

## Avaliação baseada em lógica *fuzzy* para um *framework* voltado à construção de simuladores baseados em RV

Alysson D. Santos, Liliane S. Machado, Ronei M. Moraes, Renata G. S. Gomes  
Laboratório de Tecnologias para o Ensino Virtual e Estatística  
Universidade Federal da Paraíba - CCEN  
*alyssondiniz@yahoo.com.br, liliane@di.ufpb.br, ronei@de.ufpb.br,*  
*renatagrigorio@yahoo.com.br*

### Resumo

Sistemas de Realidade Virtual permitem a criação de ambientes imersivos para simulações de situações do cotidiano. Tal característica vem sendo explorada na construção de aplicações com o intuito de prover treinamento em procedimentos médicos. Neste contexto, a adição de uma ferramenta de avaliação das ações do usuário torna estas aplicações mais eficientes, sobretudo no auxílio à avaliação do aprendizado do usuário deste tipo de sistema. Neste trabalho, realiza-se um estudo acerca dos conceitos básicos e da importância da avaliação das ações do usuário no contexto das simulações virtuais voltadas para ensino e treinamento. Detalha-se ainda a implementação, integração e realização de testes de um módulo de avaliação baseado em lógica *fuzzy* a um conjunto de bibliotecas livres voltado para o auxílio do desenvolvimento de aplicações de Realidade Virtual para ensino e treinamento de medicina.

### Abstract

Virtual Reality Systems allow the creation of immersive environments for simulated everyday situations. This characteristic has been exploited to build applications in order to provide training in medical procedures. In this context, the addition of a tool for assessing the actions of the user makes these applications more efficient, especially in helping to assess the user's learning in such systems. This work performs a study of the basic concepts and the importance of assess user's actions in the context of virtual simulations focused on education and training. It also details the implementation, integration and testing of an assessment module based on fuzzy logic to a set of free libraries dedicated to the aid of the

development of applications of virtual reality to education and medical training.

### 1. Introdução

A RV vem sendo aplicada de maneira bastante diversificada e em diversas áreas do conhecimento como medicina, engenharia e educação. Neste contexto, a RV tem provado seu poder como ferramenta de ensino e treinamento via simulação em vários campos, tais como: a aviação, gestão empresarial, indústria petrolífera, nuclear e militar [1]. A maior vantagem de treinamento baseado em RV é o ambiente interativo, que possibilita o aprendizado através de uma experiência pessoal. Geralmente, as tarefas simuladas por RV são tarefas perigosas, inviáveis ou possuem alto custo para serem realizadas no ambiente real [2,3].

Uma das qualidades relacionadas aos sistemas de computação para simulação e treinamento é a possibilidade de monitorar as ações que o usuário faz no sistema. Sob o ponto de vista da RV, tal monitoramento torna-se fundamental, pelo fato das ações do usuário corresponderem ao que ele compreende no mundo virtual. Isto permite o uso de informações de interação para fins diversos que variam desde a quantificação da compreensão, à usabilidade e à avaliação do usuário na realização de um procedimento [4,5].

Esse monitoramento das ações do usuário é suportado por algum tipo de método de avaliação que viabilize os cálculos necessários para a classificação dos dados captados da interação do usuário. Pode-se perceber a crescente importância dada aos métodos de avaliação no contexto das simulações por RV, sendo observada sua utilização em diversos trabalhos como [4], [6], [7], e [8].

Os métodos de avaliação podem ser caracterizados como *offline* ou *online*. Uma avaliação é caracterizada como *online* quando ela oferece ao usuário uma resposta rápida, com tempo imperceptível para quem opera o sistema, assim que o treinamento termina. Por outro lado, em uma avaliação *offline* a classificação do treinamento pode esperar por algum tempo, perceptível pelo usuário. Por razões didáticas, torna-se preferível o uso de avaliadores *online*, visto que o usuário deverá ter a resposta do treinamento realizado assim que este for terminado [9].

Outra possibilidade interessante trazida pela avaliação é a emissão de relatórios informando o desempenho de um usuário na execução de algum procedimento fornecido por um simulador. Ela se torna uma ferramenta importante para ser agregada a um simulador, pois obtendo um resultado sobre seu desempenho, o usuário pode avaliar suas capacidades e o progresso de suas habilidades em um simulador. Deste modo, a partir destes resultados ele pode estar apto a executar o procedimento real ou procurar novos meios ou técnicas que melhorem o seu desempenho. Além disso, vários tipos de treinamento não podem ser classificados em bom ou ruim, devido à sua complexidade. Nesses casos, a existência de uma ferramenta de avaliação *online* incorporada a um sistema de simulação baseada em RV é importante para permitir o aumento do aprendizado proporcionado ao usuário [4].

