

## 2

# Sistemas de Interface Háptica

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos básicos relacionados com Sistemas Hápticos e realidade virtual, bem como demonstradas algumas possíveis áreas de aplicação desta tecnologia. Além disso, serão discutidos alguns princípios de operação destes dispositivos hápticos, conjuntamente descrevendo também as vantagens, desvantagens e importância de sua aplicação.

### 2.1

#### Definições Prévias

A palavra háptica refere-se à capacidade de sentir um ambiente mecânico natural ou sintético através do tato, proveniente do grego "*háptō*" que significa próprio para tocar ou sensível ao tato. No ser humano, este sentido possui dois componentes independentes: o cutâneo e o cinestésico. O primeiro está ligado aos sensores localizados na superfície da pele, que são responsáveis por sensações tais como pressão, temperatura, vibração e dor. O segundo está ligado aos sensores localizados nos músculos, tendões e juntas que são responsáveis por sensações tais como movimento e força [10]. Ao tocar e mover um objeto qualquer, o indivíduo terá diversas sensações que serão convertidas pelo cérebro em informação cutânea e cinestésica [11]. Isto permite ao indivíduo inferir propriedades deste objeto, tais como textura (de acordo com a análise da informação cutânea) e características gerais, tais como peso e forma (de acordo com a análise da informação cinestésica). Um exemplo comum pode ser visto na figura 2.1

#### 2.1.1

##### Sensações Táteis e Cinestésicas

As sensações táteis geralmente incluem pressão, textura, temperatura, maciez, umidade, além de sensações induzidas pela fricção como detecção de imperfeições nas superfícies dos objetos. Elas também incluem características dos objetos como forma e extremidades, além de sensações de vibração quando algum objeto oscila próximo à pele da pessoa. Ato simples, como segurar uma caneta, acarretam em várias dessas sensações. A qualidade e a textura



Figura 2.1: Exemplo de seis procedimentos para explorar um objeto .

do objeto são percebidas ao passar os dedos sobre a caneta, e a sua borda é encontrada através da exploração das extremidades (ou seja, identificação da forma). Segurar um telefone celular que vibra ao receber uma chamada causa sensações vibro-tácteis. A capacidade do ser humano de distinguir todas estas sensações provavelmente se deve a códigos neurais e a pequenos sensores (denominados mecano-receptores) presentes na pele conforme demonstraram Lamotte e Srinivasan[12].

Vários tipos de receptores foram encontrados para mediar as sensações descritas acima, na pele e nos tecidos subcutâneos; conseqüentemente, é costume designá-la como o órgão responsável pelo tato. De fato, existem centenas de receptores em cada centímetro quadrado dos mais de dois metros quadrados de área da pele de um adulto, que juntos formam o componente cutâneo do tato. As características biofísicas da pele, entretanto, mudam radicalmente de acordo com a parte do corpo que elas cobrem [13].

Devido à grande quantidade de sensores, o tato ocupa uma parte considerável do sistema nervoso central e periférico, como apontou Darian e Smith[14]. Já o componente cinestésico do tato refere-se à consciência do estado corporal, incluindo posição, velocidade e força, fornecidos pelos músculos através de uma grande variedade de receptores localizados na pele, juntas, ossos e tendões. Juntos, ambos os componentes do sentido do tato são essenciais para a manipulação e a locomoção.

### 2.1.2

#### Percepção Humana e as Interfaces Hápticas

Quando se assiste a um filme em alta resolução, não se percebem uma série de imagens estáticas que são apresentadas em sequência, muito menos detecta-se uma série de pixels coloridos juntos na tela. Em vez disso, é percebida uma cena visual que é bastante parecida com as experiências visuais experimentadas no cotidiano. Isto é possível porque a sensibilidade temporal da visão humana não é suficiente para detectar a mudança rápida de quadros no cinema, nem tem resolução suficiente para enxergar pixels individuais, caso esteja a uma distância normal da tela. Estes são exemplos de como a arquitetura e os limites do sistema sensorial humano podem ser explorados para construir sistemas engenhosos que possam oferecer experiências realistas e complexas. Exemplos destes sistemas incluem monitores de computador, televisões, gravadores de áudio, simuladores de voo e, obviamente, dispositivos hápticos.

O sentido do tato, entretanto, difere bastante da visão no sentido de que ele necessita de taxas de atualização muito maiores do que aquelas necessárias para assistir a um vídeo. Assim, em geral é muito difícil produzir uma interação háptica realista. Felizmente, mesmo quando um dispositivo háptico imperfeito é usado, o usuário se adapta rapidamente à sua atuação, ignora as suas imperfeições, e naturalmente associa os estímulos mecânicos criados pelo dispositivo às suas experiências do dia-a-dia, como perceber a textura de uma superfície e a forma dos objetos.

Além disso, quando as interfaces hápticas são combinadas com representações gráficas, o usuário prontamente associa o estímulo tátil ao objeto mostrado na tela. Isto acontece mesmo quando o que é visto e o dispositivo que gera feedback háptico estão localizados em locais bastante diferentes do espaço. Por exemplo, um jogador de jogos de corrida, que opta por diversas opções de câmera dentro do jogo, não deixa de associar o volante que vibra em suas mãos com o volante do veículo virtual que está sendo conduzido, muito embora ele possivelmente não o esteja vendo. Este cenário é ilustrado na figura 2.2.

Entretanto, se as imperfeições do dispositivo háptico são muito intrusivas, a sensação de realismo háptico é perdida. Um efeito parecido é o que ocorre quando um projetor de cinema diminui a taxa de atualização de quadros e passa a mostrar apenas um por segundo: o filme se transforma em uma série de fotografias. Assim, a qualidade da experiência háptica ilusória é uma função da combinação do sistema perceptivo do usuário e das qualidades técnicas próprias de cada interface, como resolução e adequação dos sinais sendo gerados.



Figura 2.2: Um jogo simulador de corrido de carros.

## 2.2 Realidade Virtual

Ackerman[15] afirma, em seu livro *A Natural History of the Senses*, que 70% dos receptores do sentido humano encontram-se nos olhos, tornando-os os grandes “monopolistas dos sentidos”. A maioria das informações recebidas pelo ser humano tem a forma de imagens visuais, as quais são interpretadas por um “computador” extremamente eficiente. Os computadores digitais, por sua vez, interpretam informações fornecidas por algum dispositivo de entrada de dados, como um teclado, por exemplo.

Realidade Virtual (RV) é o uso da tecnologia para criar a ilusão no usuário de que ele está em outra realidade, um novo meio de “estar” e “tocar” em informações ou seja, é um lugar onde os homens e os computadores fazem contato de forma natural. Refere-se a uma experiência imersiva e interativa baseada em imagens gráficas em 3D (três dimensões) geradas em tempo real por computador.

Uma definição um pouco mais refinada de realidade virtual é a seguinte: “realidade virtual é uma forma das pessoas visualizarem, manipularem e interagirem com computadores e dados extremamente complexos” [16]. Agrupando algumas outras definições de realidade virtual [17][18][19], pode-se dizer que a realidade virtual é uma técnica avançada de interface, onde o usuário pode re-

alizer imersão, navegação e interação em um ambiente sintético tridimensional gerado por computador, utilizando canais multi-sensoriais, que podem ser a forma mais avançada de interface do usuário de computador até agora disponível.

A interface com realidade virtual envolve um controle tridimensional altamente interativo de processos computacionais. O usuário entra no espaço virtual das aplicações e visualiza, manipula e explora os dados da aplicação em tempo real, usando seus sentidos, particularmente os movimentos naturais tridimensionais do corpo. A grande vantagem desse tipo de interface é que o conhecimento intuitivo do usuário a respeito do mundo físico pode ser transferido para manipular o mundo virtual. Para suportar esse tipo de interação, o usuário utiliza dispositivos não convencionais como capacete de visualização e controle, luva, e outros. Estes dispositivos dão ao usuário a impressão de que a aplicação está funcionando no ambiente tridimensional real, permitindo a exploração do ambiente e a manipulação natural dos objetos com o uso das mãos, por exemplo para apontar, pegar, e realizar outras ações. A figura 2.3 apresenta algumas aplicações utilizando a realidade virtual.

