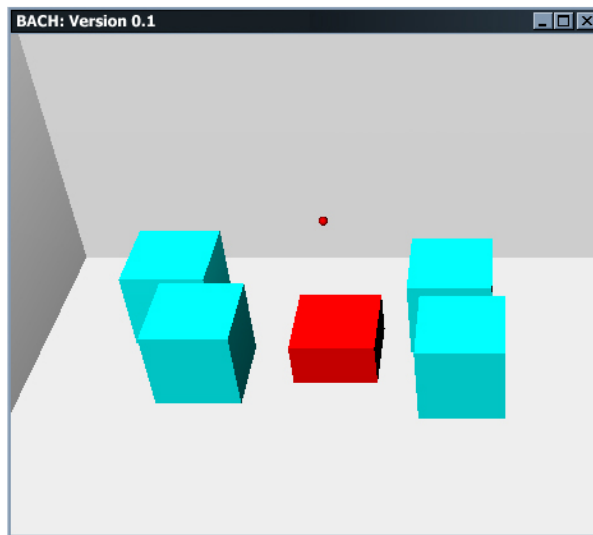


Fig. 12: PrintScreen do programa BACH (Armstrong Atlantic State University, 2009b)

A tarefa visual-háptica do programa consiste em colocar os quatro cubos numa pilha em cima de uma base (cubo vermelho na Fig. 12) empregando a colaboração de dois utilizadores remotos. Os quatro cubos são arrumados de forma aleatória e cada um

<sup>2</sup> *Broadband Analysis of Collaborative Haptics*

<sup>3</sup> Variação de tempo entre a chegada de pacotes

dos utilizadores manipula um dispositivo háptico com a representação de uma esfera no ambiente virtual. Para cumprir o objectivo os utilizadores precisam de aplicar forças em lados opostos do cubo e simultaneamente elevar o cubo para o colocar na posição correcta usando a aparente fricção. Um participante tem de aplicar força num lado do cubo servindo-se de um aparelho háptico e outro participante tem de aplicar outra força igual, de sentido oposto e no lado oposto do cubo utilizando outro aparelho háptico. Uma vez no ar, os utilizadores necessitam de mover o cubo em direcção à base enquanto adaptam a quantidade de força apropriada. A tarefa fica completa quando todos os cubos estiveram empilhados.

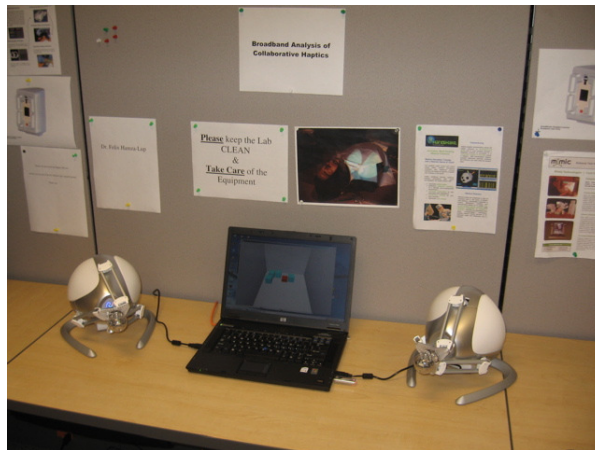


Fig. 13: Dois aparelhos hápticos necessários para a aplicação (Armstrong Atlantic State University, 2009b)

A equipa que realizou este projecto foi capaz de analisar a latência da rede numa função colaborativa empregando participantes que executaram a tarefa dez vezes enquanto simulava cinco diferentes latências.

### 2.3.3 Curictus Virtual Rehab System

Desenvolvido pela empresa sueca Curictus AB, esta companhia tem como missão prevenir pessoas de ficarem deficientes devido a AVC ou outra doença que resulte na perda das funções motoras ou cognitivas. Foi neste intuito que Curictus AB desenvolveu uma nova e eficiente maneira para reabilitar a função de membros superiores e disfunção

cognitiva derivado de trauma na cabeça fornecendo uma estação de trabalho que inclui jogos e avaliação de movimentos. É um sistema de integração que incorpora uma bancada semi-imersiva com monitor estereográfico<sup>4</sup> 3D usando óculos adequados, jogos virtuais hápticos e a parte de interação de jogo onde está um dispositivo háptico.



Fig. 14: Curictus Virtual Rehab System (Curictus AB, 2009)

Este sistema é caracterizado por ser de eficaz custo/benefício, motivador e de possibilitar uma rápida recuperação do paciente. Esta solução permite ao doente retornar mais rapidamente ao conforto da sua casa enquanto é mantido o profissionalismo estabelecido e uma calendarização monitorizada de treinos que actualmente só pode ser concedida por uma clínica de reabilitação.

O paciente joga diferentes jogos interagindo com um aparelho háptico e desta forma o utilizador sente os vários objectos num ambiente virtual 3D, o que torna esta actividade num meio de treino efectivo, divertido e estimulante. Durante a recuperação é importante recorrer ao sistema de recompensa do cérebro, que é activado por exemplo quando uma pessoa está a divertir-se. O dispositivo háptico oferece essa recompensa uma vez que os utilizadores controlam o jogo e recebem *feedback* (resposta) instantâneo.

Actualmente este equipamento apenas está disponível em algumas clínicas para efeitos de investigação. No entanto Curictus AB está a desenvolver uma versão

---

<sup>4</sup> Representação de sólidos num plano

disponível brevemente para o mercado mundial. O núcleo da tecnologia Curictus AB aspira para atender à necessidade de uma reabilitação intensiva e acessível no lar dos pacientes.

#### **2.3.4 Oral Surgery Simulator**

Oral Surgery Simulator é um sistema de treino para estudantes de medicina dentária para a prática de procedimentos cirúrgicos desenvolvido pela sueca Forsslund Systems.

Uma das aplicações para este sistema é o FS-Wisdom, que é um simulador de cirurgia de extracção de dentes do siso. A extracção de dentes do siso é uma importante parte na educação de medicina dentária e para se ser um bom dentista é preciso obviamente prática. Cirurgia oral para extracção de dentes do siso pode ser uma operação complicada e dentistas inexperientes podem causar desconforto desnecessário aos pacientes e numa situação mais extrema causar danos permanentes no nervo do dente. Com o simulador OSS os estudantes podem praticar as vezes que forem necessárias num ambiente virtual para melhorar as suas competências e assim evitar o risco de magoar os pacientes. Com este sistema outras aplicações tais como cirurgia oral, preparações pré-cirúrgicas e ortopedia são possíveis.

Com este sistema, o treino é visual, auditivo e háptico de modo a transmitir aos estudantes a sensação de diferentes partes do maxilar e o correcto manuseamento da broca cirúrgica. Um protótipo composto de hardware e software de nome Kobra foi construído e consiste num dispositivo háptico Sensable Phantom, um monitor espelhado, óculos tridimensionais que permite a colocação da mão do utilizador e representação virtual de uma broca.

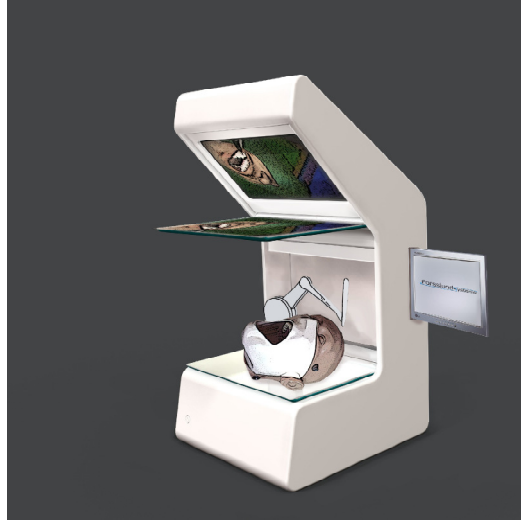


Fig. 15: Protótipo Kobra (Forsslund Systems AB, 2009)

### 2.3.5 Virtual Injection Simulation for Botox

Inition, uma empresa sediada em Londres desenvolveu um simulador que permite aos médicos experimentar injeções de botox para tratamento de espasmos musculares. Através de uma aplicação virtual com utilização de um dispositivo háptico é possível representar as sensações envolvidas na penetração da pele e camadas de músculo debaixo. O aparelho háptico utilizado é um Sensable Phantom Desktop e foi criado um adaptador personalizado através de uma impressora 3D (InVision SR 3D printer). Este adaptador faculta a inserção e conseqüente controlo da aplicação por uma seringa, que dá uma interface mais realista aos médicos.



Fig. 16: Adaptador para colocação de seringa (Inition, 2006)

Para tornar mais natural a sua utilização, o programa contém a reprodução virtual 3D de um busto humano com uma estrutura realista de músculos. O software da simulação permite a visualização do paciente em qualquer ângulo, “descascar” várias camadas de pele para revelar a estrutura de músculos existentes por debaixo e claro, a prática da injeção nos músculos.

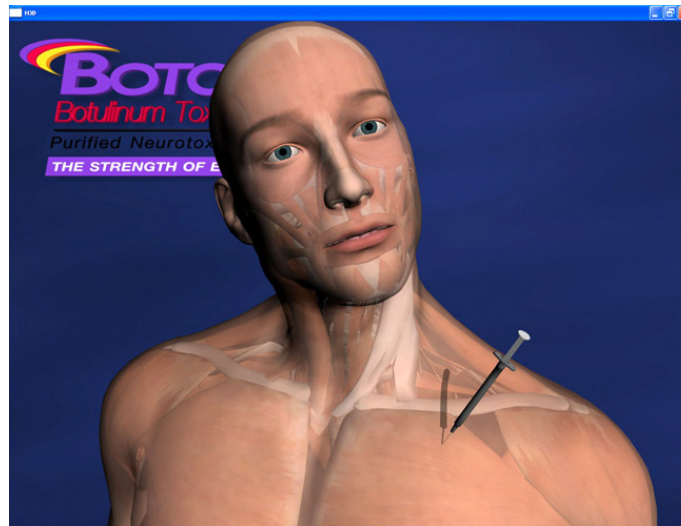
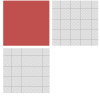


Fig. 17: Printscreen do Virtual Injection Simulation for Botox (Inition, 2006)



### 3. CONCEITOS DE AERONÁUTICA

*“A essência do conhecimento  
consiste em aplicá-lo, uma vez possuído”*

Confúcio

Este tópico explica a teoria da simulação de uma forma relativamente simples e básica de modo a servir como um tutorial ou guia das informações pertinentes para a compreensão da física da aerodinâmica e seus componentes para os jovens estudantes.

#### 3.1 O Avião

Desde sempre o homem sonhou em voar. No início do século XX realizou-se o primeiro voo numa máquina capaz de gerar potência e sustentação. Embora esteja de certo modo generalizado na maioria dos países e até reconhecido pela *Fédération Aéronautique Internationale* (FAI) que foram os irmãos Wright que conduziram em 1903 o primeiro voo controlado da história num aparelho “mais pesado do que o ar” (tendo percorrido 251 metros em 59 segundos), há quem afirme que o crédito é do brasileiro Alberto Santos Dumont. Apenas o Brasil e a França reconheceram Santos Dumont como o responsável pelo primeiro voo de avião (Santos Dumont residiu na França e foi em Paris que demonstrou ao público o seu voo em 1906). O carácter oficial e público do voo do 14-bis (nome do avião que significa ave de rapina em francês) ao contrário dos irmãos Wright, que tentavam as suas experiências em sigilo preocupados em proteger os seus segredos para patentear, valeu a Santos Dumont o reconhecimento de inventor do avião nesses dois países. Alguns pormenores técnicos também contribuíram para esse reconhecimento, tais como o facto de na experiência dos irmãos Wright utilizarem uma catapulta para lançar o avião, de não possuir trem de aterragem no avião e de ainda estarem favorecidos pelo vento forte que ajudou na descolagem no dia 17 de Dezembro de 1903. Na experiência de Santos Dumont, ainda que concretizada quase 3 anos mais tarde, em 23 de Outubro de 1906, em frente a uma multidão de testemunhas e oficiais da

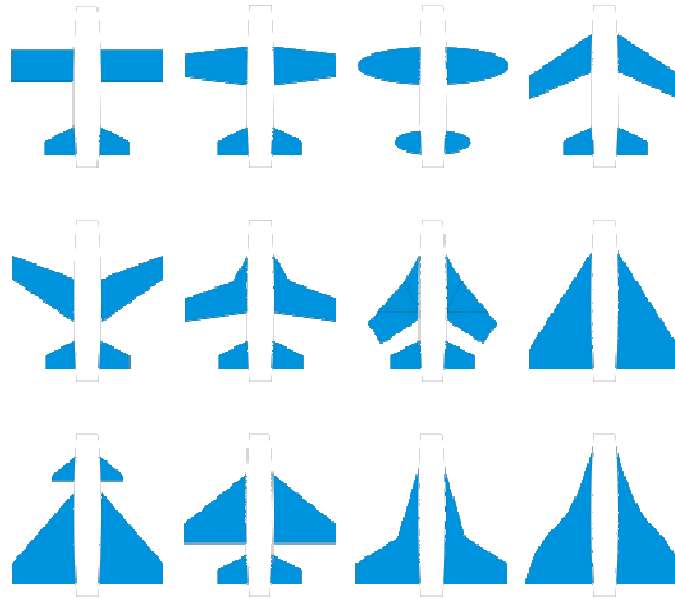


comunidade científica, levantou voo com a sua própria energia, possuía um trem de aterragem não desmontável e as condições de ar estavam calmas. Aparentemente, a solução do debate resume-se em saber como se define o primeiro voo de avião.

Inicialmente o avião era visto como um “brinquedo” mas a primeira guerra mundial serviu como palco de testes e deu ao avião o impulso que faltava, pois neste conflito o avião revelou-se de extrema importância no reconhecimento aéreo, bombardeamentos e combates aéreos. Na segunda guerra mundial, os aviões tiveram um papel fundamental, participando nas batalhas mais importantes da guerra, como por exemplo, o ataque a Pearl Harbor e o dia D. Nesta guerra o desenvolvimento tecnológico foi tal que surgiram grandes invenções tais como os aviões a jacto, radares, novas formas de comunicação, novos materiais de construção, etc. Dois anos após o fim da segunda guerra mundial foi alcançada a barreira do som num avião (realizado pelo americano Chuck Yeager num Bell-X1 em Outubro de 1947) e em apenas duas décadas mais tarde, o homem conquistou a lua.