Os principais problemas associados às metodologias de avaliação *online* aplicadas a sistemas de RV são a complexidade, a acurácia e a eficiência. Uma ferramenta de avaliação *online* exige, pela sua natureza matemática e estatística, a resolução de cálculos que podem aumentar a complexidade computacional do sistema. Esta complexidade deve ser tratada a fim de não comprometer o desempenho do sistema de simulação, mas também deve permitir que o avaliador seja acurado para não comprometer a avaliação do usuário [10].

Neste trabalho, realiza-se um estudo acerca dos conceitos básicos e da importância do monitoramento e da avaliação das ações do usuário no contexto das simulações virtuais voltadas para ensino e treinamento. Detalha-se ainda a implementação, integração e realização de testes de um método de avaliação baseado em lógica *fuzzy* a um conjunto de bibliotecas livres voltado para o auxílio do desenvolvimento de aplicações de RV para ensino e treinamento de medicina. Tal ferramenta adquire relevância visto que introduz uma funcionalidade interessante (a avaliação das ações do usuário) no contexto das simulações por realidade virtual, fundamental no contexto das

simulações de procedimentos médicos e que foi desenvolvida para ser uma ferramenta livre e de código aberto.

## 2. Simulação por RV e treinamento em procedimentos médicos

A natureza imersiva, interativa e multisensorial das aplicações de RV, fez com que pesquisas fossem desenvolvidas para criar ambientes virtuais de simulação para recriar situações reais, com finalidades maiores que apenas o entretenimento, como ensino e treinamento de procedimentos difíceis ou arriscados [11].

No contexto da medicina, as vantagens da utilização de sistemas de simulação por RV incluem: a melhoria do treinamento médico, onde os erros iniciais passam a ser realizados nos modelos virtuais antes que em pacientes reais, além de fornecer possibilidade de treinamento de casos raros e não usuais; a possibilidade da criação de tarefas e cenários por demanda; a repetição no treinamento das perícias e a utilização de procedimentos de certificação mais realista, utilizando medidas objetivas de avaliação das habilidades do usuário na realização dos procedimentos médicos [12].

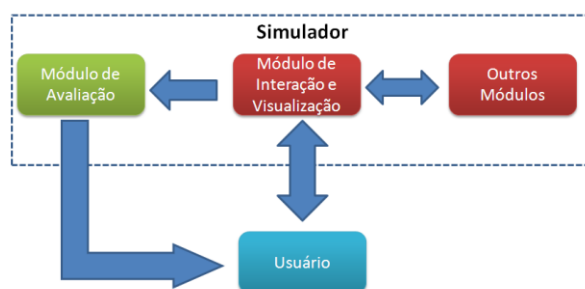
### 2.1. Avaliação das ações do usuário em simulações por RV

Em um treinamento simulado por RV é importante avaliar as ações do usuário para precisar a correção da interação feita pelo usuário na realização da operação. Como várias tarefas simuladas são complexas, suas simulações não podem ser classificadas simplesmente como “boas” ou “ruins”. Desta forma, a existência de uma ferramenta de avaliação do treinamento do usuário incorporada em um simulador é importante para prover uma melhora no aprendizado e na avaliação do usuário [8].

A construção de um modelo de avaliação é realizada a partir do conhecimento de especialistas e modelada por regras ou dados. Com isso, durante a simulação o módulo de avaliação captura dados da interação do usuário e verifica sua adequação ao modelo, fornecendo informações que visam auxiliar a compreensão do comportamento do usuário na realização do procedimento no simulador [4, 5].

Na Figura 1 pode-se observar a estrutura de um simulador capaz de realizar a avaliação das ações do usuário. A partir da interação entre o usuário e o módulo de visualização e interação, dados como movimentos espaciais, forças aplicadas, ângulos, posição e torque são passados ao módulo avaliador que

coleta, organiza e analisa estes dados, retornando para o usuário, ao final da interação, informações relevantes acerca de sua interação.



**Figura 1 – Estrutura de um simulador composto de um módulo de avaliação das ações do usuário.**

Um simulador para treinamento baseado em RV e seu sistema de avaliação são entidades independentes que trabalham simultaneamente. Neste sentido, o desempenho geral da simulação deve ser pensado de forma a ser possível que o sistema completo da simulação funcione em tempo real. Os sistemas de avaliação devem obedecer à importante restrição de não comprometer a interatividade e o realismo da simulação [13].