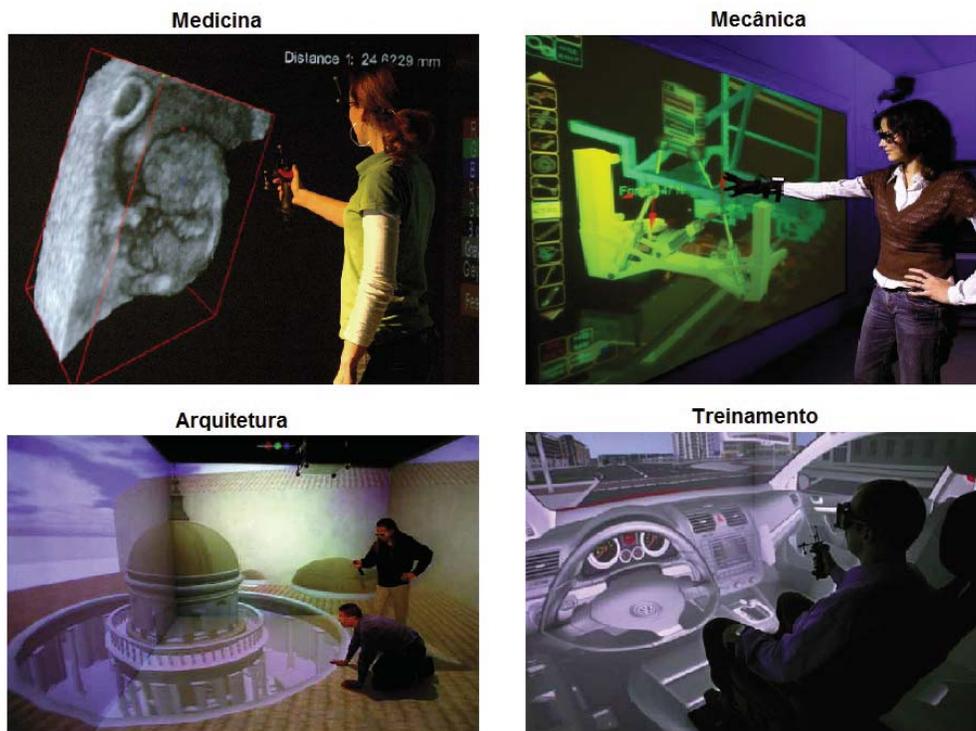


Figura 2.3: Exemplo de algumas aplicações da Realidade Virtual.

### 2.2.1

#### Dispositivos de Entrada e Saída

Entendemos a Realidade Virtual (RV) como uma ciência que engloba conhecimento de diversas áreas, como computação, eletrônica, robótica e cognição, dentre outras, visando oferecer sistemas computacionais que integram características de imersão e interatividade para simular ambientes reais. A utilização de dispositivos de interação e imersão utilizados em sistemas de RV está diretamente associada aos aspectos cognitivos do ser humano e pode explorar estímulos visuais, auditivos, táteis, motores e olfativos [20]. Esses dispositivos dividem-se em dois grupos: entrada e saída.

Os dispositivos de entrada são responsáveis pelo envio de informações de interação ou movimentação do usuário no sistema. Essas informações são utilizadas para o processamento de uma nova cena gráfica ou outra informação resultante da ação do usuário. Nesse grupo encontram-se: os sensores de trajetória, responsáveis por detectar a posição do objeto ou parte do corpo ao qual estão acoplados; os dispositivos de interação, como as luvas de dados (utilizadas no reconhecimento dos movimentos da mão), as bolas isométricas para movimentação com 6DOF (seis graus de liberdade); e os sensores biológicos, que usam reconhecimento de voz ou sinais elétricos musculares [21].

Os dispositivos de saída visam o estímulo dos sentidos do usuário, enviando para ele as respostas do sistema. Nesse grupo encontram-se os dispositivos visuais, auditivos, físicos e de locomoção. sendo que uma grande porção do cérebro é dedicada ao processamento das informações visuais [22]. Os dispositivos visuais e o tipo de imagem gerada pelo sistema de RV têm forte influência no nível de imersão do usuários. Os dispositivos visuais utilizados em RV podem ser monoscópicos ou estereoscópicos, permitindo ou não visualização das imagens apresentadas em três dimensões. No caso dos dispositivos estereoscópicos, cada exibição de imagem de uma cena é processada duas vezes. A distância existente entre os olhos humanos é utilizada para esse processamento, que resulta em duas imagens ligeiramente diferentes. Quando visualizadas individualmente por cada olho, essas imagens são reunidas no cérebro e resultam em uma visualização tridimensional. Exemplos de dispositivos visuais são os vídeo-capacetes, os *head-coupled displays* (visores montados sobre um braço mecânico com sensores de movimentação), os monitores convencionais ou auto-estereoscópicos, e os sistemas de projeção. No caso dos sistemas de projeção, estes são compostos por óculos polarizadores, obturadores ou filtros coloridos que permitem a visualização estereoscópica em monitores ou telas [21].

Outros dispositivos de saída são: os auditivos, sistemas de som 3D responsáveis pela exibição dos sons; as plataformas móveis, que interferem no equilíbrio do corpo e são utilizadas em simuladores de vôo e jogos eletrônicos; e os dispositivos físicos. Neste último caso, os dispositivos estimulam as sensações físicas por meio do retorno de forças de sensações de toque e de temperatura [23].

Assim, os Sistemas de Realidade Virtual (SRV) permitem que usuários visualizem, interajam e movimentem-se em três dimensões em um ambiente gerado em tempo real pelo computador [24]. Diferente dos sistemas computacionais convencionais, nos SRVs as informações recebidas pelo computador podem ser movimentos capturados do usuário por meio de dispositivos de leitura tridimensional associados a alguma parte do seu corpo ou outros sensores de movimento; o processamento das informações é feito em tempo-real e as respostas fornecidas ao usuário podem ocorrer por meio de dispositivos físicos, imagens tridimensionais ou sons [21].

O grau de imersão e a interatividade influenciam o nível de realismo de um SRV e são determinados pela qualidade dos gráficos apresentados, pelo desempenho dos dispositivos que apresentam esses gráficos, e pelo desempenho do sistema computacional no processamento dos gráficos e processos relacionados aos dispositivos de rastreamento de posição [24]. Outras tecnologias importantes para a RV estão relacionadas à sintetização de som, apresentação de reações por meio de dispositivos físicos e desenvolvimento de dispositivos específicos de interação e de técnicas de interação [24].

### 2.2.2

#### **Princípios de Projeto e Operação**

Uma das consequências do advento da RV foi a necessidade de redefinir o paradigma de interface homem-computador. O sistema tradicional mouse-teclado foi substituído por dispositivos que permitiram maior imersão do usuário no ambiente virtual e o manuseio de todas as potencialidades dessa nova tecnologia. O modo como os participantes interagem com o sistema de RV influencia enormemente suas experiências no ambiente virtual, facilitando seu uso, aumentando a sensação de imersão e ampliando a variedade de ações que se pode tomar dentro do ambiente virtual. Um importante dispositivo de interação é o rastreador de posição que pode ser utilizado para acompanhar a posição, do corpo e os movimentos do usuário, assim como a posição de outro objeto sendo por ele utilizado.

Há várias técnicas para criar sistemas hápticos, e uma variedade de dispositivos de rastreamento, cada um utilizado uma tecnologia diferente, entre

eles, os eletromagnéticos, mecânicos, acústicos, inerciais e ópticos. Ao analisar as tecnologias utilizadas pelos rastreadores, três fatores devem ser levados em consideração: precisão e velocidade de resposta do sensor; interferência do meio; restrições (fios, conexões mecânicas, etc.). Alguns desses dispositivos serão abordados nas seções seguintes.