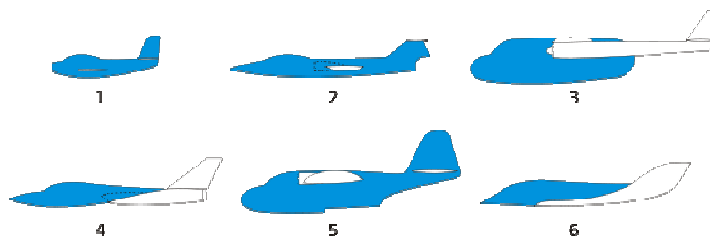
Actualmente, o avião é o meio de transporte mais rápido do planeta (exceptuando obviamente os foguetões aeroespaciais). Aviões a jacto comerciais conseguem atingir 900 km/h e cobrir numa questão de horas um quarto da esfera terrestre. No entanto, os aviões supersónicos (normalmente aviões militares) são capazes de atingir velocidades superiores várias vezes à velocidade do som.

Os componentes básicos do avião podem-se dividir em partes fixas e partes móveis. As partes fixas são as asas, a fuselagem e o motor.



**Fig. 18: Tipos de asa:**  
Recta, trapezoidal, elíptica e flecha respectivamente na primeira linha.  
Enflechamento negativo, flecha dobrada, de geometria variável e em delta respectivamente na segunda linha.  
Delta com canard, delta com timões, delta dobrada e ogival respectivamente na terceira linha  
(Wikipédia, 2005)

As asas podem ser monoplanos (uma asa), biplanos (duas asas) ou triplanos (três asas) e é o local onde normalmente se armazena o combustível.



**Fig. 19: Tipos de fuselagem:**  
1 - Para voo subsónico; 2 - para voo supersónico; 3 - Para voo subsónico e grande capacidade de carga;  
4 - Para voo supersónico e alta capacidade de manobra; 5 - Hidroavião; 6 - Para voo hipersónico.  
(Wikipédia, 2005)

Para a estabilidade e correcto controlo do movimento do avião, há partes móveis nas asas e outros pontos do avião. A Fig. 20 demonstra algumas dessas secções móveis.

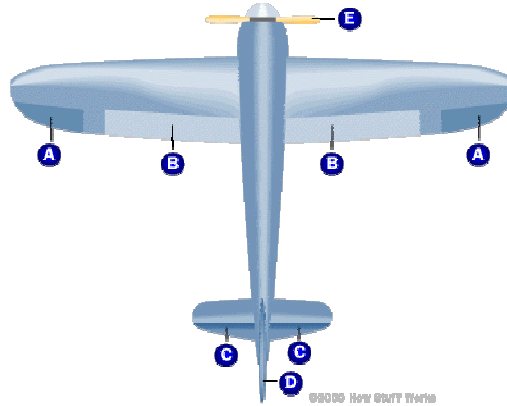


Fig. 20: A – Ailerons; B – Flaps; C – Elevadores; D – Leme; E – Hélice (Brain e Adkins, 2009)

Durante o voo o avião precisa de se movimentar em três formas básicas: num ângulo vertical (para cima e para baixo), num ângulo horizontal (para a esquerda ou direita) e rodando num eixo longitudinal (linha imaginária que cruza o aparelho desde a “cauda” ou traseira até ao “nariz” ou frente do avião). A manobra vertical é controlada pelos elevadores (ponto C da Fig. 20). Posicionando os elevadores para cima, a frente do avião levanta em orientação de subida, por outro lado tendo os elevadores virados para baixo, acontece exactamente o oposto, ou seja, a frente do avião baixa em orientação de descida. O movimento horizontal é efectuado através da peça móvel conhecida por leme (ponto D da Fig. 20). Se apenas o leme for utilizado, o avião desloca-se lateralmente numa espécie de derrapagem ou deslize. Controlar os *aileron*s (ponto A da Fig. 20) situadas nas extremidades da asa, força o avião a inclinar-se em torno do seu eixo longitudinal para o lado interno da curva, ao mesmo tempo que o leme o faz circundar de uma forma que o avião se inclina em direcção ao centro da curva. A segmentação da asa conhecida por *flap* (ponto B da Fig. 20) foi desenvolvida para modificar determinada área da asa de modo a permitir ao piloto controlar a quantidade de sustentação e velocidade do avião. Quanto maior a superfície da asa melhor a sua sustentação mas também proporcionalmente maior a resistência ao ar. Quando os flaps são baixados, a área de asa torna-se maior, e isso aumenta a resistência e leva à diminuição da velocidade do aparelho.

Exactamente para esse propósito de aumento de asa não só existem os *flaps* como também uma secção de asa de nome *slats*. Os *slats*, quando activados, produzem um ângulo de ataque superior (ângulo de ataque será explicado no ponto 3.3 “O Ar nas Asas do Avião”).

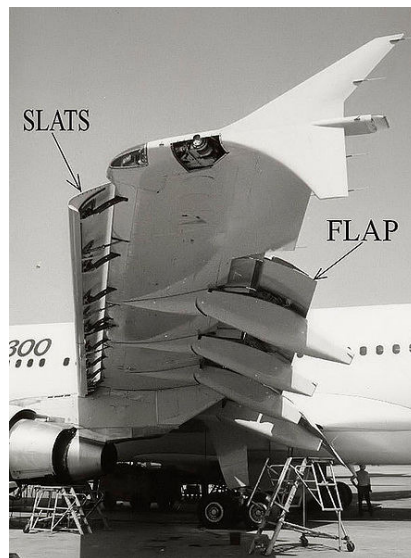


Fig. 21: Slats e flaps (Wikipédia, 2009k)

Ambos os dispositivos alteram o perfil da asa. Como se pode visualizar na Fig. 21 os *slats* situam-se na borda frontal da asa e os *flaps* na borda traseira da asa. Os *slats* e os *flaps* movem-se ao longo de pistas de metal construídas na asa. Estes dois dispositivos são utilizados em operações de baixa velocidade, nomeadamente as descolagens e aterragens, uma vez que é nestas situações que é necessário maior sustentação para levantar em pouca velocidade no caso de uma descolagem e maior resistência para abrandar a velocidade do avião em caso de aterragem.

### 3.2 O Fenómeno Natural do Vento

O vento é um fenómeno natural da terra e pode ser definido como sendo o ar em movimento. É o resultado do deslocamento de massas de ar, derivado das diferenças de

pressão atmosféricas, da radiação solar, humidade solar, evaporação, orografia (estudo das nuances do relevo de uma região), rugosidade do solo, etc. Para o estudo deste projecto vai-se dar ênfase à análise do factor mais directo na influência da formação do vento, que é a diferença de pressão atmosférica. A pressão atmosférica é criada pelas diferenças de temperatura e causa a deslocação do ar de um local com pressão atmosférica alta para outro local com pressão atmosférica baixa. Quando maior a diferença de pressão do ar, maior a velocidade do vento.

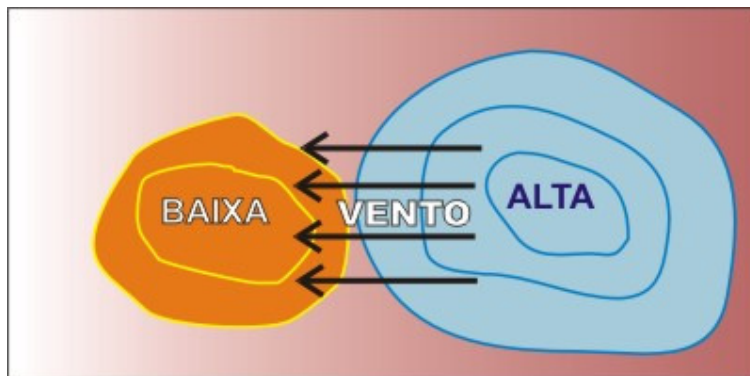


Fig. 22: Deslocação do vento pela diferença da pressão atmosférica (Reis, 2009)

É importante notificar que a descrição do vento explicada atrás tem o objectivo de definir sobre determinados conceitos como o vento e pressão atmosférica e que não se deve confundir a velocidade do vento com a velocidade do ar. A velocidade do vento é a velocidade de uma massa de ar atmosférica em relação a determinado ponto na terra enquanto a velocidade do ar é o movimento do ar que cruza a asa de um avião. Para se distinguir os dois elementos imagina-se uma pessoa que está dentro de um automóvel descapotável estacionado. O ar que a pessoa sente na cara é simplesmente o vento que passa. Agora, se essa pessoa iniciar a circulação do veículo contra o vento, ela certamente verificará que o movimento do ar aumentou. A justificação para essa ocorrência é porque o movimento do carro criou velocidade do ar relativa e ele mesmo, adicionando-a à do vento. Relacionando esse facto para o caso deste projecto, as asas de um avião podem voar a favor ou contra o vento, desde que haja ar a passar pelas asas o voo é possível.

### 3.3 O Ar nas Asas do Avião

Uma vez que uma aeronave é mais pesada do que o ar, para esta poder voar é necessária velocidade suficiente e um design aerodinâmico para atravessar uma espécie de “parede” de ar criada pela pressão de ar. As asas do avião em conjunto com o impulso dado pelas hélices ou turbinas a jacto são uma parte fundamental para garantir a sustentação do veículo. É uma característica comum a todos os aviões a necessidade de fluxo constante de ar pelas asas para a sustentação se verificar.

Para se entender o que se passa quando o ar passa pela asa do avião é preciso antes entender o movimento dos fluidos. Imagina-se que existe um tubo de diâmetro variável, dentro do qual atravessa água (Fig. 23).

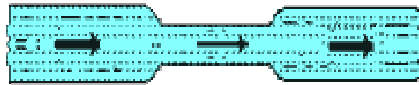


Fig. 23: Escoamento de água num tubo de diâmetro variável (Netto, 2009)

Como a mesma quantidade de água deve passar em todas as secções do tubo, no mesmo tempo, o fluxo de água é mais rápido na parte estreita do tubo do que nas partes mais largas. Devido à inércia, um corpo material (sólido, líquido ou gasoso), não pode modificar a sua velocidade por si só, logo o aumento de velocidade do fluxo de água na parte estreita do tubo indica que existe uma força aplicada ao corpo. Essa força é um efeito da diferença de pressão existente nos diferentes tamanhos do tubo. A parte pequena do tubo possui pressão mais baixa do que na parte mais larga do tubo. Resumindo, a água ao penetrar na parte estreita do tubo o movimento é acelerado devido à menor pressão presente e quando a água entra de novo numa parte mais larga do tubo, à direita (ver Fig. 23), a velocidade diminui novamente onde se verifica que a pressão é mais alta.

Este exemplo do tubo de diâmetro variável serviu para chegar à seguinte conclusão: Onde a velocidade de fluido é menor, a pressão é mais alta e vice-versa. Esta lei da física é conhecida como o princípio de Bernoulli, físico suíço (1700-1782) e é um

princípio de carácter geral, isto é, que se aplica a todos os tipos de movimentos de fluidos.

Considera-se uma corrente de ar em torno da asa de uma aeronave em pleno voo, em que a Fig. 24 evidencia o formato da asa e as linhas de ar que o percorrem.

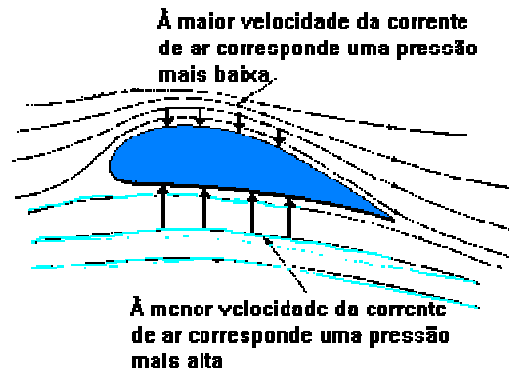


Fig. 24: Corrente de ar a atravessar uma asa de avião (Netto, 2009)

O formato das asas podem variar de avião para avião mas todos têm a mesma base de funcionamento. A parte superior da asa tem uma curvatura (na explicação sobre o ângulo de ataque mais à frente mostra que não é obrigatoriamente indispensável essa curva no topo da asa), logo o comprimento desta é maior do que a parte inferior da asa, o que provoca uma circulação de ar mais rápida na secção superior da asa do que na inferior. Isto pode ser explicado se aplicarmos a seguinte fórmula da velocidade:

$$V = \frac{d}{t}$$

Onde  $v$  representa a velocidade,  $d$  a distância percorrida e  $t$  o tempo que demora o ar a percorrer a extensão da asa. Considerando que quer sobre a asa ou sob a asa do avião o tempo é igual, e que a distância na secção superior da asa é maior que a secção inferior, então o valor da velocidade do ar é superior no topo da asa do que a parte inferior. Esta fórmula apenas demonstra de modo simples e geral a grandeza da velocidade sobre a asa

mas é preciso ter em atenção que uma asa tem muitos formatos e pormenores variantes em que esta fórmula não se aplica.

Segundo a previsão de Bernoulli explicada acima, se a velocidade do ar na secção superior da asa é maior, então a pressão nesse local (sobre a asa) torna-se menor. Elevando o veículo aéreo a uma determinada velocidade, a diferença de pressão torna-se suficiente grande para o avião levantar e manter o voo. Isso é possível devido a essa diferença de pressão entre a parte superior e inferior da asa resultar numa força de baixo para cima, que suporta o avião no ar e que se chama força de sustentação.

Uma outra teoria que foi utilizada para a explicação da força de sustentação mas que já foi descartada por se verificar que era uma hipótese errada era a teoria conhecida como igualdade de tempo de trânsito (*equal transit-time*) ou caminho longo (*Longer Path*). Esta teoria declarava que, por causa da maior distância da face superior da asa, o ar que lá passava tinha de ser maior para “apanhar” o ar que fluía na face inferior da asa. Desta maneira, as mesmas parcelas de ar divididas no início da borda da asa, que viajam em cima e por baixo da asa, juntavam-se novamente no fim da asa.