A pesquisa por sistemas de avaliação para treinamentos complexos, nos quais é necessário o monitoramento de um grande número de variáveis simultaneamente, é dependente de quatro fatores: a) complexidade computacional do meio virtual; b) complexidade computacional do método de avaliação; c) acurácia do método, uma vez validado seus modelos para problemas específicos e d) o sistema computacional disponível para executar o meio virtual para treinamento e o subsistema de avaliação. O equilíbrio desses quatro fatores não é de fácil solução. Meios de simulação com alto grau de realismo demandam tanto altos custos computacionais, tanto quanto interação com dispositivos hápticos, detecção de colisão e utilização de modelos deformáveis. Tais requisitos têm prioridade superior em relação a outros subsistemas, como a avaliação. A solução é a utilização de métodos de baixo custo computacional para a avaliação [13].

## 2.2. Avaliação em simuladores de procedimentos médicos

A realização da avaliação da interação do usuário em simuladores de procedimentos médicos encontra-se em estágio de desenvolvimento. Na última década podem ser encontrados na literatura alguns trabalhos com este intuito. Em [6] foram realizadas avaliações

sobre o treinamento dos usuários no simulador *Minimally Invasive Surgical Trainer – Virtual Reality (MIST-VR)*. O mesmo é um simulador laparoscópico que utiliza gráficos abstratos para a realização de treinamento de habilidades ortopédicas, cardiotorácicas e ginecológicas. Ele tem a funcionalidade de fornecer avaliação *online* informando ao usuário o tempo de execução da tarefa, número de erros realizados e a economia de movimento na realização do procedimento. Em [7] foi sugerida a utilização de regressão estatística linear para avaliar o progresso de um usuário em uma cirurgia óssea. Em [14] foi proposta uma metodologia para avaliar automaticamente o progresso de um usuário em um sistema virtual de simulação de coleta de medula óssea.

## 3. Avaliação no CyberMed

O *framework* CyberMed foi desenvolvido para facilitar o processo de desenvolvimento de simuladores de RV com propósitos médicos. Ele é composto por um conjunto de classes que provêm funcionalidades necessárias na criação de um simulador por RV e também provê suporte para vários dispositivos. Tais características fornecem ao programador um sistema de alto nível que dispensa a demanda por conhecimentos específicos sobre dispositivos e suas APIs (*Application Programming Interfaces*) de programação [15].

A versão atual do *framework* possui módulos que oferecem suporte à visualização monoscópica e estereoscópica por multiplexação espectral, temporal e polarizada, além de oferecer suporte à interação háptica, detecção de colisão, deformação das malhas, rastreamento de movimentos, colaboração entre usuários e avaliação das ações do usuário. Os detalhes de implementação de cada módulo são totalmente transparentes aos usuários, entretanto o sistema é flexível o suficiente para permitir o acesso de baixo nível a programadores experientes ou de alto nível a programadores iniciantes. Um diagrama dos módulos do CyberMed pode ser visto na Figura 2.

O módulo responsável por realizar a avaliação das ações do usuário é o módulo *Assess* (em destaque na Figura 2). Este módulo realiza a separação da coleta e avaliação dos dados em uma *thread* concorrente à de visualização, a fim de não comprometer o requisito de tempo real necessário para o sucesso da simulação. Ele ainda possui implementação de dois avaliadores baseados em Máxima Verossimilhança e redes Bayesianas e define uma interface comum que deve ser adotada para a inclusão de novos métodos de avaliação.



**Figura 2 - Estrutura de módulos do CyberMed com destaque para o módulo Assess responsável por realizar a avaliação das ações do usuário. Adaptado de [15].**

### 3.1 Avaliação baseada em lógica *fuzzy*

No contexto das aplicações de simulações por RV de procedimentos médicos, a representação de conceitos imprecisos e a possibilidade da inclusão da experiência humana são fatores que acrescentam relevância a esses simuladores, tornando possível a avaliação da interação do usuário em relação à realização do procedimento de um profissional experiente.

A lógica *fuzzy* (também conhecida como nebulosa ou difusa) representa um esquema de traduzir informações vagas e imprecisas em valores numéricos. Ela possibilita a inclusão da experiência humana em controle computadorizado, tornando possíveis decisões em problemas complexos. O seu sucesso mundial em sistemas de modelagem e controle aplicados na indústria recomenda a lógica *fuzzy* como uma ferramenta eficiente na engenharia de controle industrial, manufatura, comunicações homem-máquina e sistemas de tomada de decisão [16].

No caso da avaliação, o uso da lógica *fuzzy* permite, além da avaliação em si, também a retirada de conclusões acerca das possíveis falhas e imprecisões do usuário.