**Eletromagnéticos:** Algumas características com relação aos dispositivos eletromagnéticos são (figura 2.4):

- Princípio de funcionamento: os rastreadores eletromagnéticos utilizam campos magnéticos para medir posição e orientação. O sistema é composto por transmissor e receptor em forma de bobina. Um sensor unidimensional para estimar a posição no eixo Z, por exemplo, é composto por uma única bobina transmissora orientada na direção Z. Quando uma corrente é aplicada à bobina, um campo magnético é gerado. No receptor, o campo induz uma tensão elétrica máxima proporcional à intensidade do campo magnético medido em uma bobina orientada na mesma direção do campo. A voltagem induzida fornece a distância do transmissor ao receptor, assim como a diferença de alinhamento entre os eixos.
- Precisão/Velocidade: esses sistemas são bastante precisos, cerca de 1 a 2 mm para posição e  $0.1^\circ$  para orientação. A velocidade de captura de dados é de 100 a 200 medidas/segundo.
- Interferência do meio: a presença de metais e o próprio tubo de raios catódicos do monitor podem causar interferência eletromagnética.
- Restrições: pequeno espaço de utilização devido ao alcance do campo magnético gerado. O receptor deve estar cerca 1-3 metros do transmissor.



Figura 2.4: Dispositivos Eletromagnéticos.

**Mecânicos:** Algumas características com relação aos dispositivos mecânicos são (figura 2.5):

- Princípio de funcionamento: os rastreadores mecânicos medem ângulos e distância entre juntas. Dada uma posição conhecida, todas as outras podem ser determinadas pela relação entre as juntas. Os rastreadores podem estar no chão ou anexadas ao corpo do usuário, usualmente na forma de um exoesqueleto. As rotações e as distâncias podem ser medidas por engrenagens, potenciômetros ou sensores de dobra.
- Precisão/Velocidade: por serem mecânicos, possuem alta precisão ( $0.1^\circ$  de rotação). A latência média é de 200 ms.
- Interferência do meio: não sofrem interferência do meio.
- Restrições: a própria arquitetura do rastreador pode restringir o movimento do usuário caso o mesmo seja preso ao chão ou possua muitas juntas.



Figura 2.5: Dispositivos Mecânicos.

**Acústicos:** Algumas características com relação aos dispositivos acústicos são (figura 2.6):

- Princípio de funcionamento: rastreadores acústicos utilizam, tipicamente, ondas sonoras ultra-sônicas para medir distância. Os métodos mais usados são o cálculo do tempo de voo e a coerência de fase. Em ambos, o objetivo é converter tempo em distância. Um único par transmissor/receptor

fornece a distância do objeto em relação a um ponto fixo. O resultado é uma esfera em cuja superfície o objeto está localizado. A adição de um segundo receptor restringe a região a um círculo, e um terceiro receptor restringe a dois pontos, sendo um deles geralmente descartado. Portanto, para estimar a posição são necessários um transmissor e três receptores, ou um receptor e três transmissores. Para estimar posição e orientação, são necessários três transmissores e três receptores.

- Precisão/Velocidade: existe um atraso inerente à espera do sinal. Esse atraso é intensificado devido à relativamente baixa velocidade de propagação do som.
- Interferência do meio: as propriedades do som limitam esse método. O desempenho é degradado na presença de um ambiente ruidoso ou devido a geração de ecos. O som deve percorrer um caminho sem obstrução entre os altos-falantes e os microfones.
- Restrições: a configuração do sistema não é cara, pois o equipamento necessário é composto de microfones, alto-falantes e um computador. Devido às restrições de interferência, a distância média entre receptor e transmissor são alguns metros, contudo, sistemas mais precisos podem cobrir áreas de até 40x30m.



Figura 2.6: Dispositivos Acústicos.

**Inerciais:** Algumas características com relação aos dispositivos inerciais são (figura 2.7):

- Princípio de funcionamento: utilizam magnetômetros passivos, acelerômetros e girômetros. Os magnetômetros passivos medem o campo magnético do ambiente (geralmente da Terra) e fornecem medidas angulares. Os girômetros fornecem medidas angulares mais precisas e os acelerômetros fornecem medidas lineares. Todo são baseados na segunda lei do movimento de Newton, sendo assim, o sistema deve integrar a leitura para obter a velocidade e a posição.
- Interferência do meio: Não existe interferência, pois o sistema é "auto-contido", não havendo necessidade de um ponto externo para obtenção de dados.
- Restrições: Não existe limitação física para o espaço de trabalho, sendo o mesmo limitado somente pela conexão entre o dispositivo e o computador.

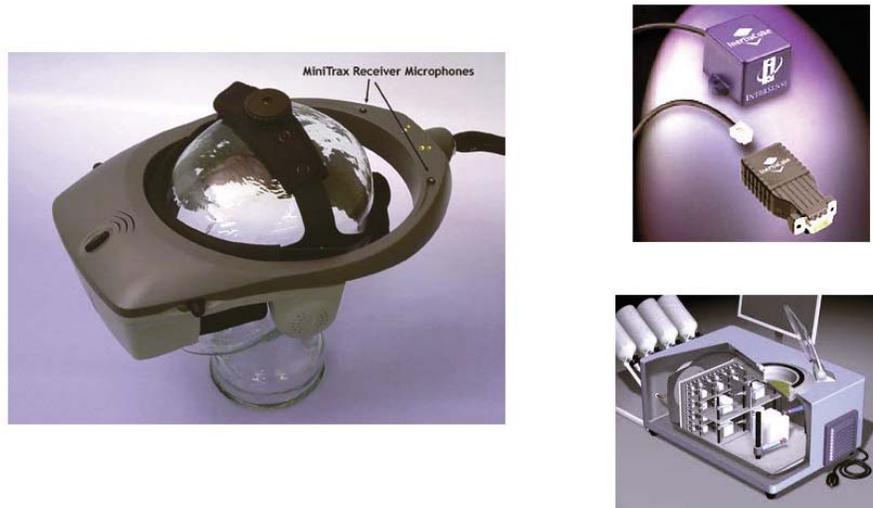


Figura 2.7: Dispositivos Inerciais.

**Ópticos:** Algumas características com relação aos dispositivos ópticos são (figura 2.8):

- Princípio de funcionamento: baseado na análise da projeção bidimensional de uma imagem ou na determinação dos ângulos de feixes da

varredura para calcular a posição e orientação de um dado objeto. Os sensores ópticos são geralmente câmeras (por exemplo, Charge-Coupled Device (CCD), um detector 4Q ou um diodo de efeito lateral). Um CCD é um conjunto de detectores recebendo imagens no plano da câmera. Um detector 4Q é um componente plano capaz de gerar sinais especificando o centro do feixe de luz que incide em sua superfície. Um diodo de efeito lateral é um componente que gera um sinal proporcional à posição da luz chegando em um eixo. Quando o sensor utilizado é uma câmera, técnicas de visão computacional devem ser utilizadas para determinar a posição do objeto. Se somente uma câmera for utilizada, é possível determinar um segmento de reta que passa pelo objeto detectado e pelo centro de projeção da câmera. Usando mais de uma câmera, podem-se determinar a posição e orientação do objeto.

- **Precisão/Velocidade:** a velocidade de captura depende muito do sensor empregado. Uma câmera padrão National Television Systems Committee (NTSC) consegue capturar imagens a taxas de 30 quadros por segundo, limitando a amostragem, enquanto câmeras digitais podem capturar a taxas de 200 a 1000 quadros por segundo. A precisão dos dados depende das técnicas de visão computacional empregadas: calibração de câmera, extração de informação da imagem e utilização de filtro para evitar tremidos.
- **Interferência do meio:** o laser e outros emissores podem refletir em objetos próximos, atrapalhando a medição.
- **Restrições:** a câmera deve estar sempre enxergando o objeto sendo rastreado e o emissor de luz não pode estar obstruído. Uma solução com três ou quatro câmeras oferece redundância que permite que uma ou duas sejam bloqueadas antes do sistema deixar de funcionar.