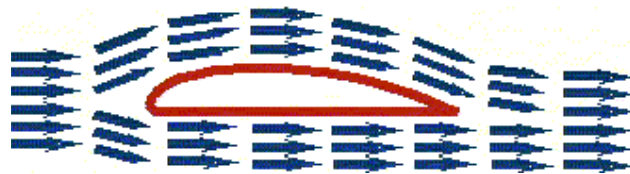


Fig. 25: As mesmas parcelas de ar que se dividem no início da asa, juntam-se no fim da asa (Anderson e Eberhardt, 2009)

Apesar de o ar que se move no topo da asa ser mais rápido não existe imposição de tempo de trânsito igual. De facto, o ar que se move no topo da asa que gera elevação é sempre mais rápido do que o que a teoria de trânsito igual implica. No *website National Committee for Fluid Mechanics Films/Educational Development Center* (<http://web.mit.edu/hml/ncfmf.html>), contém um filme chamado *Flow Visualization* que evidencia (a partir dos 5:29 minutos) o fluxo acelerado na superfície superior da asa em relação à superfície inferior e a atingir a extremidade final da asa primeiro que o fluxo inferior, contrariando assim a teoria *equal transit-time* que compreendia que as mesmas partículas de ar que se separaram no início se deviam juntar ao mesmo tempo no final. A



Fig. 26, Fig. 27 e Fig. 28 demonstra a circulação do ar em baixo e em cima da asa. Os pontos movem-se com o fluxo do ar e os pontos negros são linhas do tempo.

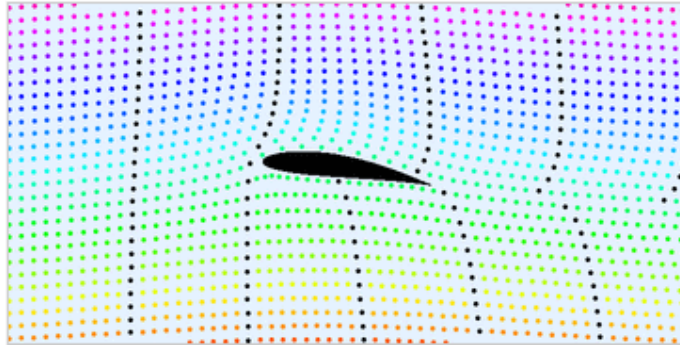


Fig. 26: Fluxo do ar no instante 1 (Wikipédia, 2009e)

Note-se na Fig. 26, na frente da asa o fluxo de ar prestes a dividir-se.

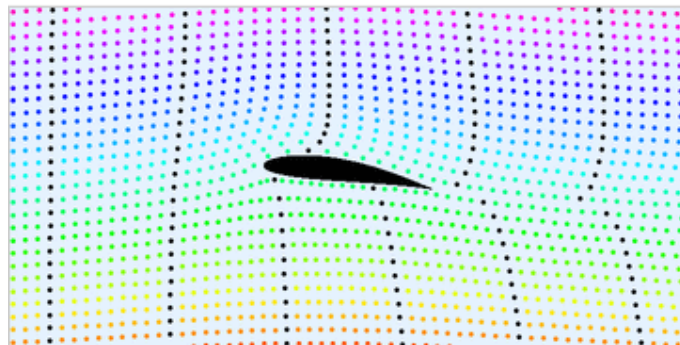


Fig. 27: Fluxo do ar no instante 2 (Wikipédia, 2009e)

Na Fig. 27, observa-se já um desfasamento considerável entre as mesmas parcelas de ar, no topo e fundo da asa.

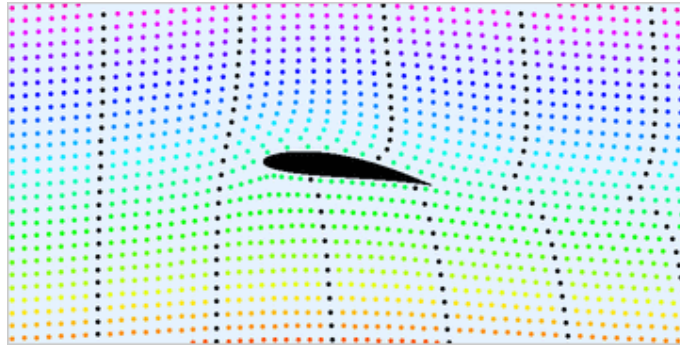


Fig. 28: Fluxo do ar no instante 3 (Wikipédia, 2009e)

Como se pode verificar pela Fig. 28, o fragmento de ar no topo da asa move-se mais rápido do que o fragmento da zona inferior.

Embora a explicação anterior da teoria do ar mais rápido em cima da asa seja uma explicação muito presente e assente na justificação do desempenho aerodinâmico das asas e consequente razão de voo das aeronaves, é preciso reconhecer que na realidade existe quem considere essa teoria ilógica, fruto de uma interpretação errada do princípio de Bernoulli. As equações de Bernoulli não possuem aplicação soberana na mecânica dos fluidos (um exemplo de outras equações no estudo da mecânica de fluidos são as equações de Navier-Stokes).

Não existe uma lei única e absoluta que explique exactamente e sem dúvidas qual a origem da elevação de um aparelho aéreo...“Ainda é impressionante que hoje, quase 100 anos depois do primeiro voo do Wright Flyer, grupos de engenheiros, cientistas, pilotos, e outros reúnem-se e têm um debate espirituoso sobre como uma asa de aeroplano gera elevação. Várias explicações são apresentadas, e o debate centra em que explicação é a mais fundamental” (Anderson, 2004, p. 352).

É importante ter noção que o princípio de Bernoulli é uma explicação popular sobre como é gerado sustentação, no entanto esta teoria implica que o voo invertido seja impossível. Esta noção de Bernoulli prevaleceu por muito tempo talvez por dar uma explicação fácil de entender. Isso não significa que o princípio de Bernoulli ou que a declaração de o ar circular mais depressa na parte superior da asa do que a parte inferior esteja errado mas a nossa compreensão do problema não está completa com este princípio. Para complementar a compreensão da elevação de um avião é necessária a lição dada pelas leis de Newton e pelo efeito de Coandă.

A primeira lei de Newton (ou princípio da inércia) diz que todo o corpo permanece em no seu estado de repouso ou de movimento rectilíneo e uniforme, a menos que seja obrigado a mudar o seu estado por forças a ele impressas. Isto significa que aquele aumento de velocidade do fluxo de ar no topo da asa ou aquela curva que o fluxo de ar faz só é possível se houver uma força a actuar. A terceira lei de Newton (ou lei do par acção-reacção) comunica que para qualquer acção, existe uma igual e oposta reacção, ou seja, quando um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, simultaneamente o corpo B exerce uma força sobre o corpo A de intensidade e direcção igual mas em sentido oposto. Por exemplo, um objecto em cima de uma mesa exerce uma força (o seu peso) na mesa e esta coloca uma força igual e oposta no objecto para o segurar. É importante perceber que o par acção-reacção, mesmo iguais e opostas nunca se anulam ou equilibram porque actuam sempre em corpos diferentes. Cada força que constitui o par tem o seu próprio efeito. Para gerar sustentação a asa deve fazer qualquer ao ar (o ar é a acção enquanto a sustentação é a reacção). O que a asa faz é a deflexão e aceleração do ar, gerando uma força de sentido para baixo empurrando a asa (a origem desta força será explicada mais adiante pelo efeito de Coandă). Se é produzida uma força para baixo, então pela terceira lei de Newton tem de haver uma outra força de igual intensidade de sentido contrário. Essa força de reacção é a força de sustentação na asa (de sentido para cima). Anderson (2004, p. 357) explica: “... a asa exerce uma força sobre o ar, empurrando o fluxo para baixo. Da terceira lei de Newton, a igual e oposta reacção produz sustentação”.

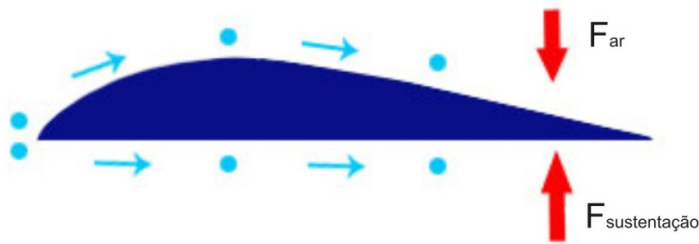


Fig. 29: A deflexão do ar é originada pela força do ar (acção). A força oposta é a força de sustentação (reacção)  
(Adaptado de Passeiweb.com, 2009)

Para gerar sustentação a asa tem de desviar grandes quantidades de ar. Se o ar deflectido e acelerado criou uma força para baixo então é porque tem massa. A segunda

lei de Newton (ou princípio fundamental da mecânica) refere que a resultante das forças aplicadas sobre um ponto material é igual ao produto da sua massa pela aceleração adquirida. Traduzido para uma expressão matemática:  $Força = massa * aceleração$ . Esta fórmula significa que a sustentação de uma asa é proporcional à quantidade de ar desviada pela parte superior da asa vezes a velocidade descendente desse ar. Para maior sustentação a asa pode desviar mais quantidade de ar (massa) ou aumentar a sua velocidade descendente.

A existência da força de sustentação está intrinsecamente relacionada com a força de sentido para baixo criada pela deflexão de ar no topo da asa. Mas qual é a origem dessa força? Esta questão pode ser respondida pelo efeito de Coandă, que descreve a tendência de um fluido aderir ou permanecer unido a uma superfície curva adjacente. A descoberta deste efeito provém do engenheiro aeronáutico romeno Henri Coandă em 1910, que foi o primeiro a reconhecer o fenómeno e a explorá-lo em muitas das suas patentes. Basicamente, quando um fluido se move (como a água ou ar) e entra em contacto com uma superfície curva, este tenta seguir essa superfície.

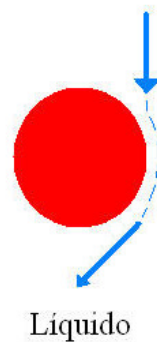


Fig. 30: Efeito Coandă (Wikipédia, 2008d)

No exemplo da Fig. 30, é verificado que se for derramado líquido (representada pela linha azul) numa face arqueada (representado pelo círculo vermelho), o líquido invés de cair na vertical tende a aderir o contorno da área curva, se a dobra ou ângulo de incidência do fluido com a superfície não for muito grande. Este efeito verifica-se porque um fluido possui viscosidade. A resistência de corrimento dá ao fluido uma espécie de propriedade de aglutinação. Como já foi explicado atrás pela primeira lei de Newton (ou

princípio da inércia), para o fluido se desviar é porque deve haver uma força a actuar e é precisamente essa a tal força de sentido para baixo que deflecte o ar, empurra a asa e logicamente pela terceira lei de Newton (ou lei do par acção-reacção) opõe-se a força de sustentação em sentido contrário.

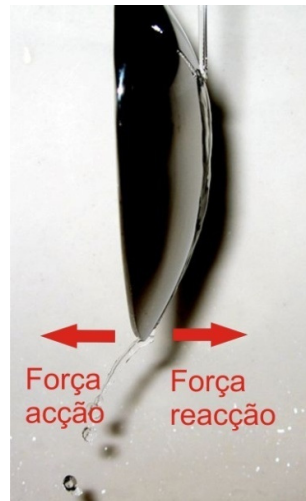


Fig. 31: Água a aderir à superfície da ponta de uma colher (adaptado de Wikipédia, 2008d)

Até agora foi evidente que é necessário que a deslocação do ar seja maior na área superior da asa, mas isso não implica necessariamente que a asa tenha de possuir na extremidade aquele topo curvo e moldado para criar uma maior superfície no cimo da asa.

O perfil aerodinâmico das asas é concebido normalmente para conter uma face maior no topo da asa porém isso nem sempre é assim. Por exemplo, um avião de papel tem as asas planas, o topo e fundo da asa com o mesmo comprimento e forma e no entanto o avião de papel consegue voar.

Contudo não consegue subir. O que é importante não é o comprimento da asa, mas sim aquela dobra que obriga ao fluxo do ar a curvar na parte de cima da asa e a formar força de sustentação. As asas podem ser simétricas e conseguir o tal arco no topo da asa. Embora não errada, neste caso específico de simetria de comprimento sobre e sob a asa, a fórmula da velocidade explicada anteriormente ( $V = \frac{d}{t}$ ) torna-se incoerente. Outra forma de atingir a curvatura do fluxo de ar e naturalmente maior força de

sustentação é através do uso de um conceito muito importante na aviação chamado ângulo de ataque.

O ângulo de ataque é o ângulo da asa em relação à direcção do ar que se aproxima, por outras palavras, é o ângulo formado pelo intradorso (que é parte de baixo da asa) e o fluxo de ar. Na Fig. 32 é apresentado esse ângulo de ataque entre a corda média aerodinâmica da asa (corda média é a linha que atravessa a asa) e a direcção do fluxo ar. As linhas pretas representam o fluxo de ar.

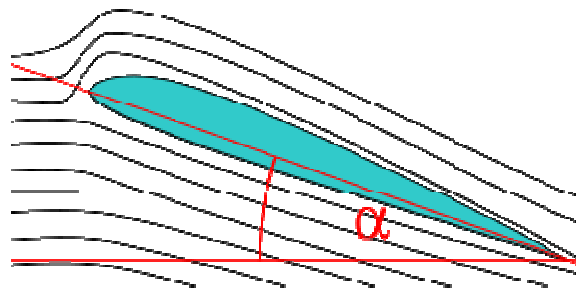


Fig. 32: O ângulo  $\alpha$  é o ângulo de ataque (Wikipédia, 2009i)

Na Fig. 33 é apontado as zonas de maior e menor pressão causado por um determinado ângulo de ataque e pelo formato arqueado da superfície superior da asa.