A lógica *fuzzy* difere dos sistemas de lógica clássica em seu mapeamento de verdadeiro e falso. Nos sistemas lógicos binários o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro ou falso, enquanto na lógica *fuzzy* o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto *fuzzy* (por exemplo: baixo, médio e alto) de qualquer conjunto parcialmente ordenado.

Na Teoria dos Conjuntos Clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não. Logo, dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , a função de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto clássico  $A$  que está contido em  $U$  é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Um conjunto *fuzzy* pode ser visto como uma representação de um conjunto na Teoria dos Conjuntos Clássica, do qual só tem-se um conhecimento imperfeito. Nesse caso, a pertinência de um elemento a um conjunto é dada não mais por um valor em  $\{0,1\}$ , mas por um valor qualquer no intervalo  $[0,1]$ , isto é, a pertinência de um elemento a um conjunto pode ser parcial [17]. Dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , a função de pertinência  $\mu_F(x)$  com respeito a um conjunto *fuzzy*  $F$  que está contido em  $U$  é da forma:

$$\mu_F(x): U \rightarrow [0,1]$$

Na lógica *fuzzy*, os valores verdade são expressos lingüisticamente, (ex: verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso,...), onde cada termo lingüístico é interpretado como um subconjunto *fuzzy* do intervalo unitário [26]. A questão está na rigidez da lógica convencional que, sendo dicotômica, não permite classificar os fatos como parcialmente “verdadeiros” ou parcialmente “falsos”. Em resumo, a lógica *fuzzy* buscou uma generalização da lógica clássica, flexibilizando-a no intervalo  $[0,1]$ . Portanto, a implementação de um projeto de sistemas de controle *fuzzy* pode ser reduzida a um ponto em que problemas anteriormente intratáveis passam agora a ser factíveis a uma solução.

A forma de expressar o conhecimento em um sistema *fuzzy* é tipicamente com regras do tipo *condição –ação*. De forma genérica, uma regra *fuzzy* é do tipo:

**SE** ( $x$  é  $ai$ ) **E** ( $y$  é  $bi$ ) **OU** ... **ENTÃO** ( $z$  é  $ci$ ) ( $w$  é  $di$ )...

onde  $x$  e  $y$  são variáveis lingüísticas de entrada,  $z$  e  $w$  são variáveis lingüísticas de saída e  $ai$ ,  $bi$ ,  $ci$  e  $di$  são realizações dessas variáveis, medidas na interação do usuário com o sistema.

**3.1.1. Sistema Especialista.** A idéia básica em um Sistema Especialista (SE) é modelar as ações a partir de conhecimento especialista. Esta abordagem é diferente dos métodos convencionais de controle de processos, onde os mesmos são desenvolvidos via modelagem matemática. Uma estrutura de um SE genérico *fuzzy* foi proposta por Mandani e pode ser vista na Figura 3.

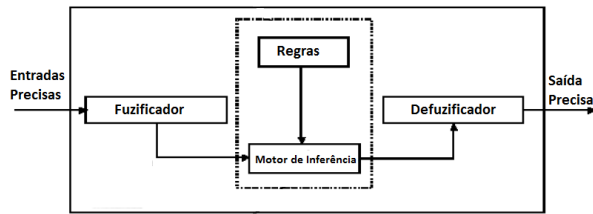


Figura 3. Estrutura de um SE genérico *fuzzy* [18].

Os componentes básicos do SE genérico *fuzzy* são:

#### a) Interface de Fuzzificação

Os valores das variáveis de entrada passam por um processo denominado *fuzzificação*, onde são os números são transformados em instâncias de variáveis lingüísticas.

#### b) Base de Conhecimento.

Em geral, algumas dificuldades encontradas no projeto de sistemas especialistas consistem na especificação da base de conhecimento [18]. A especificação desta base, que contém informações sobre regras e variáveis, pode ser obtida de diferentes maneiras, como: baseando-se na experiência e conhecimento de especialistas, a partir da descrição lingüísticas das características dinâmicas do processo ou através da implementação de algoritmos de aprendizagem.

#### c) Procedimento de Inferência

Processa os dados *fuzzy* de entrada, junto com as regras, de modo a inferir os conjuntos fuzzy de saída, aplicando o operador de implicação e as regras de inferência da lógica *fuzzy*.

#### d) Interface de Defuzzificação

Transforma os conjuntos *fuzzy* inferidos em dados precisos. Efetua um escalonamento, de modo a compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores dos universos de discurso reais das variáveis.