## 2.3

### Sistemas de Interface Háptica

Sistemas hápticos oferecem interação com o ambiente virtual através de dispositivos e programas que permitem ao usuário sentir fisicamente as reações e os movimentos realizados no ambiente virtual. Os dispositivos fornecem sensação tátil e de força. A sensação tátil está ligada ao contato com o objeto, com sua textura e temperatura, enquanto a sensação de força é relacionada ao senso de posição e movimentação junto com as forças associadas ao movimento durante a interação com um objeto [25]. Os programas, por sua vez, são utilizados para controlar esses equipamentos, processando as informações



Figura 2.8: Dispositivos Ópticos.

recebidas do dispositivo e enviando para este a reação ao movimento feito no mundo virtual. Essa reação depende do movimento realizado, da posição e da intensidade com a qual a força foi aplicada sobre a superfície ou o objeto. Essas informações são essenciais para o cálculo da força de reação a ser enviada para o dispositivo e sentida pelo usuário.

Desta forma, com o uso de sistemas hápticos, é possível movimentar ou deformar algum objeto virtual - dependendo do material de que ele é feito - sentindo sua textura, peso, ou a força resultante deste movimento [26]. Para isso, o programa deve calcular precisamente as propriedades de força que o dispositivo deve retornar para o usuário. Se a força aplicada for excessiva, o usuário se cansará rapidamente e, se for muito fraca, as sensações não parecerão verdadeiras. O programador deve encontrar uma forma de calibrar e equilibrar essas forças, tornando a interface o mais realista possível [27]. Na figura 2.9 mostra-se um exemplo de sistemas hápticos.

## 2.4 Dispositivos Hápticos

Antes da disseminação do uso de computadores nos locais de trabalho, praticamente todas as atividades humanas envolviam o uso de habilidades motoras, como escrever e desenhar gráficos. As interfaces de computador,

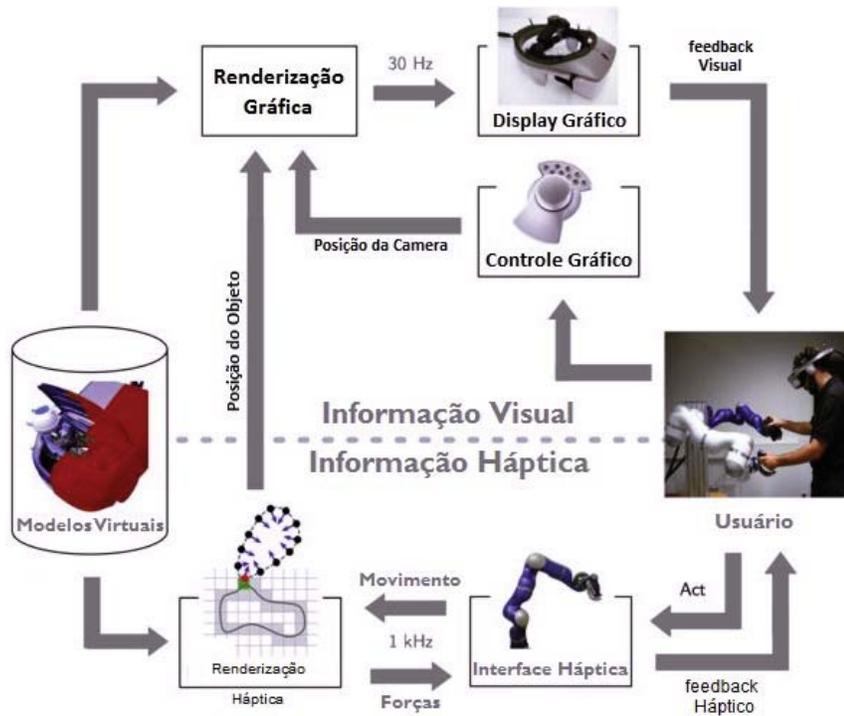


Figura 2.9: Exemplo de um Sistema Háptico

entretanto, não fizeram uso adequado destas capacidades fundamentais dos seres humanos. Com exceção de alguns dispositivos de entrada como o mouse ou joysticks, a interação entre o usuário e o computador depende de habilidades similares às necessárias para se usar uma máquina de escrever. Os dispositivos hápticos podem ser vistos como uma alternativa para sanar estas limitações.

Com eles é possível simular diferentes efeitos como: inércia, rigidez, colisão, textura, atrito, gravidade e força de reação. Também conhecidos como dispositivos de force-feedback (retorno de força), esses equipamentos recebem as características do movimento realizado pelo usuário (deslocamento, direção e aceleração) e enviam um resposta háptica a esse movimento.

### 2.4.1 Conceitos Básicos

Ao contrário das interfaces tradicionais, as interfaces hápticas geram sinais mecânicos que estimulam os componentes cutâneos e cinestésicos discutidos anteriormente. Além disso, elas dão aos usuários a capacidade de agir sobre o ambiente. Dessa forma, é possível definir os dispositivos hápticos como sendo interfaces homem-computador que associam gestos ao toque e à cinestesia, com o intuito de prover um meio de comunicação mais natural entre

homens e máquinas.

Uma característica fundamental desses dispositivos é a programabilidade. Este conceito refere-se à capacidade que os dispositivos hápticos têm de modificar suas propriedades mecânicas e físicas através de comandos provenientes do computador. Com isso, cria-se a possibilidade de uma troca bidirecional de energia (e conseqüentemente de informação) entre o usuário e o sistema. Uma maneira simples de entender melhor essa característica é comparar um mouse convencional com um mouse equipado com tecnologia háptica, como o WingMan da Logitech[28]. Com um mouse típico, o fluxo de informações tem apenas uma direção, do usuário para o computador. Dessa forma, o usuário praticamente não recebe informações sobre os seus movimentos, embora a inércia e a fricção do dispositivo com a superfície o auxiliem a executar os movimentos necessários. Os seus botões, ao contrário, são consideravelmente mais ricos do ponto de vista da interação, pois apresentam certa resistência e produzem um som característico para indicar que ocorreu uma mudança de estado. De qualquer forma, os botões não são programáveis.

O mouse háptico, por outro lado, pode dar ao usuário um feedback programável baseado no tato, permitindo uma interação mais rápida e mais intuitiva com a máquina. A Figura 2.10 ilustra ambos os cenários: do lado esquerdo, tem-se o fluxo de informações no caso do uso de um mouse convencional. Do lado direito, o uso do mouse háptico. Todos os objetos, naturais ou artificiais, podem ser inanimados ou animados. Os inanimados (ou inertes) podem apenas dissipar energia mecânica, enquanto os animados podem fornecer algum tipo de energia. Da mesma forma, podem existir dois tipos de dispositivos hápticos, convencionalmente denominados passivos ou ativos, apesar de ambos compartilharem o fato de serem programáveis.

Dispositivos passivos são geralmente projetados para terem uma dissipação programável, como função da posição ou do tempo. Pertencem a esta categoria dispositivos que possuem velocidade programável. Outra categoria de dispositivos passivos inclui aqueles capazes de modificar seu comportamento elástico, ou seja, modificar sua rigidez.

Dispositivos ativos são aqueles em que a troca de energia entre o usuário e a máquina é um fruto exclusivo da forma em que o retorno é fornecido. Assim, pode-se dividi-los em duas categorias. Nos dispositivos ativos isotônicos, os atuadores no dispositivo funcionam como uma fonte de força, e a posição é então medida. Nos isométricos, a posição é fornecida e a seguir a força é medida. Assim, percebe-se que, nos primeiros, a força que o dispositivo aplica não muda com a posição, enquanto que nos últimos a sua posição não muda com a força aplicada pelo usuário.