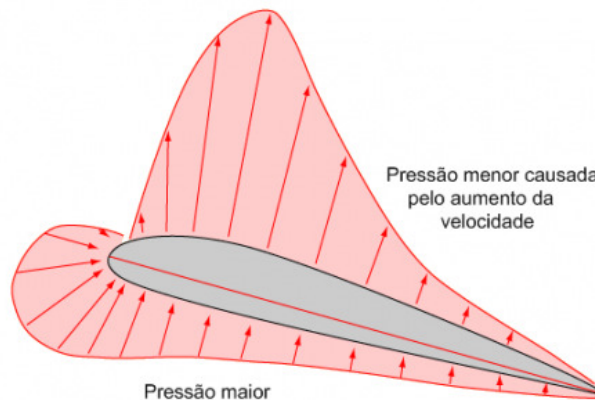


Fig. 33: Pressões criadas na asa com certo ângulo de ataque e perfil de arco no topo (uorever.wordpress.com, 2009)

O propósito do ângulo de ataque é providenciar mais força de sustentação mas isso não significa que quanto maior o ângulo de ataque maior a elevação do avião. Geralmente, as asas compelem um valor de força de sustentação máxima com o ângulo de ataque de 10 a 15 graus. Acima disso, a sustentação decresce. Se o ângulo de ataque for amplificado até determinado ponto, o avião entra em perda (*stall*) pois a asa não obtém a sustentação necessária para manter o aparelho em voo. Em situação contrária, se o ângulo de ataque diminuir, o ar na asa acelera e o avião perde altitude muito rapidamente.

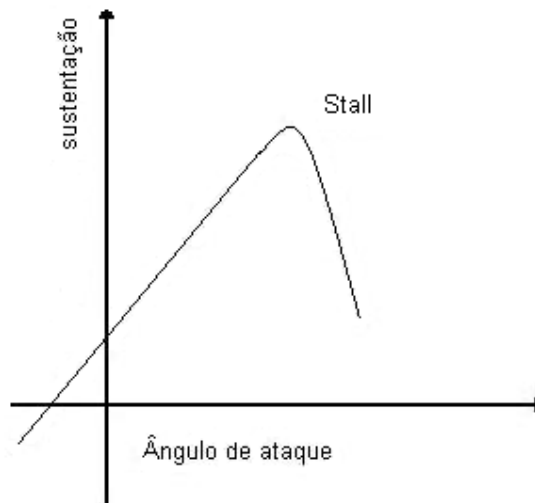


Fig. 34: Gráfico que mostra a relação entre ângulo de ataque e valor da força de sustentação (adaptado de voodeteste.blogspot.com, 2008)

Experiência 1: O sítio da *internet* <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong1.html> tem uma pequena aplicação em java que permite alterar o ângulo de ataque, seleccionar os parâmetros que se deseja observar, tais como a velocidade ou a pressão em qualquer ponto da asa para se analisar os valores obtidos e verificar o comportamento do ar a passar na asa.

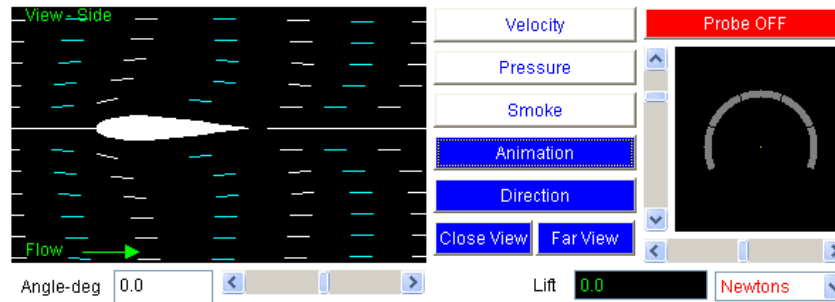


Fig. 35: Simulador de fluxo de ar numa asa com perfil simétrico (experiência 1) (Benson, 2008a)

Para a finalidade desta experiência apenas se mediu a grandeza da força de sustentação em relação ao ângulo de ataque da asa. Os resultados dessa relação entre o ângulo de ataque e a força de sustentação da experiência 1 são visíveis na seguinte tabela:

| Ângulo de Ataque (Graus) | Sustentação (Newtons) |
|--------------------------|-----------------------|
| -10.0                    | -4136                 |
| 0.0                      | 0.0                   |
| 2.5                      | 697                   |
| 5.0                      | 1393                  |
| 7.5                      | 2086                  |
| 10.0                     | 2775                  |
| 12.5                     | 3459                  |
| 15.0                     | 4136                  |

Tabela 2: Relação ângulo de ataque e força de sustentação numa asa com perfil simétrico

Experiência 2: No seguinte endereço de *web* <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/incline.html> existe outro programa java semelhante ao da experiência 1 mas que contém um gráfico que apresenta os valores da força de sustentação consoante o ângulo de ataque seleccionado. A forma de asa desta experiência é distinta da forma de asa da experiência 1.



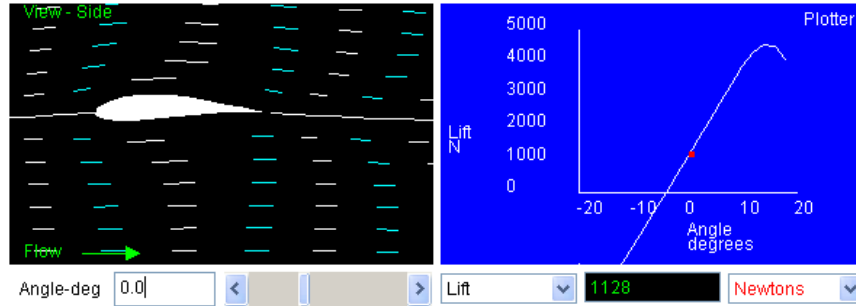


Fig. 36: Simulador de fluxo de ar numa asa com perfil assimétrico (experiência 2) (Benson, 2008b)

Os resultados da relação entre o ângulo de ataque e a força de sustentação da experiência 2 são visíveis na seguinte tabela:

| Ângulo de Ataque (Graus) | Sustentação (Newtons) |
|--------------------------|-----------------------|
| -10.0                    | -1664                 |
| 0.0                      | 1128                  |
| 2.5                      | 1825                  |
| 5.0                      | 2517                  |
| 7.5                      | 3205                  |
| 10.0                     | 3887                  |
| 12.5                     | 4419                  |
| 15.0                     | 4574                  |

Tabela 3: Relação ângulo de ataque e força de sustentação numa asa com perfil assimétrico

Destas duas experiências, observa-se que para os mesmos ângulos de ataque em ambas as experiências, existem diferentes valores de força de sustentação. Note-se que o formato da asa da experiência 1 (ver Fig. 35) tem um perfil simétrico (design igual na superfície superior e inferior da asa) enquanto o formato da asa da experiência 2 tem uma forma diferente na parte superior e inferior da asa (ver Fig. 36). Pode-se concluir que o feitio das asas é um factor determinante na variação da força de sustentação. Evidencia-se também, na circunstância de asa com um ângulo de ataque a 0.0 graus, que na experiência 1 não existe força de sustentação devido ao carácter simétrico da asa, que não gera a curvatura necessária do fluxo de ar na superfície superior da asa. No caso da asa

assimétrica da experiência 2 descobre-se que mesmo sem ângulo de ataque o formato da asa confere força de sustentação considerável. Pelos valores apresentados das experiências, verifica-se que se obtêm maior capacidade de sustentação se a asa possuir conjuntamente determinado ângulo de ataque e um design de asa com topo suficientemente curvo.

### 3.4 Forças Aplicadas ao Avião

Na aeronáutica, o avião mantém-se no ar graças à existência de quatro forças básicas da aerodinâmica. Essas forças que actuam num avião em voo são: o impulso, a resistência do ar ou arrasto, a sustentação e o peso do avião (gravidade). Cada força trabalha numa específica direcção.

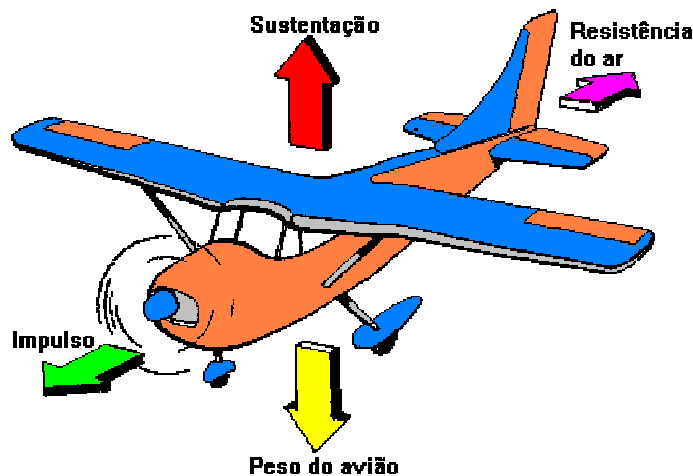


Fig. 37: As 4 forças aplicadas a um avião em voo (Netto, 2009)

O peso é uma força que aponta sempre para o centro da terra (também conhecida como força da gravidade). Quando uma pessoa se pesa, está a medir a força da gravidade da terra do seu corpo. Uma vez que os aviões têm peso, a força da gravidade está a puxar esses aviões em direcção à terra, quer estejam a grande altitude ou no solo. Voar carrega

dois grandes problemas: superar o peso do avião por alguma força contrária e controlar o veículo em voo.

A sustentação é uma força aerodinâmica, gerada pelo movimento da aeronave através do ar e a maioria da sustentação é criada pelo movimento do ar a passar nas asas, embora também possa ser criada por outras partes da estrutura do avião. A direcção da força de sustentação é sempre perpendicular à orientação das asas. Como o peso de uma aeronave é imenso, este necessita de gerar muita força de sustentação e se for conseguida de modo a vencer a força do peso, então o avião voará. Se a sustentação for superior ao peso (em módulo) o avião sobe, (tanto em pleno voo como na descolagem), caso contrário desce (descida aplicável apenas na condição de voo nivelado, mais à frente se verificará que não é sempre assim). A velocidade do avião em relação ao ar precisa de ser relativamente grande para que o ar que atravessa as asas desenvolva força de sustentação suficientemente intensa de modo a compensar a gravidade aplicada ao avião.

O avião atinge essa velocidade através da força de impulso dado pelo motor (a hélices ou turbinas a jacto). A direcção da força de impulso (ou tracção) depende para onde os motores apontam e está sempre alinhado com a direcção de voo<sup>5</sup>. À medida que a intensidade do impulso aumenta, a velocidade do avião aumenta. Mas quanto mais velocidade se conquista mais resistência do ar ao avanço de avião se forma. Para vencer a resistência do ar é necessário ainda mais impulso até este ser superior ao arrasto, e também para isso é que os aviões são desenhados para possuírem um perfil aerodinâmico (por exemplo asas finas) que ofereça pouca resistência.

A resistência do ar ou arrasto acontece devido à resistência da separação das moléculas de ar quando o avião se move e atravessa o ar. O arrasto é uma força oposta ao sentido do voo (está sempre alinhada com a direcção do fluxo de ar) e que resiste ao movimento de objectos. A quantidade de resistência depende do tamanho da aeronave, dos detalhes do contorno e “suavidade” do avião, da eficiência da sustentação na asa e da pressão dinâmica (densidade e velocidade) do ar. Na situação da força de impulso ser superior à resistência do ar (em módulo), o avião acelera, caso contrário o avião perde velocidade. Em equilíbrio, isto é, quando o avião está com velocidade constante, o impulso é igual à resistência do ar (em módulo).

---

<sup>5</sup> Tal aplica-se a aviões de propulsão convencional porque existem excepções, como por exemplo, o avião de ataque Harrier que tem capacidade de levantar voo verticalmente.

No caso particular de o voo ter velocidade constante e existir ângulo de ataque diferente de zero na direcção de voo aplica-se algumas regras diferentes às explicadas atrás.

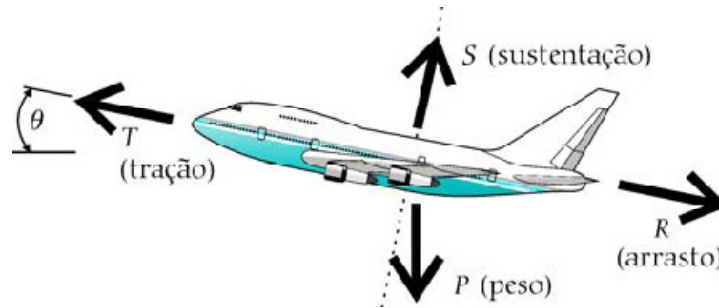


Fig. 38: Forças sobre um avião durante a subida com velocidade constante e taxa de ascensão constante (Studart e Dahmen, 2006)

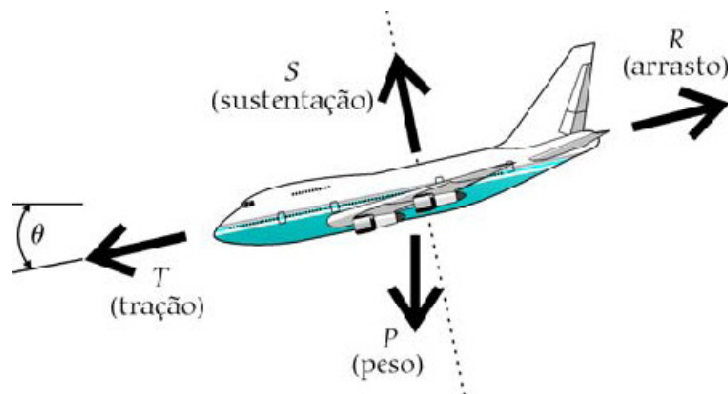


Fig. 39: Forças sobre um avião durante a descida com velocidade constante e taxa de descensão constante (Studart e Dahmen, 2006)

Para um avião que está em voo de cruzeiro com velocidade constante num plano nivelado, a resultante das forças é nula, ou seja, neste caso a sustentação é igual ao peso ( $S = P$ ) e do mesmo modo a tração e arrasto também são iguais ( $T = R$ ). Porém, as condições são outras na subida ou na descida. Na Fig. 38, o avião está a subir a uma velocidade e taxa de ascensão constante e o esquema de forças com um referencial relativo à direcção longitudinal do avião mostra no eixo dos y que:

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow T - P * \text{Sen } \theta - R = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow S - P * \text{Cos } \theta = 0 \Leftrightarrow S = P * \text{Cos } \theta \quad (2)$$

Sendo a velocidade constante, o somatório das forças é igual a zero. Agora para a Fig. 39, que representa a descida do avião<sup>6</sup> e considerando novamente que não existe aceleração temos:

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow T + P * \text{Sen } \theta - R = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow S - P * \text{Cos } \theta = 0 \Leftrightarrow S = P * \text{Cos } \theta \quad (4)$$

Como se pode verificar na equação 4, o avião durante a descida tem sustentação menor que o peso, o que já devia ser óbvio uma vez que é a força da gravidade que “puxa” o avião em direcção à terra. Chega-se a esta conclusão se for dado alguns valores ao ângulo  $\theta$ . Se o avião estiver nivelado, então este ângulo  $\theta$  é igual a zero, o que fica  $S = P$ . Tendo em conta que a força do peso é sempre a mesma, se diminuirmos o ângulo  $\theta$ , o valor da sustentação  $S$  diminui tornando-se assim inferior ao peso.