### 3.2 Implementação do módulo de avaliação baseada em lógica *fuzzy*

É sabido que há pacotes de *software* que incluem funcionalidades relacionadas à lógica *fuzzy*, como: o MatLab[19], o SciLab[20], o FFLL[21] e o JFuzzyLogic[22]. No entanto, todos estes têm

características que impossibilitavam sua utilização no contexto deste trabalho. O MatLab é um *software* proprietário, o FFLL foi descontinuado em 2003, o JFuzzyLogic é implementado em Java (o que requereria um esforço extra para integrá-lo ao CyberMed) e o SciLab é um pacote muito extenso, cujas funcionalidades extrapolam as necessidades deste trabalho, e que precisaria ser estudado a fundo para ser integrado ao CyberMed.

Desta forma, a solução tomada foi a construção de um módulo que atendesse completamente às necessidades do CyberMed. Neste contexto, foi desenvolvido um arcabouço para a construção de sistemas especialistas *fuzzy*, utilizando a linguagem C++, que provê suporte à definição de variáveis lingüísticas e à elaboração de um conjunto de regras *fuzzy* que vão atuar sobre essas variáveis.

O fato de ser a linguagem nativa do CyberMed foi o fator principal para a escolha da linguagem C++ para a implementação do módulo *fuzzy*. Outro aspecto importante do C++ é o fato de que sua aritmética de ponteiros e otimizações matemáticas permitem a construção de um avaliador computacionalmente eficiente. Tal eficiência é um requisito primordial, já que a avaliação será feita de forma *online* à execução da aplicação tridimensional, logo ela tem de atender os requisitos de eficiência do sistema.

Pode-se observar na Figura 4 um diagrama simplificado dos pacotes do módulo implementado. Neste diagrama é apresentada a classe principal (*FunctionBlock*). Esta classe possui a implementação de métodos genéricos, que deverão ser utilizados pelo usuário para a definição das variáveis lingüísticas, das regras que irão atuar sobre elas e do método de *defuzzificação* utilizado. Desta forma o usuário deve apenas manipular a classe *FunctionBlock*, que servirá de fachada para os métodos implementados nos módulos *membership*, *rule* e *defuzzifier*.

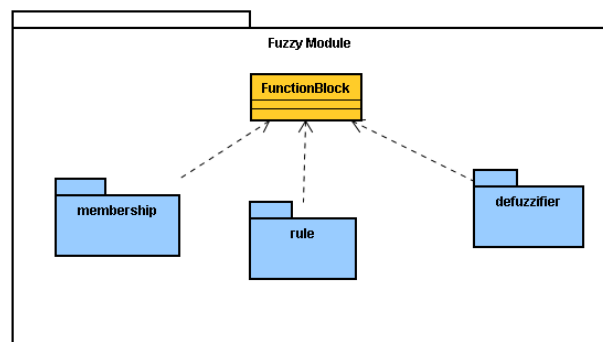


Figura 4 - Diagrama simplificado dos pacotes do módulo de avaliação baseado em lógica *fuzzy*.

### 3.3 Integração do módulo de avaliação baseada em lógica *fuzzy* com o CyberMed

O módulo de avaliação (*Assess*) integrado ao CyberMed segue um padrão que deve ser observado na incorporação de novos métodos de avaliação ao CyberMed. Tal padrão é estabelecido pela definição de uma interface comum entre os vários métodos de avaliação implementados no *framework* e pela definição de uma forma padronizada de realizar a saída e entrada dos dados no módulo de avaliação.

Na implementação foram concebidas duas classes (*CybFuzzyLogic* e *CybFuzzyIO*) para fazerem a ligação entre o módulo de lógica *fuzzy* com o módulo de avaliação do CyberMed (Figura 5). A classe *CybFuzzyIO* controla a entrada e saída de dados do avaliador, além de definir os métodos para persistir e recuperar os dados da avaliação. A classe *CybFuzzyLogic* define os métodos para realizar a avaliação dos dados, observando o padrão de *multithreading* do módulo *Assess* e realiza a ligação entre os dados que serão captados pelo CyberMed e transmitidos para o sistema especialista *fuzzy*.

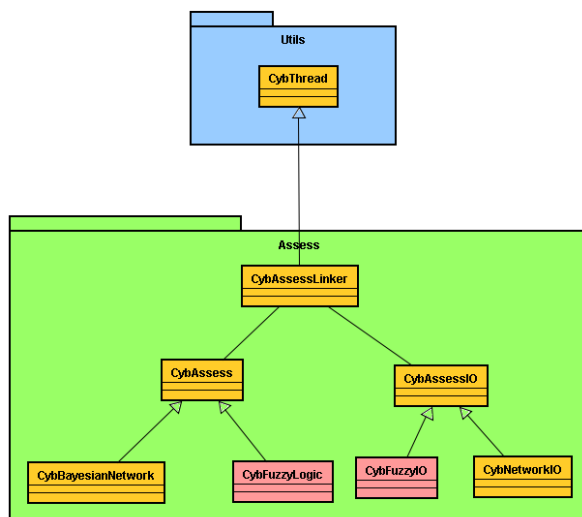


Figura 5 - Diagrama de classes do módulo *Assess*, com destaque para as classes adicionadas.