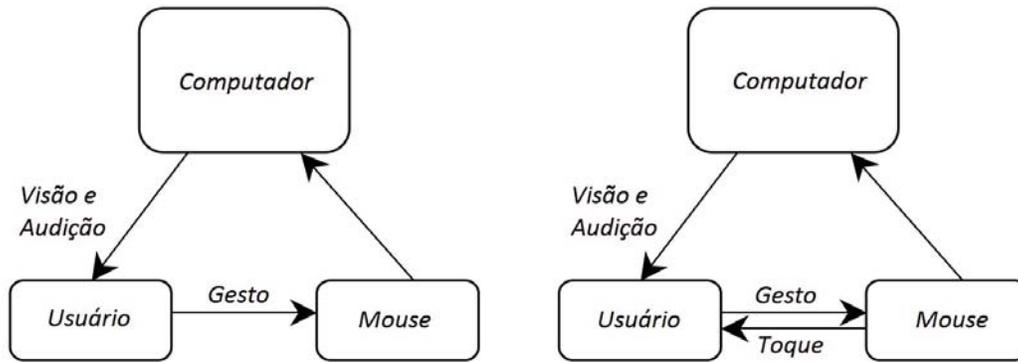


Figura 2.10: Fluxo de informações na interação com um mouse convencional (esquerda) e um mouse háptico (direita)

Normalmente, deseja-se que os dispositivos hápticos ativos sejam usados em ambientes artificiais, de tal forma que estes ambientes sejam passivos, como na simulação de uma cirurgia. O sucesso deste tipo de aplicação representa, porém, um desafio considerável [29]. Entretanto, a habilidade para criar uma situação ativa temporária pode ser bastante útil para aumentar o fluxo de informação entre a máquina e o usuário. Por exemplo, simular o comportamento de um volante em um jogo requer que a interação seja ativa, uma vez que dispositivos passivos não podem criar simulações. Finalmente, deve-se ter em mente que existe a possibilidade de interações instáveis entre ambientes passivos (rolar um tronco de madeira num ambiente virtual, por exemplo), caso o usuário não possua a energia necessária para executar a tarefa até o fim.

Em suma, independentemente da abordagem usada em um projeto, a bidirecionalidade é a característica que mais facilmente distingue os dispositivos hápticos, quando comparados com outras interfaces. Esta observação explica em parte a razão pela qual eles criam uma sensação de imediatismo no usuário, que foi bastante explorada nas primeiras aplicações desta tecnologia. Um dispositivo háptico precisa ser projetado para receber estímulos da mão humana (ou do pé, ou de qualquer outra parte do corpo) ao mesmo tempo em que gera estímulos para ela. A recepção de estímulos tem sido extensivamente explorada e vários tipos de dispositivos existem atualmente, como dispositivos apontadores, botões e joysticks. A geração de estímulos, no entanto, é consideravelmente mais difícil de ser alcançada de forma satisfatória.

## 2.5

### Componentes dos Sistemas Hápticos

Uma interface háptica completa normalmente inclui um ou mais transdutores eletromecânicos (sensores ou atuadores) em contato com o usuário, de modo a aplicar sinais mecânicos a determinadas áreas do seu corpo e para medir outros sinais igualmente mecânicos nestas mesmas áreas.

Outra parte importante das interfaces hápticas completas é o sistema computacional que manipula os transdutores. A função deste sistema computacional é fornecer capacidades de “renderização” háptica, que são similares aos processos de renderização de imagens em sistemas gráficos. A primeira, entretanto, impacta na troca de informação bidirecional entre o dispositivo e o usuário [30]. A tarefa computacional neste tipo de renderização é gerar sinais que são relevantes a uma determinada aplicação. Várias abordagens existem para criar tal feedback. Por exemplo, um modelo pode ser usado para representar um ambiente, e suas equações solucionadas pelo computador, para encontrar as forças a serem aplicadas como uma função da disposição dos objetos. O modelo pode ser desenvolvido a partir de princípios básicos do cotidiano, ou parametrizado para representar apenas alguns aspectos desejados [31]. As características do tato humano permitem, em alguns casos, o uso de modelos físicos simplificados para gerar objetos virtuais que ofereçam estímulos táteis que competem em realismo com objetos verdadeiros, como foi demonstrado em [32].

#### 2.5.1

##### Sensores

Em princípio, ao pensar em percepção háptica, quase de imediato nos vem à mente o termo sensor. Realmente vários trabalhos buscam o desenvolvimento destes dispositivos de forma que eles atendam à necessidade de cada aplicação. Bons trabalhos podem ser encontrados na literatura, dentre os quais podem ser citados: Rosa[33], Voyles[34], Bicchi[35], Mascaro[36], Fasse[37].

Em Rosa[33], foi proposto o desenvolvimento de um dispositivo denominado SCROLLIC, que consiste em duas garras paralelas com aderência, que têm como objetivo fornecer múltiplos contatos e permitir a manipulação de objetos de formas variadas, desde que suas dimensões estejam dentro do espaço de trabalho da garra. Em Voyles[34], foi desenvolvido um sensor tátil modular e um sistema de atuador para observar demonstrações de tarefas de contato. O sistema consiste em três partes: um sensor tátil intrínseco para medir força líquida/torque, um sensor tátil extrínseco para medir distribuições de contato, e um atuador tátil para exibir distribuições táteis. Os componentes

modernos são o sensor extrínseco e o atuador tátil que é "simétrico por dentro e por fora" para um ou outro e emprega um gel eletroreológico para atuação. A maior vantagem de usar o gel eletroreológico é que ele pode ser controlado eletricamente; o que é conveniente, pois requer pequena carga embora as tensões sejam muito altas, e ele possa ser feito de uma forma bem compacta. Mascaeo[36] trabalhou no desenvolvimento de um sensor para detectar força e toque, quando o operador tem a intenção de pressionar botões ou interruptores. Este sensor permite que dispositivos físicos normais como interruptores presos em paredes sejam substituídos por "dispositivos virtuais", que contêm circuitos elétricos e partes mecânicas, mas que são apenas desenhos. O desenvolvimento de dispositivos relacionados à simulação, como transmissão de sensações em ambientes virtuais, também é muito comum já que tais trabalhos precisam medir o quão real seja o ambiente simulado. Devido a este fato, Fasse[37] em seu trabalho propôs um modelo teórico com o objetivo de medir quantitativamente dispositivos de percepção háptica em ambientes virtuais.

### 2.5.2

#### Atuadores

São elementos que atuam sobre as grandezas físicas do processo, respeitando comandos, como motores, válvulas e aquecedores elétricos. A interface háptica é composta por um ou mais transdutores eletromecânicos (sensores ou atuadores) diretamente ligados ao usuário pois, através destes componentes conectados a determinadas partes do corpo, é possível captar e medir os sinais mecânicos. É composta também por um sistema computacional que efetiva a renderização háptica, que tem como finalidade a troca de informação bidirecional nos dispositivos hápticos e os objetos virtuais [38].

### 2.5.3

#### Modelagem da Cena Háptica

A modelagem da cena háptica em certos aspectos é semelhante a de uma cena gráfica (visual). A cena gráfica é formada basicamente pelo volume de visualização gráfico dentro do mundo virtual e pelos objetos virtuais dentro deste volume. De forma análoga, a cena háptica também define um volume dentro do mundo virtual, conhecido como volume háptico, e posiciona objetos dentro deste volume, sendo um dos objetos desta cena o próprio dispositivo háptico. Na cena háptica são irrelevantes as características visuais dos objetos, tais como cor e iluminação. Neste caso, os objetos devem apresentar propriedades materiais como aspereza, maciez e elasticidade, que permitam identificá-los a partir do toque. Assim, sem o auxílio da visualização, pode-se

identificar quando está em contato com um determinado objeto, sentir sua textura, variações superficiais e, até mesmo, temperatura [39].

Visualmente, o ser humano é capaz de perceber de forma suave e contínua as movimentações e alterações de um objeto pela tela do computador a uma frequência de 30Hz~60Hz. Para detectar as características físicas de um objeto, paralela e sincronizada em relação à visualização gráfica, as rotinas de cálculo da cena háptica necessitam ser executadas a uma frequência de 1000Hz [40], modificando a posição do dispositivo no ambiente virtual e enviando o sinal de retorno de força ou tátil ao usuário. Cada instante deste ciclo de cálculos na cena háptica é chamado de renderização háptica (figura 2.11).