O interessante é que a equação 4 é exactamente igual à equação 2, que representa o avião numa subida. Conclui-se então que para qualquer ângulo de ataque a sustentação é menor que o peso e que estas duas forças apenas se igualam em voo nivelado (ambas as situações para velocidades constantes).

Se na subida do avião a sustentação é inferior ao peso, então como é que o avião está a subir? Para ser de mais fácil compreensão a resposta a esta questão será melhor decompor o sistema de coordenadas num referencial relativo a um observador no solo. Assim, as equações 1 e 2 passam a ser formuladas da seguinte maneira:

---

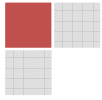
<sup>6</sup> A posição do avião na Fig. 39 não é uma posição de aterragem. Esta posição é característica de uma descida rápida sendo a posição de aterragem de um avião semelhante à da Fig. 38.

$$\sum F_x = 0 \Leftrightarrow T * \cos \theta - R * \cos \theta - S * \sin \theta = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow T * \sin \theta + S * \cos \theta - R * \sin \theta - P = 0$$

$$\Leftrightarrow (T - R) \sin \theta + S * \cos \theta = P \quad (6)$$

Pode-se verificar que para contrabalançar o peso e tendo em conta o que foi visto anteriormente sobre quanto maior o ângulo de ataque menor a sustentação (para velocidades constantes), a diferença reside no termo  $(T - R) \sin \theta$ , ou seja, se a tracção for maior que o arrasto então é exactamente esta discrepância que compensa para o balanço das forças e permite o movimento ascendente e uniforme do avião.



## 4. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO

*“Toda a genuína educação  
provém da experiência”*

John Dewey, 1938

Este capítulo explica mais detalhadamente os passos que foram dados para cumprir os objectivos propostos no desenvolvimento deste projecto. Esta dissertação segue uma metodologia de desenvolvimento baseado num processo de ensino e aprendizagem servindo-se de ferramentas multimédia. As etapas passam pela identificação do problema, pesquisa bibliográfica, desenvolvimento do software háptico, respectiva validação desse software e por fim análise dos resultados e realização de conclusões. Também é descrito as funcionalidades e descrição técnica da aplicação, e por fim é realizada a análise de resultados.

### 4.1 Metodologia

#### 4.1.1 Identificação do problema

A identificação do assunto remete a novas didácticas adoptadas a um cenário educativo admitindo regras ou formas de ensino mais associadas à prática ou experiência. Na revista de imprensa Público, Costa (2006) escreve o seguinte: “Durante o Debate Nacional sobre Educação que teve lugar no Parlamento... José Sócrates afirmou que a Educação precisa de ‘menos ideologia’ e de ‘mais resultados’... Maria de Lurdes Rodrigues afirmava no Fórum da Maia, uma semana depois, que os alunos obteriam ‘melhores resultados se a escola se oferecesse como um espaço de saber-fazer e não só de retórica’”. Esta afirmação descreve o panorama do estado da educação em Portugal alusivo à falta do saber experimental. É nesta matéria que esta dissertação aponta para a criação e desenvolvimento de um modelo de ensino com concepção prática, nomeadamente na utilização de sistemas hápticos e realidade virtual. Actualmente, a implementação de novos modelos educacionais que sejam estimulantes, participativos e

que encaminhem os estudantes na procura de soluções a problemas vivenciais, relacionando teoria com prática ainda se encontra em falha (Pereira et al., 2007). A palavra-chave para este problema é a participação, em que o aluno deve desfrutar de um papel mais centrado nas suas próprias experiências durante a aprendizagem. “...a pesquisa decorre de uma concepção prática aplicada à construção do conhecimento, na qual o aluno é o centro do processo de aprendizagem e de construção do próprio ambiente...” (Demeterco e Alcântara, 2004, p. 80).

#### 4.1.2 Pesquisa bibliográfica

Actualmente a *internet* é a maior fonte de informações existente e *sites* como o Google, Google Académico e Google Imagens providenciam óptimas matérias para a investigação de qualquer tema com acesso simples e rápido. O trabalho bibliográfico efectuado tem a *internet* como instrumento favorecido na pesquisa de artigos e dados pertinentes para esta dissertação tais como a procura de informações sobre o estado da educação, a utilização de sistemas hápticos no ensino, as linguagens de programação, a física do avião em voo, etc.

A pesquisa e estudo da física aerodinâmica do avião, assim como as linguagens de programação do sistema háptico demonstram-se fundamentais para o desenvolvimento da simulação virtual 3D interactiva.

O intervalo de idades dos alunos a quem está orientado este tipo de simulação física de forças estará compreendido entre os 14 e 16 anos, intervalo este onde se assume que o plano de estudos escolar aborda esta matéria e que já foram assimiladas as bases da física necessárias para o entendimento da simulação. Se este processo se comprovar eficaz, torna-se definitivamente maior o leque de experiências possíveis de criar e ensaiar num ambiente virtual, uma vez que muitas experiências educativas são difíceis de realizar no mundo real.



### 4.1.3 Implementação da simulação

O fenómeno em estudo é o movimento do ar e consequente comportamento que produz em determinados objectos, tais como as asas de um avião, sendo este comportamento definido e testemunhado essencialmente pelas forças que são reproduzidas no aparelho háptico e pela informação visual existente na simulação para auxiliar os estudantes a associar os valores e direcções das forças que estão a experimentar na realidade. Embora o objectivo central seja a aprendizagem por meios práticos, será benéfico ou mesmo indispensável a assistência de um pedagogo ou tutor na comunicação da matéria e compreensão dos resultados que a simulação exerce.

Os utilizadores sentirão os efeitos da simulação de forma táctil através do aparelho háptico Novint Falcon. No momento este é o melhor investimento porque é um dispositivo vencedor de vários prémios, é uma tecnologia recente, é capaz de exercer mais de 1 Kg de força e o preço é bastante acessível em comparação com outros aparelhos hápticos.

Na Tabela 4 é disponibilizada uma lista com os custos/benefícios de vários aparelhos hápticos. É de notar a grande diferença de preço do Novint Falcon comparativamente aos restantes aparelhos hápticos.

| Nome                              | Preço (€) | Peso (Kg) | GDL (input) | GDL (output) | Espaço de Trabalho (mm) | Força Máx (N) |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|-------------------------|---------------|
| <b>Novint Falcon</b>              | 133       | 2.72      | 3           | 3            | 102x102x102             | 8.9           |
| <b>Haption Virtuose 6D35-45</b>   | 85 000    | -         | 6           | 6            | 1080x900x600            | 35            |
| <b>F.D. delta.6 haptic device</b> | 59 250    | -         | 6           | 6            | 360x360x300             | 20            |
| <b>STPP 3.0/6DOF</b>              | 56 315    | -         | 6           | 6            | 838x584x406             | 22            |
| <b>STPP 3.0</b>                   | 42 855    | -         | 6           | 3            | 838x584x406             | 22            |
| <b>STPP 1.5/6DOF/HF</b>           | 42 145    | -         | 6           | 6            | 381x267x191             | 37.5          |
| <b>STPP 1.5/6DOF</b>              | 38 605    | -         | 6           | 6            | 381x267x191             | 8.5           |
| <b>FD delta.3 haptic device</b>   | 32 350    | -         | 3           | 3            | 360x360x300             | 20            |
| <b>STPP 1.5/HF</b>                | 23 020    | -         | 6           | 3            | 381x267x191             | 37.5          |
| <b>STPP Premium 1.5</b>           | 19 480    | -         | 6           | 3            | 381x267x191             | 8.5           |
| <b>STPP 1.0</b>                   | 14 485    | -         | 6           | 3            | 254x178x127             | 8.5           |
| <b>FD Omega.3 haptic device</b>   | 13 900    | -         | 3           | 3            | 160x160x120             | 12            |
| <b>STP Desktop</b>                | 9 210     | -         | -           | -            | 160x120x120             | 7.9           |
| <b>STP Omni</b>                   | 1 700     | 1.8       | 6           | 3            | 160x120x70              | 3.3           |
| <b>Haption Virtuose 3D15-25</b>   | -         | -         | 6           | 3            | 644x500x350             | 15            |

Tabela 4: Lista de custo/benefícios de aparelhos hápticos (Inition, 2009a)

Para a aplicação reconhecer o dispositivo e funcionar correctamente com os seus comandos é necessário instalar os drivers que vem com a compra do aparelho (ou pode-se descarregar no *site* da Novint). Se necessário para determinadas aplicações é também disponibilizada no *site* (<http://home.novint.com>) um SDK para desenvolvimento de novas rotinas ou modificações das existentes.

O programa é escrito em X3D e Python com recurso à H3D API (versão 2.0). Deu-se atenção de comentar as instruções ao longo da aplicação para apoio futuro caso seja dada continuação na expansão ou aperfeiçoamento deste.

#### 4.1.4 Validação da simulação

A validação da simulação foi realizada com duas turmas do primeiro ano de engenharia informática do ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto). O processo de teste foi efectuado do seguinte modo:

- 1) Demonstração do aparelho háptico em acção utilizando os tutoriais disponíveis do N VeNT<sup>7</sup> (existente num DVD na compra do dispositivo háptico ou para download no *site* da Novint).
- 2) Explicação de alguns conceitos necessários para a compreensão da simulação das forças da aerodinâmica.
- 3) Esclarecimento da *interface* da simulação da física aerodinâmica e experimentação da mesma.
- 4) Ensaio de actividades para os alunos efectuarem e tentarem resolver uma série de questões sobre o comportamento do avião e forças exercidas.
- 5) Entrega de um questionário sobre a percepção que os alunos ficaram sobre a simulação, os sistemas hápticos e a sua utilização no ensino.

## 4.2 Concepção

Antes do desenvolvimento do simulador é necessário passar pela definição dos requisitos do programa. Uma vez que na física do voo estão implicadas quatro forças (sustentação, peso, impulso e resistência do ar), estas são fundamentais na representação do voo aerodinâmico do avião. A aplicação tem de simular as quatro forças através do dispositivo háptico em função da velocidade e ângulo de ataque, sendo o valor destas duas variáveis uma funcionalidade realizada pelo utilizador. O dispositivo háptico traduz

---

<sup>7</sup> Programa da Novint para informações, jogos, actualizações de software, conteúdos especializados e comunidades, tudo isto para o dispositivo háptico Falcon.

as forças do programa na mão do utilizador trabalhando num eixo vertical e num eixo horizontal, compondo forças independentes nestas duas direcções de acordo com a velocidade e ângulo de ataque.

Graficamente, não pode faltar o avião e a existência de informação para melhor compreensão da matéria torna-se pertinente: um esquema de forças para se visualizar a direcção e valor de cada uma das forças, descrição do estado do avião (se está a subir ou a descer) e exposição da grandeza da velocidade e ângulo de ataque. Para conceber uma melhor noção da velocidade, a presença de referências ao vento é uma mais-valia.

## 4.3 Implementação

Este capítulo expõe sobre a parte técnica da aplicação, nomeadamente as linguagens de programação utilizadas, as ferramentas de desenvolvimento, demonstração de código mais relevante e explicação do funcionamento do simulador.

### 4.3.1 Descrição técnica

A aplicação foi totalmente desenvolvida em X3D e Python utilizando a ferramenta *Programmer's Notepad* para escrita do código. A renderização gráfica e háptica foram geradas através da H3D API. Para o funcionamento correcto deste sistema basta descarregar e instalar a última versão da H3D API, disponível no seguinte endereço *web*: <http://www.h3dapi.org/modules/PDdownloads/viewcat.php?cid=14>. Obviamente também será necessária a instalação dos drivers do dispositivo háptico Novint Falcon. Após a instalação é possível correr o ficheiro X3D, e para isso é preciso abrir a linha de comandos, aceder ao directório onde se encontra o ficheiro X3D e Python e escrever:

```
h3dload.exe nome_do_ficheiro.x3d
```

Este comando executa o ficheiro X3D (que contém o código escrito baseado em etiquetas como no xml) e este por sua vez liga ao ficheiro Python. O acesso é feito pelo seguinte código:

```
<PythonScript DEF="PS" url="nome_do_ficheiro.py">
```

Para trabalhar com o aparelho háptico é essencial a criação de uma referência ao dispositivo que está activo:

```
<IMPORT inlineDEF='H3D_EXPORTS' exportedDEF='HDEV' AS='HDEV' />
```

Com esta linha de código o dispositivo háptico é reconhecido como um nó de nome HDEV.