## 4. Testes

Com o intuito de validar o módulo implementado, foi elaborado um conjunto de testes utilizando valores aleatórios para aferir sua validade. Isto significa que os testes não foram realizados integrados ao CyberMed, mas que o módulo foi utilizado de forma independente.

Baseando-se no trabalho de [23], que propôs o uso de sistemas especialistas baseados em regras *fuzzy*

como ferramenta de avaliação em um simulador de exame ginecológico, modelou-se um sistema especialista com conjuntos e regras determinados por dados extraídos do conhecimento de um especialista na realização do exame ginecológico real. Uma vez que o sistema especialista foi definido, foram geradas estatisticamente amostras aleatórias sobre os possíveis valores de entrada e seus respectivos valores esperados de saída. De posse desses dados, executou-se o sistema, comparando a saída obtida pelo sistema com a saída esperada pelos dados estatísticos. Os detalhes neste processo e a análise dos seus resultados podem ser observados nas seções seguintes.

### 4.1 Estudo de caso: Simulador de exame ginecológico

O estudo de caso proposto foi utilizado para demonstrar a criação de um sistema especialista para realizar a avaliação do usuário na realização de um exame ginecológico simulado virtualmente. O simulador de exame ginecológico SITEG, foi criado para oferecer treinamento a estudantes de medicina na realização deste procedimento [24]. A simulação prevê ao usuário as duas fases da realização do exame ginecológico. A primeira, na qual o aluno observa as estruturas internas do aparelho ginecológico da paciente com a utilização de um aparelho denominado espêculo. A segunda fase corresponde à inspeção tátil, na qual o aluno introduz o dedo na vagina da paciente para retirar informações táteis das estruturas internas, como a presença de úlceras, bolhas, inchaços ou corrimentos.

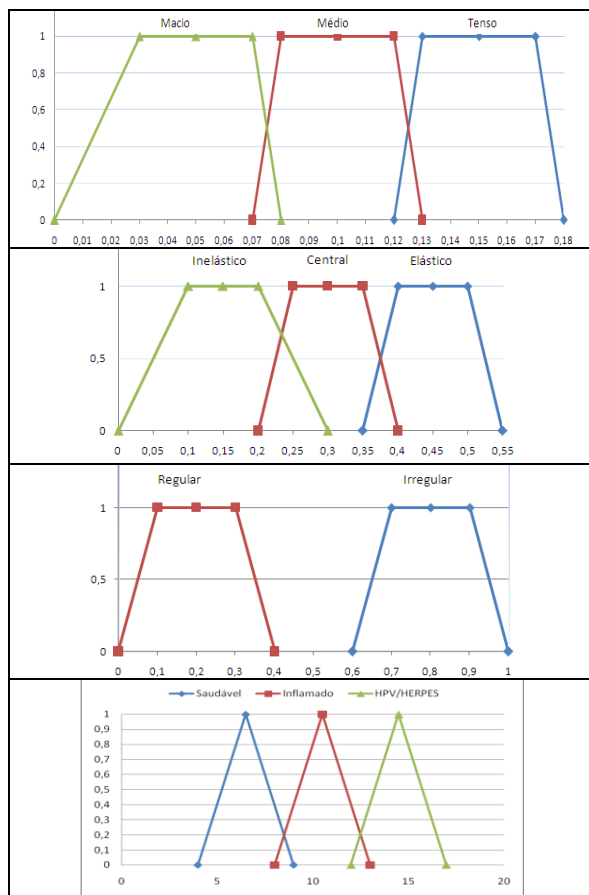
A segunda fase do exame (fase tátil) foi simulada mediante a utilização do dispositivo háptico Phantom Omni, que opera movimentos com seis graus de liberdade e prevê retorno de força, para dar ao usuário as sensações táteis sentidas durante o exame tátil das estruturas do corpo da paciente. Neste ponto, a definição das propriedades hápticas adequadas foi feita por um profissional da medicina que, baseado na sua experiência, descreveu as propriedades hápticas das paredes da vagina e do colo do útero em casos saudáveis, com Herpes, HPV ou inflamações. As informações foram refinadas e organizadas de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1 – Descrição das propriedades hápticas e visuais das estruturas examinadas no exame ginecológico [23].**