Embora elas possam parecer drasticamente diferentes, todas têm dois elementos importantes em comum: um software para determinar as forças que resultam quando a identidade virtual do usuário interage com um objeto, e um dispositivo por meio do qual essas forças podem ser aplicadas ao usuário. O processo atual usado pelo software para realizar seus cálculos é chamado de renderização háptica. Um método comum de renderização usa modelos poliédricos para representar objetos no mundo virtual. Esses modelos 3D podem retratar uma variedade de formas e calcular o dado do toque ao avaliar como as linhas de força interagem com as várias faces do objeto. Tais objetos 3D podem ser feitos para parecerem sólidos e podem ter textura.

#### 2.5.4 Renderização Háptica

Renderização háptica pode ser definida como o processo pelo qual as rotinas de controle háptico calculam as modificações na cena háptica, atualizando-a e enviando estas modificações ao usuário em tempo real [40].

O processo de renderização háptica pode ser descrito da seguinte forma: o usuário manipula o dispositivo háptico cuja representação visual pode ser vista na cena gráfica, o qual denominará de cursor ou ponto de interação. À medida que o usuário move o ponto de interação ao longo da cena, sua posição e orientação são detectadas pelos codificadores do dispositivo; quando há uma colisão com um objeto virtual, esta deve ser detectada imediatamente, passando a atuar o algoritmos de cálculo de retorno de força; quando o ponto de interação colidir com objetos, os algoritmos calculam a força de reação baseado na profundidade de penetração. Os vetores de força podem então ser modificados de forma a representar o tipo de superfície que se deseja renderizar [39]. De modo simplificado, as principais etapas da renderização háptica são:

1. Localização do ponto de interação no ambiente virtual.

2. Detecção das colisões entre o ponto de interação e a geometria dos objetos virtuais.
3. Cálculo do vetor de força de reação (baseado nas propriedades materiais definidas do ambiente virtual).
4. Envio do vetor de força ao dispositivo háptico.
5. Retorna passo 1.

Como mencionado anteriormente, esses passos da renderização háptica precisam ser executados a uma frequência de 1000Hz, permitindo uma percepção mais natural das características dos objetos pelo usuário. Durante o passo 3, o modo como estas forças são computadas pode produzir diferentes efeitos sobre o objeto virtual. Pode-se, por exemplo, renderizar superfícies de objetos rígidos, flexíveis, ásperos e etc.

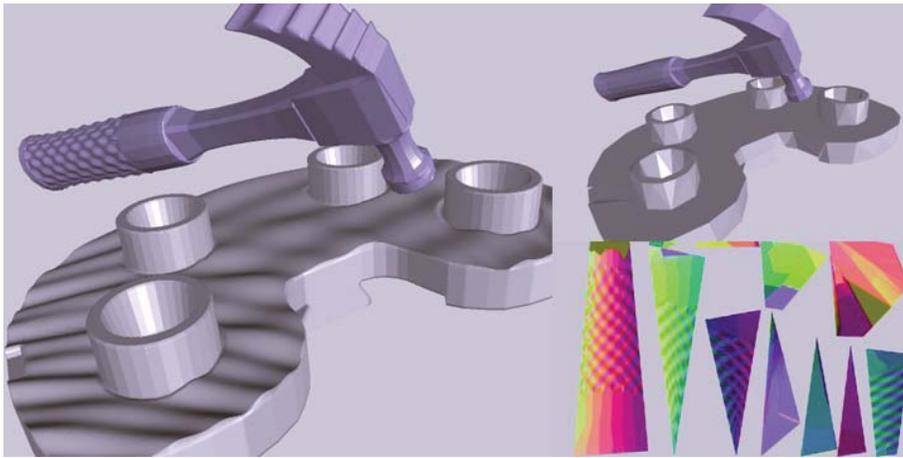


Figura 2.11: Cena de uma Renderização Háptica

## 2.6

### Principais Dispositivos Hápticos Comerciais

O trabalho de transferir imagens hápticas para o usuário é do dispositivo de interface. Em muitos aspectos, o dispositivo de interface é análogo ao mouse, exceto que o mouse é um dispositivo passivo que não pode comunicar dado háptico sintetizado para o usuário. Apresentam-se a seguir alguns sistemas hápticos específicos para entender como esses dispositivos funcionam.

### 2.6.1 Phantom Omni

Desenvolvido pela SensAble Technologies, o Phantom Omni é compacto e portátil. Sua interface principal de manipulação e force-feedback consiste de um braço mecânico terminado em uma peça semelhante a uma caneta, como pode ser visto na figura 2.12. Sua estrutura adequa-se a simulações de procedimentos médicos nos quais se utilizam ferramentas como seringas, agulhas, bisturis dentre outros instrumentos similares [41].

As informações captadas são os movimentos de translação e rotação nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , por isso ele é considerado equipamento com seis graus de liberdade. Além disso, este tipo de dispositivo oferece um mecanismo de force-feedback nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  permitindo, desta forma, uma interação entre o usuário da simulação e a aplicação [42].



Figura 2.12: Dispositivo Háptico Phantom-Omni

### 2.6.2 Delta.6

Desenvolvido pela empresa Force Dimension, o Delta.6 é uma interface de alto desempenho com manipulação force-feedback, baseado em um manipulador paralelo delta. Ele oferece seis graus de liberdade compreendidos em translação e rotação, e além disso oferece uma área de trabalho maior do que os dispositivos comuns. Graças à sua configuração paralela, o Delta.6 pode transmitir grandes forças contínuas e torques em qualquer lugar de sua área de trabalho.

Sua rigidez mecânica, combinada com seu controlador em tempo real por USB 2.0, permite uma representação elevada de forças de contato a uma taxa de 4KHz. Assim, para proporcionar um maior grau de transparência háptica, há compensação de gravidade, mantida no espaço de translação e rotação, acoplado com componentes passivos e atuadores. É uma solução versátil para aplicações que exigem grandes forças e grande espaço de trabalho, mas o custo

é elevado em comparação aos dispositivos descritos anteriormente. A figura 2.13 mostra este dispositivo.



Figura 2.13: Dispositivo Háptico Delta.6 Force Dimension

### 2.6.3 Sigma.7

O Sigma.7 é a interface háptica mestre mais avançado desenvolvido pela empresa Force Dimension. O Sigma.7 introduz sete graus de liberdade, e além disso possui uma capacidade de alta precisão háptica para agarre. Calibrado para uma excelente compensação de gravidade, a força e torque no efetuator terminal oferecem um desempenho extraordinário tátil, permitindo a interação instintiva com aplicações táteis complexas.

Projetado para a indústria aeroespacial avançada e indústrias médicas, permite um elaborado controle para robôs hábeis. Seu desenho ergonômico, disponível na configuração esquerda e direita, pode ser integrado em uma configuração de estação de trabalho dual para operação bimanual. A figura 2.14 mostra este dispositivo.



Figura 2.14: Dispositivo Háptico Sigma.7 Force Dimension

## 2.7

### Principais Aplicações com Dispositivos Hápticos

Diversos projetos têm comprovado que a utilização de dispositivos hápticos em aplicações na saúde, para a educação, e treinamento militar, melhora o nível de percepção e aprendizado efetivo, ampliando a sensação de imersão sentida pelo usuário.

#### 2.7.1

##### Histórico

Os desenvolvimentos que deram origem aos sistemas de realidade virtual começaram nos Estados Unidos com a construção de simuladores de voo após a Segunda Guerra mundial. A indústria do entretenimento também teve um papel bastante importante no surgimento da realidade virtual, com o simulador Sensorama em 1958: uma espécie de cabine onde filmes 3D eram projetados e combinados com som estéreo, vibrações mecânicas, aromas e ar movimentado por ventiladores, fornecendo ao usuário/participante uma viagem multisensorial [43].

Em 1963, Ivan Sutherland publicou sua tese de doutorado e descreveu como os computadores poderiam ser usados para exibir gráficos interativos. Mais tarde ele apresentou o primeiro vídeo-capacete que permitia ao seu usuário a visualização de um gráfico, representado em estrutura de arame, através de pequenos monitores de tubo de raios catódicos posicionado diretamente diante dos olhos [44]. A partir de então, as pesquisas se intensificaram e em 1982 os simuladores de voo da força aérea americana já utilizavam vídeo-capacete com integração de áudio e vídeo, e permitiam movimentos com seis graus de liberdade [45].