É no ficheiro X3D que está definido a aparência da simulação, ou seja, é onde está registado a geometria e cores dos objectos 3D e no ficheiro Python é onde está definido o “comportamento” desses mesmos objectos. Um exemplo da criação de um objecto (representação do vento) em X3D é exposto a seguir:

```
<!-- Vento -->
<Group DEF="VENTO">

    <!-- Parte rectangular do vento -->
    <Shape>
        <Appearance>
            <Material diffuseColor="0.2 0.2 0.5" />
        </Appearance>

        <Box size="0.02 0.005 0.1" />
    </Shape>

    <!-- parte triangular do vento -->
    <Transform translation="0 0 0.07" rotation="1 0 0 1.5707963267948"
scale="1 1 0.2" >
```

```

<Shape>
  <Appearance>
    <Material diffuseColor="0.9 0.1 0.1" />
  </Appearance>

  <Cone bottomRadius="0.03" height="0.04" />
</Shape>
</Transform>
</Group>

```

Como se pode verificar no código primeiro é criado um nó *Group* com o nome “VENTO” e de seguida evidencia-se uma etiqueta *Shape* que dará forma ao objecto. Dentro deste nó ainda existe outra etiqueta de aparência que possui o nó *Material* e que define um campo *diffuseColor* (definição de cor difusa). Há outros campos que podem ser determinados neste nó de material como por exemplo o brilho do objecto (*shininess*), a intensidade de ambiente (*ambientIntensity*) ou a transparência (*transparency*). Ainda na etiqueta de aparência se descreve a forma do objecto que pode ter uma forma rectangular (*box*), cilíndrica (*cylinder*), esfera (*sphere*), cone (*cone*), etc. Cada uma destas formas tem os seus próprios campos caracterizadores como por exemplo no caso do cone, o campo *bottomRadius* e *height*. O texto que estiver dentro de *<!-- e -->* é considerado comentário. Para a impressão de caracteres no programa escreve-se o nó *Text* (dentro do nó *Shape*) o seguinte código:

```

<Shape>
  <Appearance>
    <Material diffuseColor="1 1 1" />
  </Appearance>
  <Text string="ATRITO">
    <FontStyle family="Arial" size="0.015" />
  </Text>
</Shape>

```

O propósito do uso do nó *Group* é a possibilidade de criar o mesmo objecto as vezes necessárias sem ter de escrever a mesma quantidade de código. Assim:

```
<!-- Vento 2 -->  
<Transform translation="-0.2 -0.2 0" >  
    <Group USE="VENTO"></Group>  
</Transform>
```

O nó *Transform* modifica a posição, rotação ou escala do novo objecto. Dentro desse nó simplesmente chama-se a criação de um novo objecto “VENTO”.

A associação de um objecto ao dispositivo háptico é realizada da seguinte maneira:

```
<!-- ASSOCIA O APARELHO HAPTICO A UM OBJECTO -->  
  
    <ROUTE fromNode='HDEV' fromField='trackerPosition' toNode='PS'  
toField='moveAviao' />  
    <ROUTE fromNode='PS' fromField='moveAviao' toNode='AVIAO'  
toField='translation' />
```

A primeira linha de código traça a rota para uma instância da classe *moveAviao* (função Python) enviando a posição do dispositivo háptico (campo *trackerPosition* do nó HDEV) para o nó PS (referência do ficheiro Python). No Python a função *moveAviao* é:

```
class MoveAviao(AutoUpdate( SFVec3f ) ):  
    def update( self, event ):  
        if( event.getValue() ):  
            posicao=event.getValue()  
            return posicao
```

Esta função tem variável de entrada e saída do tipo *vec3f*, que é um vector para três localizações dimensionais (ou valores RGB), uma vez que recebe na variável posição

o valor do evento que foi lançado (neste caso a posição do dispositivo háptico) e retorna esse mesmo valor de volta para a rota definida na segunda linha de código do X3D. Note-se a utilização directa da variável *posicao*, no Python as variáveis não precisam de ser definidas e inicializadas. Também é importante referir que é necessário no documento Python instanciar as classes criadas:

```
moveAviao=MoveAviao()
```

Na segunda linha de código do X3D há uma rota definida do nó “PS” e campo *moveAviao* para o nó “AVIAO” e campo *translation*, para o objecto “AVIAO” actualizar a sua posição igual à do aparelho háptico. O objectivo “AVIAO” está escrito no documento X3D da seguinte forma:

```
<Group>  
  <Transform DEF="AVIAO" rotation="1 0 0 0">  
    <Inline url="p38.x3d"></Inline>  
  </Transform>  
</Group>
```

Com a etiqueta *Inline* é possível importar outro ficheiro X3D para “arrumar” grandes quantidades de código de programação que alguns objectos contêm da sua geometria.

Evidentemente é possível actualizar campos X3D com tipos de variáveis diferentes. Este exemplo a seguir mostra como isso se faz com a funcionalidade de mudar o volume de um ficheiro de som com as teclas + e – do teclado. Inicialmente contém no documento X3D a criação do nó de som:

```
<!-- SOM -->  
  
<Sound DEF="SOUND" maxFront="0.9" maxBack="0.9" minFront="0.0001"  
intensity="1.0">
```



```
<AudioClip DEF="AUDIO" url="som_helice.wav" loop="TRUE"/>
</Sound>
```

Ainda no X3D, é preciso escrever o caminho para a função do Python:

```
<KeySensor DEF="KS" />

<ROUTE fromNode="KS" fromField="keyPress" toNode="PS"
toField="mudarSom" />
<ROUTE fromNode="PS" fromField="mudarSom" toNode="SOUND"
toField="intensity" />
```

O nó *KeySensor* é o nó referência do teclado. O primeiro *route* lança um evento quando uma tecla é carregada e envia-o para o documento Python. No ficheiro Python a classe é a seguinte:

```
class MudarSom(TypedField(SFFloat, SFString)):
    def update(self, event):
        global som

        tecla = event.getValue()

        if(tecla == '+' and som < 9.3):
            som = som + 0.2
        elif(tecla == '-' and som > 1):
            som = som - 0.2

        # impressão do valor do som
        print som

        return som
```

A class *MudarSom* recebe um valor do tipo string (a tecla que foi carregada) e retorna um valor do tipo float (o valor do som para actualizar). A variável *tecla* recebe o valor do evento ocorrido e depois é feita a verificação e actualização da variável *som*

(variável esta que é global para não perder o seu valor no próximo evento). Os comentários são escritos à frente do símbolo #. É importante não esquecer a instanciação da classe MudarSom:

```
mudarSom=MudarSom()
```

Outra maneira de actualizar campos X3D com novos valores é através da criação de referências para etiquetas X3D. Isto é realizado dentro do nó *PythonScript* do seguinte modo:

```
<DynamicTransform DEF="DT" momentum="0 0 0.1" position="0 0 -1">
  <!-- Vento 2 -->
  <Transform translation="-0.2 -0.2 0" >
    <Group USE="VENTO"></Group>
  </Transform>
</DynamicTransform>

<PythonScript DEF="PS" url="aero.py" >
  <Node USE="DT" containerField="references" />
</PythonScript>
<ROUTE fromNode="DT" fromField="position" toNode="PS"
toField="cicloSetasVento" />
```

Assim para aceder aos campos do nó *DynamicTransform* não é necessário criar etiquetas *routes* para transmissão de dados (embora pode ser preciso uma *route* para lançar um evento como neste caso), bastando escrever no documento Python:

```
dt = references.getValue()[0]

class CicloSetasVento(AutoUpdate(SFVec3f)):
  def update(self, event):

    pos = event.getValue().z
```

```
if( pos > 0.04):  
    x = Vec3f(0, 0, -1) #posicao para reiniciar  
    dt.position.setValue(x)  
  
return Vec3f(0,0,0)
```

A variável “dt” fica referenciada ao nó *DynamicTransform* e é utilizada na classe *CicloSetasVento* no código *dt.position.setValue(x)*, sendo *position* um campo do nó. O valor do *return* embora forçoso para não surgir erros é inútil porque no ficheiro X3D não tem *route* para nenhum campo.

No documento X3D, o nó para definir as forças no dispositivo háptico é escrito:

```
<!-- forca do vento na direccao do z -->  
<ForceField DEF="ForcaTraccao" force="0 0 0"/>  
  
<!-- forca da gravidade na direccao y -->  
<ForceField DEF="ForcaGravidade" force="0 -21 0"/>
```

O aparelho háptico para esta aplicação apenas exerce força no eixo vertical e no eixo horizontal. É com recurso ao código Python que se altera os valores das forças como explicado nos exemplos anteriores.

### 4.3.2 A simulação

Um túnel de vento é o cenário representado na simulação desenvolvida para o estudo de fenómenos aerodinâmicos do voo de um avião.

O *interface* do simulador mostra um avião P-38 Lightning (um caça da segunda guerra mundial), um esquema a representar a grandeza das quatro forças da aerodinâmica (medidor de forças semelhante ao que se vê nas corridas de fórmula 1 pelas estações televisivas, que evidenciam as forças G sentidas pelo piloto) e dados sobre a velocidade, ângulo de ataque e estado do avião, isto é, informa se o avião está na descolagem, a subir

ligeiramente, etc. A resultante das forças é “sentido” pelo utilizador através do mecanismo háptico.



Fig. 40: Interface do Simulador de forças aerodinâmicas

É fingido todo o processo de arranque do avião, descolagem, voo e perda da capacidade de se manter em voo. O utilizador controla o aumento e diminuição da velocidade do avião e essa variação, obviamente, está directamente relacionada com o aumento e diminuição da velocidade do ar. Do mesmo modo o utilizador pode variar o ângulo de ataque desde -15 graus até 15 graus, fora deste intervalo o avião entrava em *stall*. O estudante pode assim, através da mudança de velocidade e ângulo de ataque experienciar os efeitos do ar a atravessar as asas do avião pelas forças aplicadas ao mesmo.

Espera-se que os dados fornecidos aos alunos sejam suficientes para responderem a determinadas perguntas no teste do protótipo, como por exemplo, como é que um avião consegue subir ligeiramente mesmo com ângulo de ataque a zero graus?



Fig. 41: Avião na decolagem

Na Fig. 41 mostra a iminência do avião levantar voo. O esquema de forças exibe a força do impulso em aceleração e a força da sustentação prestes a igualar a força do peso. As quatro flechas no centro representam o vento, que variam a sua velocidade consoante a velocidade do avião. Se o avião continuar a acelerar, a força de sustentação supera o peso e o utilizador vai sentir o motor háptico a puxar para cima, o que indica subida como exemplifica a Fig. 42.



Fig. 42: Avião a subir sem ângulo de ataque

Neste caso o estado do avião indica ligeira subida, isto porque mesmo sem ângulo de ataque o avião consegue subir graças ao formato das asas que por si só gera uma ligeira sustentação. É na Fig. 43 que mostra o avião com ângulo de ataque positivo e num estado de subida.



Fig. 43: Avião a subir com ângulo de ataque positivo

O esquema de forças também roda as direções das suas forças tantos graus como o ângulo de ataque, excepto o peso que tem sempre a sua direcção vertical com sentido para baixo. A Fig. 44 demonstra o avião com ângulo de ataque negativo e em descida acentuada uma vez que a sustentação torna-se inferior ao peso.

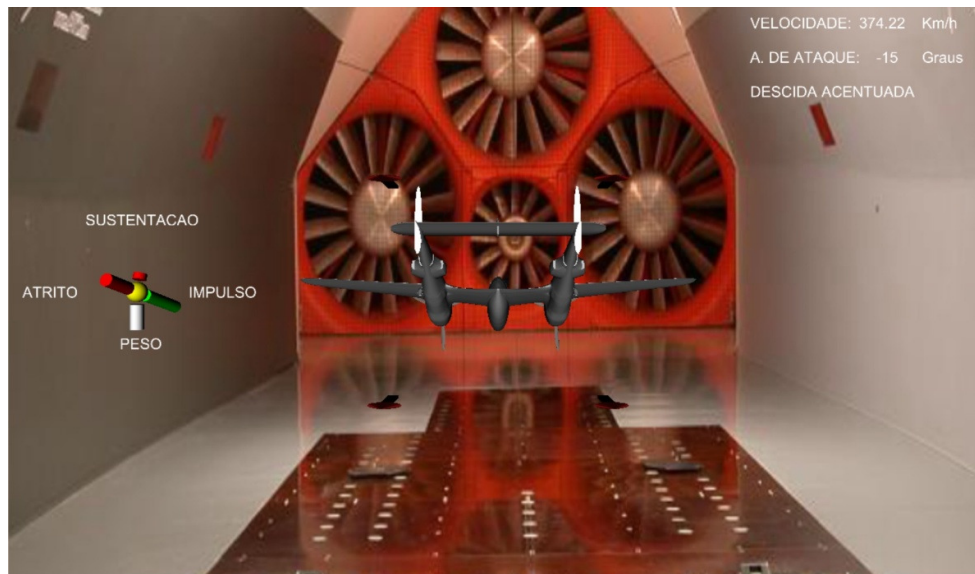


Fig. 44: Avião a descer com ângulo de ataque negativo

Na circunstância de abrandamento da velocidade, o impulso diminui e este tornando-se inferior ao atrito sente-se no aparelho háptico uma força para trás. Consequentemente a força de sustentação baixa, ficando inferior ao peso, logo o avião desce sentindo-se uma força para baixo. Esta situação é verificada na Fig. 45.



Fig. 45: Avião abrando a velocidade

Se o avião abrandar até a uma determinada velocidade ou inferior o avião entra em perda, ou seja, perde a capacidade de se manter em voo, assim como se verifica a descida do ângulo de ataque.

Deve-se ter em conta que as forças que o aluno presencia são as forças resultantes do eixo do x (eixo horizontal) e do eixo do y (eixo vertical) geradas no avião e que o movimento deste pelo utilizador com o aparelho háptico não significa um movimento real da aeronave. Dando um exemplo, o avião estando em movimento mas com velocidade ainda insuficiente para levantar voo, o utilizador verifica uma força para baixo (da gravidade) mas se impuser a sua energia para cima no comando háptico, o avião evidentemente sobe na simulação (que não indica subida de altitude), quando supostamente ainda não teria velocidade suficiente para descolar. Embora a força aplicada para baixo seja satisfatória, não é possível atribuir uma força superior à do ser humano, e nem é de todo aconselhável pelo facto de essa acção poder comprometer a integridade da máquina háptica.



## 4.4 Análise de Resultados

### 4.4.1 Teste de conhecimentos

O teste do protótipo consistiu na experimentação dos tutoriais do software N VeNT por parte dos estudantes para conhecerem as capacidades e potencialidades do dispositivo háptico, no ensaio do simulador das forças aerodinâmicas colocando questões de forma informal de maneira a colocar os alunos a explorarem o dispositivo e descobrirem uma possível resposta.

As questões propostas para a prova do simulador foram as seguintes:

- 1) Porque é que quando a velocidade é nula, a resultante das forças do avião aponta para baixo?

Resposta: Sendo a velocidade nula não existe sustentação, apenas existe a força da gravidade e a força normal.

- 2) Porque é que só a partir dos 150 km/h o avião descola (o que é que acontece no esquema de forças)?

Resposta: Só a partir desta velocidade é que existe sustentação suficiente para vencer a força da gravidade.

- 3) Com o ângulo de ataque a 0 graus, acelere o avião. Note que o avião sobe ligeiramente mesmo sem ângulo de ataque. Porquê?