	Coloração	Textura	Viscosidade	Elasticidade
<b>Normal</b>	Róseo	Similar à mucosa bucal	Suave	Similar a uma borracha ortopédica
<b>Herpes /HPV</b>	Branco com verrugas	Esponjoso e irregular	Com bolhas	Muito Macio
<b>Inflamado</b>	Vermelho	Similar à mucosa bucal	Suave	Duro/Tenso

### 4.2 Definição do Sistema Especialista

Com os dados descritos na seção 4.1, foi possível a modelagem de um sistema especialista com conjuntos e regras determinados pelo conhecimento do especialista na realização do exame ginecológico real. Pode-se observar na Figura 6 a representação dos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis linguísticas de entrada (rigidez, elasticidade e fricção) e de saída (diagnóstico) do sistema.



**Figura 6 – Representação das variáveis linguísticas: a) rigidez, b) elasticidade, c) fricção e d) diagnóstico.**

Sobre esses conjuntos *fuzzy* foram definidas regras, tal como:

IF rigidez IS macio AND elasticidade IS inelastico AND friccao IS irregular THEN diagnostico IS hpv/herpes;

### 4.3 Geração das amostras estatísticas

Para cada regra definida no SE, foram gerados quatro conjuntos de amostras que representam as variáveis de entrada (rigidez, elasticidade e textura do colo do útero) e a variável de saída (diagnóstico). Cada amostra gerada foi composta de 15000 elementos por amostra dos quais foram excluídos 3000 elementos devido à flutuabilidade estatística do gerador de amostras aleatórias.

As amostras geradas possuem distribuição normal multivariada onde, sendo X um vetor aleatório, a sua função de densidade da distribuição normal multivariada é dada por:

$$f_X(x) = (2\pi)^{-\frac{p}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu) \right\}$$

em que  $\mu$  e  $\Sigma$  são, respectivamente, o vetor de média e a matriz de covariâncias, simétrica e positiva definida, e p é a dimensão do vetor aleatório X [25].

### 4.4 Resultados Obtidos

Na Tabela 2 pode-se observar o desempenho do avaliador em testes realizados com as amostras detalhadas na seção 4.3. Os testes foram realizados em uma máquina com processador INTEL core-2-duo 800 MHz e 4GB de memória RAM. A análise da Tabela 2 permite observar que o avaliador implementado teve resultados satisfatórios, com um acerto médio de 96,5%.

**Tabela 2 – Tabela de acertos produzidos pelo módulo de avaliação.**

Regras	Nº de Acertos	Acerto (%)
1	11314	94,3%
2	11594	96,6%
3	11840	98,6%

Uma taxa de erro médio de aproximadamente 3,5% indica que em um conjunto de 12000 amostras o avaliador errou a classificação de 420 amostras. Esse valor é considerado aceitável e pode ser diminuído através da criação de mais regras e variáveis

linguísticas para o detalhamento dos casos onde o diagnóstico pode ser duvidoso.

## 5. Conclusão

A avaliação das ações do usuário é um requisito fundamental na construção de ambientes virtuais para ensino e treinamento, pois permitem avaliar, classificar ou mesmo certificar o nível de conhecimento ou habilidade do usuário.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um módulo baseado em lógica *fuzzy* para avaliação online em sistemas de realidade virtual. O módulo foi concebido para um *framework* para desenvolvimento de ambientes virtuais chamado CyberMed, e integrado a um módulo de avaliação genérico pré-existente no *framework*.

A fim de comprovar a acurácia e possibilidade da real utilização do módulo de avaliação implementado foram realizados testes com amostras geradas aleatoriamente, que comprovaram sua validade. A próxima versão do *framework* CyberMed, que contém o módulo citado neste trabalho, encontra-se em fase de finalização. A versão estável 1.6 do CyberMed encontra-se disponível para *download* em <http://cybermed.sourceforge.net/>.