A primeira luva de dados, dispositivo capaz de capturar os movimentos da mão e inclinação dos dedos do usuário e transmiti-los ao computador, surgiu comercialmente em 1985. Em 1986, a NASA possuía um ambiente virtual que permitia aos usuários ordenar comandos de voz, escutar fala sintetizada e som 3D, além de manipular objetos diretamente com os movimentos das mãos utilizando luva de dados machado[21].

Diversas pesquisas, como as mencionadas acima, levaram à conscientização de que produtos de realidade virtual podiam ser comercializáveis, o que ocasionou a criação de empresas de equipamentos e sistemas para realidade virtual, dando início a diversos programas de pesquisa nessa área no mundo inteiro. Em 1989, a empresa Autodesk Inc. apresentou o primeiro sistema de realidade virtual baseado em um computador pessoal [45].

Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, a realidade virtual está sendo utilizada para os mais diversos fins na diversas áreas da ciência, Na última década, aplicações médicas utilizando realidade virtual passaram a ser desenvolvidas, tornando essa área comercialmente e clinicamente importante em termos de tecnologia aplicada à medicina [46].

Na figura 2.15, pode-se observar um dos últimos projetos desenvolvidos pela empresa Toyota, tratando-se de um simulador de treinamento para dirigir automóveis, sendo o sistema mais avançado até o momento. Este projeto tem um automóvel de tamanho real localizado na frente de uma tela de vídeo em 360 graus. As sensações ao dirigir dentro do simulador são de: aceleração, velocidade, mudança de marcha, forças centrífugas nas curvas, e outras manobras que estão presentes quando dirigimos um automóvel real. Além disso, o simulador completa com som 3D, promovendo uma experiência totalmente realista.

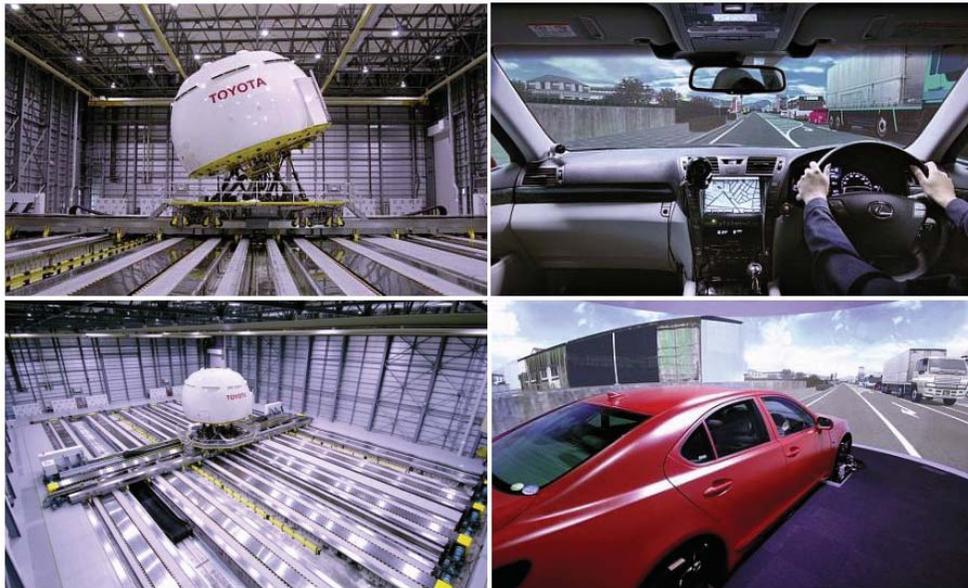


Figura 2.15: Simulador de automóveis desenvolvido pela empresa Toyota

### 2.7.2 Medicina

O uso de interfaces hápticas na criação de simuladores voltados para o treinamento de profissionais da área de saúde tem recebido atenção especial por parte dos pesquisadores da área. A principal motivação é o fato de que simulações não colocam a vida de pacientes em risco, além de serem executadas em um ambiente controlado, sendo possível criar situações específicas de

acordo com o objetivo do treinamento. Além disso, a tecnologia pode melhorar consideravelmente a experiência dos cirurgiões que operam ou diagnosticam pacientes à distância.

Sela[47] apresentou um simulador cirúrgico (figura 2.16) que permite aos médicos praticarem e aprimorarem seus conhecimentos em um ambiente virtual antes de entrar em uma sala de cirurgia. Foi utilizado um algoritmo batizado de FEM-DFFD, de baixa complexidade computacional, que permite execução em tempo real, podendo manter uma precisão razoável. O resultado obtido nesse projeto mostrou que o sistema 4D DFFD pode ser usado para simular em tempo real incisão em um modelo 3D usando um dispositivo háptico.

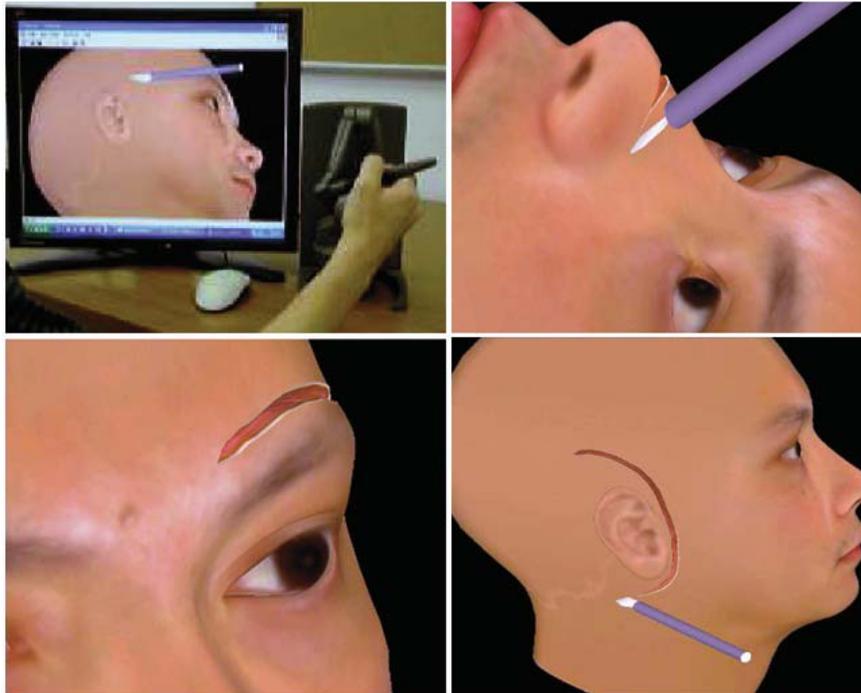


Figura 2.16: Simulador Cirúrgico Sela[47]

D'Aulignac[48] desenvolveu uma tese sobre um simulador que permite a estudantes da área médica praticarem diagnóstico de trombose em um ambiente virtual (figura 2.17). Foi utilizada a ferramenta Echography, um modelo de membro inferior, e um dispositivo háptico para realizar os testes. O resultado obtido nesse projeto mostrou que é possível utilizar um simulador ecográfico juntamente com um braço robótico para diagnosticar a trombose.