Resposta: Por causa do formato da asa. A sua forma assimétrica entre a superfície superior da asa com a parte inferior da asa resulta numa ligeira elevação do avião.

- 4) Quando se abrandar o avião a resultante das forças aponta para trás e para baixo. Qual a razão disso acontecer?

Resposta: A diminuição da velocidade leva à diminuição da força de impulso, logo a força de atrito (vento) torna-se superior. Ao mesmo tempo a redução do impulso origina a redução da sustentação, tornando-se inferior ao peso e levando à descida do avião.

- 5) Porque é que o avião abrandando para velocidades inferiores a 150 km/h tem a força resultante a apontar para baixo e se vê o ângulo de ataque a diminuir?

Resposta: Porque o avião entra em perda. Não se consegue manter em voo nessas condições, logo a resultante das forças aponta para baixo e o avião decresce o ângulo de ataque.

Embora foi dados alguns conceitos da física aerodinâmica do voo antes da experimentação do simulador alguns alunos já possuíam alguns conhecimentos sobre essa matéria. As respostas dos alunos foram na sua maioria adequadas, dando-me a percepção que foi compreendido o funcionamento do simulador e das forças físicas inerentes ao voo de um avião.

#### **4.4.2 Análise da motivação dos alunos**

No fim do teste de conhecimentos foi entregue aos alunos que testaram o programa um questionário para preenchimento das suas opiniões relativas ao simulador e ao uso dos sistemas hápticos na educação.

Em relação ao questionário, o sistema de classificação resumia-se em atribuir um valor à pergunta sendo:

- 5 – Excelente
- 4 – Bom
- 3 – Normal
- 2 – Fraco
- 1 – Não vale a pena

Foram preenchidos 16 inquéritos, em que as respostas às questões foram as seguintes:

- a) A aplicação está intuitiva? Onze estudantes responderam nota máxima, quatro consideraram bom e apenas um respondeu normal.
- b) Pensam que esta aplicação oferece uma melhor compreensão da física do voo? Oito alunos disseram bom e os restantes oito responderam excelente.
- c) Sentem que o estilo mais prático dos sistemas hápticos aplicado ao ensino dá maior motivação para aprender? Seis dos alunos deram nota boa e dez alunos nota excelente.
- d) Consideram que uma aprendizagem mais prática utilizando sistemas hápticos deve ser aplicada a outras disciplinas? Na última questão, quatro estudantes responderam bom e doze responderam excelente.

O gráfico a seguir expõe os resultados percentuais do inquérito:

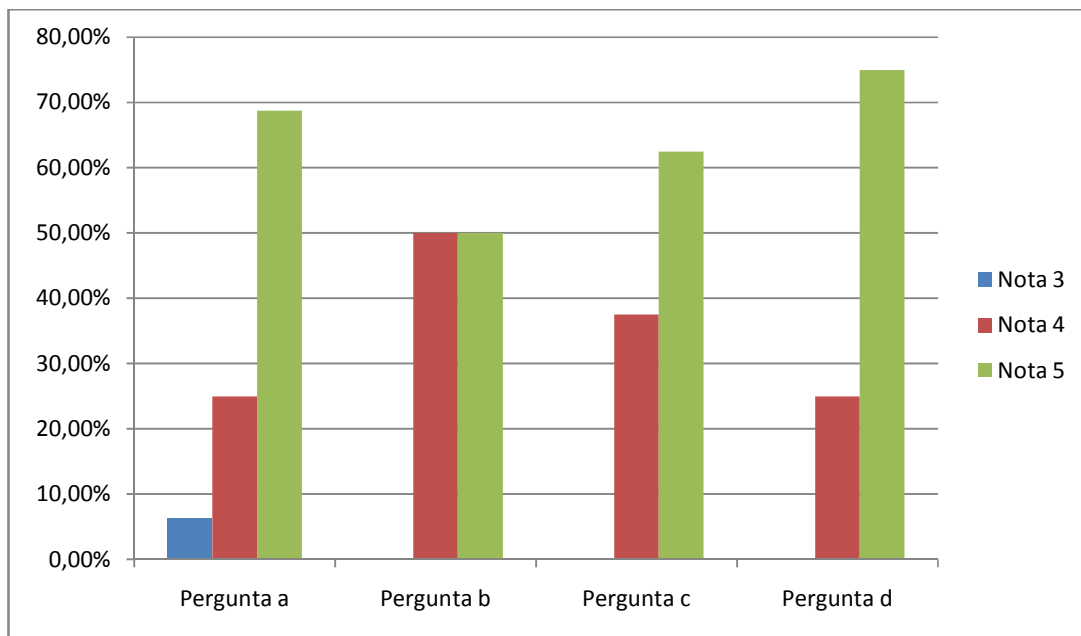
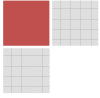


Fig. 46: Gráfico percentual do inquérito realizado pelos alunos

Numa última questão era pedido para dar sugestões de aperfeiçoamento da aplicação. Foi sugerido que o programa incluísse mais dados pormenorizados sobre o avião em estudo, que fosse melhorado a nível de aspecto gráfico e por fim a instalação mais segura do aparelho háptico à mesa, isto é, colocar o dispositivo de modo fixo na mesa, uma vez que em certas situações as forças que estão a ser geradas são fortes o suficiente para mover todo o dispositivo háptico.



## 5. CONCLUSÕES

*“Um bom mestre tem sempre esta preocupação:  
ensinar o aluno a desenvencilhar-se sozinho”*

André Gide

Especificamente em relação à primeira questão de investigação que perguntava se a maneira prática de aprendizagem com utilização de tecnologia transmitia interesse e motivação por parte do aluno pode ser respondida com os resultados da pergunta três do questionário, que mostra que 100% dos inquiridos responderam com as duas melhores notas e em que a maior percentagem foi dada na nota máxima.

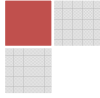
A segunda questão de investigação perguntava se caso houvesse maior interesse dos alunos, isso justificava a compra de equipamento e software ou o desenvolvimento de novas aplicações? Tendo em conta que a questão anterior revelou que há realmente maior motivação de aprender com o uso de sistemas hápticos, que a pergunta dois do questionário mostra que 100% dos alunos consideraram que o protótipo que experimentaram oferecia entre uma boa e excelente compreensão da física e que a pergunta quatro do questionário indica que todos os alunos acharam entre boa e excelente ideia o uso de sistemas hápticos aplicados a outras disciplinas, conclui-se que existem razões suficientes para se dizer que é justificada um investimento nesta área.

Por fim a terceira questão de investigação ponderava qual a reacção do professor face à inserção de novas tecnologias aplicadas à educação. O estudo efectuado sobre novas formas de ensino com recurso a novas tecnologias revelou que o docente continua a ser necessário na explicação teórica antes da prática e no esclarecimento de qualquer dúvida, para além de garantir que os softwares empregados estão actualizados e com dados correctos. O teste do protótipo realizado com as duas turmas desvendou essa necessidade de ter alguém que guiasse os estudantes nos exercícios práticos e que garantisse que o aluno realmente entendeu a actividade.

De forma unânime, as respostas às questões de investigação tiveram saldo positivo, demonstrando a vantagem que os sistemas hápticos podem proporcionar quando utilizados no ensino.

No futuro o simulador das forças aerodinâmicas pode sofrer vários melhoramentos a nível de *interface* gráfico e funcionamento, uma vez que há muito espaço para o desenvolvimento mais aprofundado em relação à física das forças aerodinâmicas e detalhes do respectivo avião.

O crescimento da utilização de dispositivos hápticos como periférico de entrada de computador em conjunto com a redução dos seus preços, possibilita desta forma, uma maior facilidade de obtenção deste tipo de aparelhos e conseqüentemente ao aumento de produção de um maior número de aplicações que são aplicados ao ensino ou outro fim. Pode-se dizer que a tecnologia sensorial dos sistemas hápticos se difundirá como um importante meio interactivo entre homem e máquina e isso levará à uma grande evolução deste tipo de sistemas.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Costa, “Ideologia, retórica e democracia,” Centro para o ensino da Filosofia, 24-9-2006. [Online]. Disponível: [http://cef-spf.org/imp\\_29.html](http://cef-spf.org/imp_29.html). [Acedido:30-9-2009].
- A. Netto, L. Machado e M. Oliveira, “Realidade Virtual - Definições, Dispositivos e Aplicações,” de.ufpb.br, 11-3-2004. [Online]. Disponível: [http://www.de.ufpb.br/~labteve/publi/2002\\_reic.pdf](http://www.de.ufpb.br/~labteve/publi/2002_reic.pdf). [Acedido: 11-10-2009].
- Armstrong Atlantic State University, “Project HaptEK16,” HaptEK16, Armstrong Atlantic State University. [Online]. Disponível: <http://www.cs.armstrong.edu/felix/projects/HaptEK16/index.html>. [Acedido: 1-9-2009a].
- Armstrong Atlantic State University, “BACH,” BACH: Broadband Analysis of Collaborative Haptics, Armstrong Atlantic State University. [Online]. Disponível: <http://cs.armstrong.edu/felix/projects/BACH/index.php>. [Acedido: 3-9-2009b].
- B. MacIntyre e S. Feiner, “Future multimedia user interfaces”, *Multimedia Systems*, vol. 4, n. 5, p. 250-268, Outubro de 1996. Disponível: SpringerLink, <http://www.springerlink.com/content/9ejh1xw5cjljkql7/fulltext.pdf>. [Acedido: 24-5-2009].
- Butterfly Haptics, “The story of magnetic levitation haptics,” butterflyhaptics.com. [Online]. Disponível: <http://butterflyhaptics.com/maglev-haptics>. [Acedido: 23-1-2009].
- C. Nichols, “The vBow: Haptic Feedback and Sound Synthesis of a Virtual Violin Bow Controller,” *Journal of the Society for Electro-Acoustic Music*, vol. 16, n. 1, 2001. Disponível: <http://ccrma-www.stanford.edu/~cnichols/pdf/vBowSEAMUS2001.pdf>. [Acedido: 6-12-2008].
- Cs. Antonya, T. Butnaru e D. Talaba, "Haptic interaction with virtual mechanical systems," 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), 18-21 Junho 2007. [Online]. Disponível: [http://130.15.85.212/proceedings/proceedings\\_WorldCongress/WorldCongress07/articles/sessions/papers/A797.pdf](http://130.15.85.212/proceedings/proceedings_WorldCongress/WorldCongress07/articles/sessions/papers/A797.pdf). [Acedido: 15-1-2009].

- C. Marinheiro, "O significado da palavra háptico," CIBERDÚVIDAS da língua portuguesa, 15-5-2007. [Online]. Disponível: <http://www.ciberduvidas.com/pergunta.php?id=20520>. [Acedido: 2-6-2009].
- C. Nam e I. Shafieloo, "Haptic Virtual Environments as a Science Learning Supporting Tool: A Preliminary Study," *Education and Technology*, 2006. [Abstract]. Disponível: Acta Press, <http://www.actapress.com/PaperInfo.aspx?PaperID=27544&reason=500>. [Acedido: 26-5-2009].
- C. Pereira et al., "Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) – Uma proposta inovadora para os cursos de engenharia," *nogueira.eti.br*, XIV SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, 2007. [Online]. Disponível: [http://www.nogueira.eti.br/profmarcio/obras/publicado\\_1474.pdf](http://www.nogueira.eti.br/profmarcio/obras/publicado_1474.pdf). [Acedido:30-9-2009].
- Curictus AB, "Welcome to Curictus," Curictus AB. [Online]. Disponível: <http://www.curictus.com>. [Acedido: 5-9-2009].
- D. Omaia, L. Machado, R. Moraes, "Interação Háptica em Plataformas Livres," SVR2004- SBC Symposium on Virtual Reality - Workshop de Iniciação Científica. Anais, vol. 1, 2004. [Online]. Disponível: [http://www3.di.ufpb.br/liliane/publicacoes/2004\\_wicSVR.pdf](http://www3.di.ufpb.br/liliane/publicacoes/2004_wicSVR.pdf). [Acedido: 19-5-2009].
- F. Reis, "Ensinando num cruzeiro," *escolanautica.com.br*. [Online]. Disponível: <http://www.escolanautica.com.br/coluna/vento02p8.jpg>. [Acedido: 4-5-2009].
- Forsslund Systems AB, "Forsslund Systems: freedom to operate," *forsslundsystems.se*. [Online]. Disponível: [http://idealist.nu/~jonas/product\\_sheets\\_20090830.pdf](http://idealist.nu/~jonas/product_sheets_20090830.pdf). [Acedido: 6-9-2009].
- G. Jones, *Cyberschools: An Education Renaissance*. Cyber Publishing Group, 1997.
- H. Iwata, "History of haptic interface," em *Human haptic Perception: Basics and Applications*, M. Grunwald Ed. Birkhauser, 2008, p. 355-360. Disponível: [http://www.homo-hapticus.de/fileadmin/chapters\\_pdf/chap29.pdf](http://www.homo-hapticus.de/fileadmin/chapters_pdf/chap29.pdf). [Acedido: 15-1-2009].
- H. Malik, "3rd Space Vest Lets You Know When You've Been Shot," *gizmodo.com*, 21-10-2007. [Online]. Disponível: <http://gizmodo.com/gadgets/peripherals/3rd-space-vest-lets-you-know-when-youve-been-shot-313257.php>. [Acedido: 4-2-2009].