## 6. Referências

- [1] G. C. Burdea e P. Coiffet, “*Virtual Reality Technology*” Ed. Wiley-Interscience, 2ª edição, 2003.
- [2] T.M. Krummel, “Surgical simulation and virtual reality: the coming revolution”, *Annals of Surgery*, Vol. 228, No. 5, 1998, pp. 635-637.
- [3] M. Harders, *Surgical Scene Generation for Virtual Reality-Based Training in Medicine*, Ed. Springer, Londres, 2008.
- [4] L. S. Machado, R.M. Moraes et. al., “A Fuzzy Rule-Based Evaluation for a Haptic and Stereo Simulator for Bone Marrow Harvest for Transplant”, *Proceedings of Phantom Users Group Workshop*, 2000.
- [5] C. Sharabi et. al., “Immersidata Analysis: Four Case Studies”, *IEEE Computer*, Vol. 40, No. 7, 2007, pp. 45-52.
- [6] P.H. Cosman, J.M. Christopher e J.A. Cartmill, “Virtual Reality Simulators: Current Status in Acquisition and Assessment of Surgical Skills” *ANZ Journal of Surgery*, Vol. 73, No. 3, 2002, pp. 30-34;
- [7] D. Morris, C. Sewell, F. Barbagli et. al., “Visuohaptic simulation of bone surgery for training and evaluation”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 26, No. 6, 2006, pp. 48-57.
- [8] M. Färber et. al., “Heinz Handels Training and evaluation of lumbar punctures in a VR-environment using a 6DOF haptic device” *Studies in Health Technologies: Medicine Meets Virtual Reality 16*, 2008, pp. 112-114.
- [9] R.M. Moraes, L.S. Machado, “Hidden Markov Models for Learning Evaluation in Virtual Reality Simulators”, *Proceedings of IASTED’2002 International Conference on Computers and Advanced Technology in Education*, 2002, pp. 405-409.
- [10] R.M. Moraes e L.S. Machado, “Another Approach for Fuzzy Naive Bayes Applied on Online Training Assessment in Virtual Reality Simulators” *Proceedings of Safety Health and Environmental World Congress 2009 (SHEWC’2009)*, 2009, pp. 62-66.
- [11] L. Rosenblum, G. Burdea, S. Tachi, “VR Reborn”. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 6, 1998, pp. 21-23.
- [12] R. M. Satava, A.G. Gallagher e C.A. Pellegrini, “Surgical competence and surgical proficiency: definitions, taxonomy, and metrics”, *Journal of the American College of Surgeons*, Vol. 196, No. 6, 2003, pp. 933-937.
- [13] R.M. Moraes e L.S. Machado, “Online Training Evaluation in Virtual Reality Simulators Using Possibilistic Networks.” *Proceedings of Safety Health and Environmental World Congress 2009 (SHEWC’2009)*, 2009, pp. 67-71.
- [14] R.M. Moraes, L.S. Machado, “Continuous Evaluation in Training Systems Based on Virtual Reality”, *Proceedings of Global Congress on Engineering and Technology Education (GCETE’2005)*, 2005, pp.1048-1051.
- [15] L.S. Machado, R.M. Moraes, D.F.L. Souza, L.C. Souza e I.L.L. Cunha, “A Framework for Development of Virtual Reality-Based Training Simulators” *Studies in Health Technologies: Medicine Meets Virtual Reality 17*, 2009, pp. 174-176.
- [16] A. L. Pagliosa, “Obtenção das funções de pertinência de um sistema neurofuzzy modificado pela rede de Kohonen”, *Tese de Mestrado*, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003.
- [17] R.M. Moraes, “Uma arquitetura de sistemas especialistas nebulosos para classificação de imagens utilizando operadores da morfologia matemática”, *Tese de Doutorado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- [18] F. S. M. Nobre e Á. G. B. Palhares, “Informações Quantitativas e Qualitativas no Projeto de Controladores Nebulosos”, *Controle & Automação*, Vol.8, No 2, 1997.



- [19] Mathworks, MatLab. Online:  
<http://www.mathworks.com/products/matlab/>  
Acessado em: 01/2010
- [20] SciLab. Online: <http://www.scilab.org/>  
Acessado em: 01/2010
- [21] Free Fuzzy Logic Library. Online:  
<http://ffll.sourceforge.net/>  
Acessado em: 01/2010
- [22] JFuzzyLogic. Online:  
<http://jfuzzylogic.sourceforge.net/html/index.html>  
Acessado em: 01/2010
- [23] L. S. Machado, M.C.O. Valdek e R.M. Moraes, "Assessment of Gynecological Procedures in a Simulator Based on Virtual Reality", *Proceedings of 7th International FLINS Conference on Applied Artificial Intelligence*, 2006, pp. 799-804.
- [24] L. S. Machado e R.M. Moraes, "VR-Based Simulation for the Learning of Gynaecological Examination", *Lecture Notes in Computer Science*, Ed. Springer, Vol. 4282, 2006, pp. 97-104.
- [25] R.A. Johnson e D.W. Wichern, *Applied multivariate statistical analysis*, Ed. Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [26] F. A. C. Gomide e R. R. Gudwin, "Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Difusa", *Controle & Automação*, Vol. 4, No. 3, 1994, pp. 97-115.