A tese de Blyth[49] relata o desenvolvimento de um simulador cirúrgico e um componente de avaliação. O simulador permitiu a simulação da fixação de implante fratura do quadril (figura 2.18). Foi utilizado um quadril virtual utilizando imagens radiográficas para orientar a redução da fratura e colocação

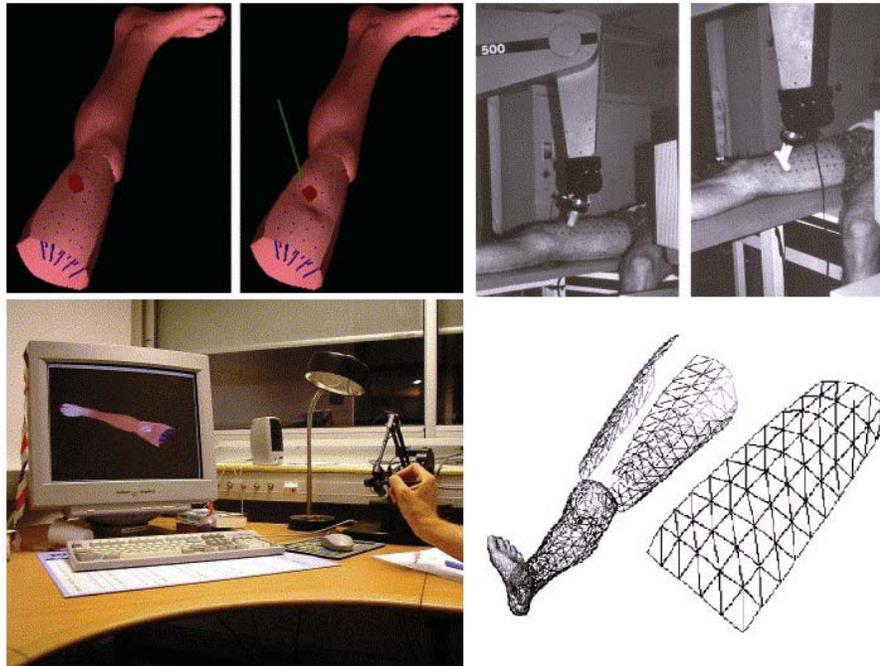


Figura 2.17: Diagnóstico de Trombose [48]

do implante. Os testes foram feitos com dez participantes do estudo. Segundo os autores, os resultados mostraram que o simulador atenderia o problema proposto e a maioria das pessoas afirmaram que o simulador forneceu uma vis ao realista do ambiente operacional, e que a visão tridimensional fornecida era necessária.

Entretanto, apesar das promissoras potencialidades que este tipo de aplicação parece oferecer, existem poucos testes sistemáticos para simuladores como os descritos acima.

### 2.7.3 Educação

Os sistemas hápticos conjuntamente com a realidade virtual (RV) e a realidade aumentada (RA) contribuem de maneira significativa na área da educação como processo de exploração, descoberta, observação e construção de uma nova visão do conhecimento, oferecendo ao aprendiz a oportunidade de melhor compreensão do objeto de estudo. Essas tecnologias, portanto, têm potencial de colaborar no processo cognitivo do aprendiz, proporcionando não apenas a teoria, mas também a experimentação prática do conteúdo em questão [50]. A introdução da RA na matemática, por exemplo, pode eliminar uma das principais dificuldades do aluno: visualizar um problema complexo de geometria. Ela fornece a professores e estudantes um método intuitivo e colaborativo

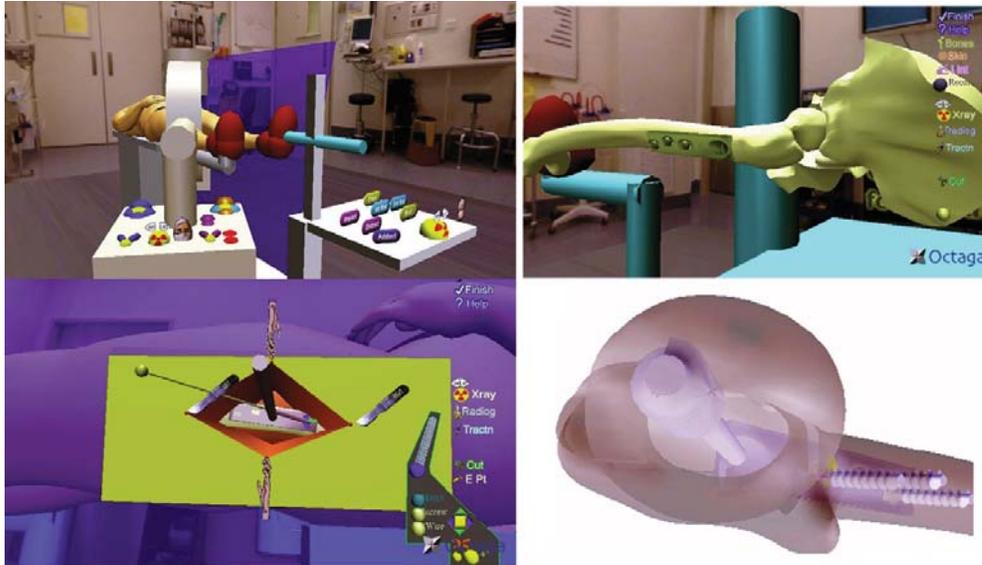


Figura 2.18: Simulação da fixação da fratura do Quadril [49]

de aprender. Os alunos vêem os objetos tridimensionais, sem precisar imaginá-los ou desenhá-los numa folha de papel. A tendência da educação é fomentar o entendimento da aprendizagem como processo individual e complexo, e sustentar-se na visão global do mundo, fruto das vivências do indivíduo, inter-relacionada com o desenvolvimento de capacidades ligadas à observação, análise, planejamento, decisão, aplicação e avaliação. Para isso, os sistemas hápticos pode revelar-se como recurso potente, uma vez que propiciam a visualização, interação e resposta em tempo real. Na figura 2.19 são mostrados alguns exemplos.

#### 2.7.4 Militar e Aeroespacial

Dispositivos hápticos também têm sido utilizados em simulações de treinamento de militares e de astronautas. Existem várias circunstâncias no contexto militar nas quais eles podem agir como fontes de informação alternativas. Ou seja, há situações em que o toque poderia fornecer informação que por alguma razão não esteja disponível ou não seja precisa quando proveniente da visão ou da audição. Em alguns casos, combatentes têm sua visão bloqueada ou podem não poder desviar a visão de algum ponto específico para consultar outra fonte de informação. Além disso, as condições no campo de batalha podem exigir que as comunicações sejam inadiáveis. Em cenários como os descritos acima, a tecnologia háptica poderia ser usada como



Figura 2.19: Sistemas Hápticos para a Educação

modalidade de comunicação alternativa ao som ou imagens, em situações em que informações simples como perigo iminente ou ordens para deslocamento precisem ser transmitidas. A figura 2.20 mostra diferente tipos de treinamento militar utilizando estes sistemas hápticos.



Figura 2.20: Simuladores para treinamento militar

Provavelmente, o simulador militar mais conhecido é o de voo. A Força Aérea, o Exército e a Marinha usam simuladores de voo para treinarem seus pilotos. As missões de treinamento podem incluir: como voar em batalha, como

se reestabelecer em caso de emergência, ou como coordenar a sustentação no ar com operações terrestres. Alguns simuladores de voo incluem um módulo completamente fechado, enquanto outros simplesmente têm um conjunto de monitores de computador organizados de modo a cobrir o campo de visão do piloto. Alguns exemplos destes simuladores são mostrados na figura 2.21.



Figura 2.21: Simulador de aviões militares

Os simuladores de RV de veículos terrestres são uma parte importante da estratégia do exército. Na verdade, os simuladores são uma peça fundamental do FCS (Futuro Sistema de Combate). O FCS consiste em um sistema de comando de batalha via rede, além de veículos avançados e plataformas de defesas. Os cientistas da computação criaram os simuladores de FCS para serem usados juntos em uma rede, facilitando as complexas missões de treinamento que envolvem vários participantes desempenhando vários papéis.

Os simuladores podem ser muito caros. O simulador do Stryker mostrado na figura 2.22, o mais moderno, custa cerca de R\$ 1.720.000 por unidade. Entretanto, quando se compara o custo desse equipamento ao de um veículo real de verdade (que, dependendo do modelo, pode chegar a milhões de reais), e se tem em mente que o soldado por trás dos controles estará seguro, é fácil justificar o custo.

Hoje, muitas instalações de treinamento usam os simuladores para que os soldados se acostumem com táticas de combate urbano. Os campos de ba-



Figura 2.22: Simulador do veículo terrestre Stryker

talha atuais são muito diferentes dos que existiam antigamente, com soldados se aventurando em cidades em vez de estabelecerem linhas de batalha tradicionais. Os simuladores dão ao exército a chance de ensinar aos soldados navegarem e trabalharem efetivamente dentro de cenários urbanos sem ter que construir um ambiente artificial físico.