- H3D API.org, “H3D API Manual,” H3D API.org. [Online]. Disponível: [http://www.h3dapi.org/uploads/api/H3D API\\_20/docs/H3D%20API%20Manual.pdf](http://www.h3dapi.org/uploads/api/H3D API_20/docs/H3D%20API%20Manual.pdf). [Acedido: 25-8-2009].
- Ifeelpixel, ifeelpixel.com. [Online]. Disponível: <http://www.ifeelpixel.com/screenshots>. [Acedido: 4-6-2009].
- Inition, “Comparison Table,” inition.co.uk. [Online]. Disponível: <http://www.inition.co.uk/inition/compare.php?SubCatID=36&SortID=-2&Asc=0>. [Acedido: 18-8-2009a].
- Inition, “Haptics from Inition,” ignition.co.uk. [Online]. Disponível: [http://www.inition.co.uk/inition/products.php?CatID\\_=13](http://www.inition.co.uk/inition/products.php?CatID_=13). [Acedido: 18-8-2009b].
- Inition, “Inition Create Virtual Injection Simulation for Botox,” Inition, 13-11-06. [Online]. Disponível: [http://www.inition.co.uk/inition/news\\_botox.htm](http://www.inition.co.uk/inition/news_botox.htm). [Acedido: 7-9-2009].
- J. Demeterco e P. Alcântara, “O mundo virtual como ferramenta interactiva no ensino-aprendizagem colaborativo”, *Comunicar*, n. 23, p. 77-81, 2004. Disponível: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/158/15802313.pdf>. [Acedido: 5-7-2009].
- J. D. Anderson, *Introduction to flight*, 5ª Edição, McGraw-Hill Professional, 2004, p. 352-357.
- J. D. Anderson e S. Eberhardt, *A Physical Description of Flight; Revisited*, 2ª Edição, McGraw-Hill Professional, 2009. Disponível: <http://www.allstar.fiu.edu/aerajava/Flightrevisited.pdf>. [Acedido: 26-6-2009].
- J. Martins e B. Campestrini, “Ambiente virtual de aprendizagem favorecendo o processo ensino-aprendizagem em disciplinas na modalidade de educação à distância no ensino superior,” abed.org.br, universidade do Vale do Itaja, 2004. [Online]. Disponível: <http://www.abed.org.br/congresso2004/por/htm/072-TC-C2.htm>. [Acedido: 4-7-2009].
- J. Silva, “A relação Professor/Aluno no processo de ensino e aprendizagem,” *Revista espaço académico*, n. 52, Setembro, 2005. [Online]. Disponível: [http://www.espacoacademico.com.br/052/52pc\\_silva.htm](http://www.espacoacademico.com.br/052/52pc_silva.htm). [Acedido: 6-7-2009].

- J. Strickland, "How Virtual Reality Gear Works," electronics.howstuffworks.com. [Online]. Disponível: <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/other-gadgets/VR-gear.htm/printable>. [Acedido: 15-1-2009].
- L. Grilo et al., "Possibilidades de aplicação e limitações da realidade virtual na arquitetura e na construção civil," Anais do II Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade do Trabalho no Ambiente Construído, 2001. [Online]. Disponível: [http://toledo.pcc.usp.br/pdf/realidade\\_virtual.pdf](http://toledo.pcc.usp.br/pdf/realidade_virtual.pdf). [Acedido: 25-5-2009].
- L. Netto, "Aviões...por que voam?," feiradeciencias.com.br. [Online]. Disponível: [http://www.feiradeciencias.com.br/sala07/07\\_26.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala07/07_26.asp). [Acedido: 9-6-2009].
- M. Brain e B. Adkins, "Sensores de um avião," ciencia.hsw.uol.com.br. [Online]. Disponível: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/avioes21.htm>. [Acedido: 10-6-2009].
- M. Brain e B. Adkins, "Como funcionam os aviões", HowStuffWorks- Como funcionam os aviões. [Online]. Disponível: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/avioes1.htm>. [Acedido: 25-7-2009].
- M. Dougiamas, "Learning is better when it is collaborative, and that drives Moodle development," Entrevista por Leo Ruffin, Universitat Oberta de Catalunya, Novembro de 2008. [Online]. Disponível: [http://www.uoc.edu/portal/english/la\\_universitat/sala\\_de\\_prensa/entrevistes/2008/martin\\_dougiamas.html](http://www.uoc.edu/portal/english/la_universitat/sala_de_prensa/entrevistes/2008/martin_dougiamas.html). [Acedido: 25-5-2009].
- M. Jones et al., "A Comparison of Learning with Haptic and Visual Modalities," *Haptics-e: The Electronic Journal of Haptics Research*, vol. 3, n. 6, p. 1, Maio de 2005. [Online]. Disponível: [http://www.haptics-e.org/Vol\\_03/he-v3n6.pdf](http://www.haptics-e.org/Vol_03/he-v3n6.pdf). [Acedido: 30-8-2009].
- M. Mendes e F. Fialho, "Ferramentas virtuais na educação tecnológica a distância", abed.org.br, 2003. [Online]. Disponível: <http://www.abed.org.br/congresso2003/docs/anais/TC29.pdf>. [Acedido: 6-7-2009].
- Microdynamic Systems Laboratory, "Magnetic Levitation Haptic Interfaces," msl.ri.cmu.edu, universidade Carnegie Mellon. [Online]. Disponível: <http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/haptic>. [Acedido: 24-1-2009a].

Microdynamic Systems Laboratory, “Magnetic Levitation Haptic Device,”  
clarinet.msl.ri.cmu.edu. [Online]. Disponível:  
[http://clarinet.msl.ri.cmu.edu/projects/haptic/haptic\\_device.php](http://clarinet.msl.ri.cmu.edu/projects/haptic/haptic_device.php). [Acedido: 24-1-2009b].

N. Studart e S. Dahmen, “A física do voo na sala de aula,” *a Física na Escola*, vol. 7, n. 2, p. 36-42, Outubro de 2006. Disponível:  
<http://pcsbfl1.sbfisica.org.br/fne/Vol7/Num2/v13a07.pdf>. [Acedido: 26-7-2009].

Nasa Quest, “Atmospheric Flight”, Nasa Quest. [Online]. Disponível:  
<http://quest.nasa.gov/aero/planetary/atmospheric/forces.html>. [Acedido: 24-7-2009].

Novint Technologies, Inc., “Get Wowed! With the Novint Falcon”, Novint, Novint Technologies, Inc. [Online]. Disponível:  
[http://home.novint.com/products/novint\\_falcon.php](http://home.novint.com/products/novint_falcon.php). [Acedido: 3-6-2009].

Passeiweb.com.[Online]. Disponível:  
[http://www.passeiweb.com/saiba\\_mais/voce\\_sabia/imagens/aviao\\_desl\\_part\\_asa.jpg](http://www.passeiweb.com/saiba_mais/voce_sabia/imagens/aviao_desl_part_asa.jpg).  
[Acedido: 27-6-2009].

R. Hollis, “Haptics,” em *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, W. Bainbridge Ed. Berkshire Publishing Group, 2004, p. 311-316. Disponível:  
[http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/haptics\\_2004.pdf](http://www.msl.ri.cmu.edu/publications/pdfs/haptics_2004.pdf). [Acedido: 4-12-2008].

rmbygnus.com, “Aparelho de levitação magnética dá sensação de toque a utilizadores de computador,” rmbygnus.com, 11-8-2009. [Online]. Disponível:  
[http://www.rmbygnus.com/index2.php?option=com\\_content&do\\_pdf=1&id=283](http://www.rmbygnus.com/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=283).  
[Acedido: 20-1-2009].

S. Kuntz, “The story behind the Novint Falcon,” *Virtual Reality*, 13-10-2008a. [Online]. Disponível: <http://cb.nowan.net/blog/tag/haptics>. [Acedido: 20-1-2009].

S. Kuntz, “Virtusphere review,” *Virtual Reality*, 22-5-2008b. [Online]. Disponível:  
<http://cb.nowan.net/blog/2008/05/22/virtusphere-review>. [Acedido: 25-1-2009].

S. Kuntz, “Omni-Directional Treadmill,” *Virtual Reality*, 28-6-2007. [Online]. Disponível: <http://cb.nowan.net/blog/2007/06/28/omni-directional-treadmill>. [Acedido: 29-1-2009].

Santos Dumont Aircraft Management, “Who was Santos Dumont”, Santos Dumont Aircraft Management. [Online]. Disponível:

<http://www.santosdumont.com/index.php/2008/07/09/who-was-santos-dumont>.

[Acedido: 20-7-2009].

T. Benson, “Incorrect Theory #1”, Glenn Research Center, 28-7-2008a. [Online].

Disponível: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong1.html>. [Acedido: 16-6-2009].

T. Benson, “Inclination effects on lift”, Glenn Research Center, 28-7-2008b. [Online].

Disponível: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/incline.html>. [Acedido: 20-6-2009].

T. Benson, “Flats and Slats”, Glenn Research Center, 17-7-2008c. [Online]. Disponível:

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/flap.html>. [Acedido: 18-7-2009].

T. Benson, “Four Forces on an Airplane”, Glenn Research Center, 11-7-2008d. [Online].

Disponível: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/forces.html>. [Acedido: 24-7-2009].

T. Farias et al., “Um Estudo de Caso sobre a Construção e a Integração de Dispositivos Hápticos com Aplicações Interactivas,” Sociedade Brasileira de Computação, 2006.

[Online]. Disponível: [www.sbc.org.br/bibliotecadigital/download.php?paper=548](http://www.sbc.org.br/bibliotecadigital/download.php?paper=548).

[Acedido: 11-10-2009].

Tngames, “Frequently asked questions,” tngames.com, Tngames. [Online]. Disponível:

<http://tngames.com/faq/1/Product-Questions>. [Acedido: 4-2-2009].

“Técnica de voo”. [Online]. Disponível: <http://voo.no.sapo.pt/aerodinamica.htm>.

[Acedido: 14-6-2009].

uorever.wordpress.com, “Os melhores aviões de papel do mundo,” 2-4-2009. [Online].

Disponível: <http://uorever.wordpress.com/2009/04/02/os-melhores-avioes-de-papel-do-mundo>. [Acedido: 30-6-2009].

VirtuSphere, “VirtuSphere”, virtosphere.com. [Online]. Disponível:

<http://www.virtosphere.com>. [Acedido: 25-1-2009].

voodeteste.blogspot.com, “Voo de teste,” 2-2-2008. [Online]. Disponível:  
<http://voodeteste.blogspot.com/2008/02/anlise-de-decolagem-e-cl-mximo-com.html>.  
[Acedido:30-6-2009].

Wikipédia, “Haptic technology”, Wikipédia, 25-11-2008a. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Haptic\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Haptic_technology). [Acedido: 4-12-2008].

Wikipédia, “Wired Glove”, Wikipédia, 6-12-2008b. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/P5\\_Glove](http://en.wikipedia.org/wiki/P5_Glove). [Acedido: 14-12-2008].

Wikipédia, “Omnidirectional treadmill”, Wikipédia, 25-12-2008c. [Online]. Disponível:  
[en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional\\_treadmill](http://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional_treadmill). [Acedido: 28-1-2009].

Wikipédia, “3rd Space Vest,” Wikipédia, 8-3-2009a. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/ForceWear\\_Vest](http://en.wikipedia.org/wiki/ForceWear_Vest). [Acedido: 11-2-2009].

Wikipédia, “Vento”, Wikipédia, 15-2-2009b. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Vento>. [Acedido: 4-5-2009].

Wikipédia, “Háptico”, Wikipédia, 2-5-2009c. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Háptico>. [Acedido: 24-5-2009].

Wikipédia, “Realidade Virtual”, Wikipédia, 20-5-2009d. [Online]. Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Realidade\\_Virtual](http://pt.wikipedia.org/wiki/Realidade_Virtual). [Acedido: 25-5-2009].

Wikipédia, “Lift (force)”, Wikipédia, 7-6-2009e. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Lift\\_\(force\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lift_(force)). [Acedido: 9-6-2009].

Wikipédia, “Mecânica dos fluidos”, Wikipédia, 6-5-2009f. [Online]. Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica\\_dos\\_fluidos](http://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica_dos_fluidos). [Acedido: 10-6-2009].

Wikipédia, “Primeira lei de Newton”, Wikipédia, 16-6-2009g. [Online]. Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Primeira\\_lei\\_de\\_Newton](http://pt.wikipedia.org/wiki/Primeira_lei_de_Newton). [Acedido: 23-6-2009].

Wikipédia, “Efeito Coandă,” Wikipédia, 11-10-2008d. [Online]. Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Efecto\\_coanda.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Efecto_coanda.jpg). [Acedido: 27-6-2009].

Wikipédia, “Terceira lei de Newton”, Wikipédia, 2-9-2009h. [Online]. Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Terceira\\_lei\\_de\\_Newton](http://pt.wikipedia.org/wiki/Terceira_lei_de_Newton). [Acedido: 28-6-2009].

Wikipédia, “Ângulo de ataque,” Wikipédia, 10-4-2009i. [Online].Disponível:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Angle\\_of\\_attack.svg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Angle_of_attack.svg). [Acedido: 29-6-2009].

Wikipédia, “Moodle”, Wikipédia, 28-6-2009j. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Moodle>. [Acedido: 16-7-2009].

Wikipédia, “Avião”, Wikipédia, 25-7-2005. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Avião>. [Acedido: 18-7-2009].

Wikipédia, “Slat”, Wikipédia, 25-3-2009k. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Slat>. [Acedido: 18-7-2009].

Wikipédia, “Alberto Santos-Dumont”, Wikipédia, 17-7-2009l. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Alberto\\_Santos-Dumont](http://en.wikipedia.org/wiki/Alberto_Santos-Dumont). [Acedido: 20-7-2009].

Wikipédia, “Wright Brothers”, Wikipédia, 28-7-2009m. [Online]. Disponível:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wright\\_brothers](http://en.wikipedia.org/wiki/Wright_brothers). [Acedido: 20-7-2009].

Wikipédia, “Aerodinâmica”, Wikipédia, 22-6-2009n. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Aerodinâmica>. [Acedido: 24-7-2009].

Wikipédia, “X3D”, Wikipédia, 19-6-2009o. [Online]. Disponível:  
<http://pt.wikipedia.org/wiki/X3D>. [Acedido: 25-8-2009].

Web3D Consortium, “What is X3D,” Web3D Consortium. [Online]. Disponível:  
<http://www.web3d.org/about/overview>. [Acedido: 25-8-2009].

Wikipédia, “What you can do with H3DAPI”, Wikipédia, 24-8-2009p. [Online].  
Disponível:  
[http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/What\\_you\\_can\\_do\\_with\\_H3DAPI](http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/What_you_can_do_with_H3DAPI).  
[Acedido: 27-8-2009].

Wired.com, “Review: Novint Falcon Gaming Controller Takes Aim on Your Mouse,”  
wired.com, 12-9-2008. [Online]. Disponível:  
<http://www.wired.com/gadgetlab/2008/09/review-novint-f>. [Acedido: 4-6-2009].