
Sistemas de Realidade Virtual para Simulação de Equipamentos de Movimentação e Treinamento de Operadores

Roberto Spinola Barbosa¹, Fuad Kassab Junior², Kazuo Nishimoto³, Linilson Rodrigues Padovese⁴, Ricardo Paulino Marques⁵ e Denis Taniguchi⁶

¹²³⁴⁵⁶ *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, CEP.: 05508-970, São Paulo, SP*

e-mail: 1º autor: spinola@usp.br, 2º autor: fuad@lac.usp.br, 3º autor: knishimo@usp.br, 4º autor: lrpadove@usp.br, 5º autor: rpm@lac.usp.br, 6º autor: taniguchi@tpn.usp.br

Resumo: A utilização de sistemas de realidade virtual para simulação é uma ferramenta que permite aumentar a produtividade dos processos de movimentação e transporte de materiais. Neste ambiente o comportamento dinâmico do equipamento de movimentação é simulado em tempo real, permitindo o treinamento do operador aumentando sua eficiência. Os sistemas de realidade virtual para simulação de equipamentos de movimentação e treinamento de operadores, possuem computadores trabalhando interconectados em uma arquitetura de rede permitindo aumentar a capacidade de processamento e maximizando a eficiência da troca de informações entre módulos do sistema, e constitui-se em uma base completa para emular todos os aspectos operacionais do sistema através de consoles, painéis e displays de computadores. Dependendo do tipo de aplicação o sistema pode conter o modelo dinâmico do sistema e seus sub-sistemas de acionamento, movimentação e interação. A movimentação, sonorização e visualização do ambiente devem permitir a imersão total do usuário e a maior proximidade com a realidade. Todas estas funcionalidades devem ser calculadas em tempo real durante a simulação o que exige uma elevada capacidade de computação. Desenvolvimentos desta natureza permitem a consolidação do conhecimento do equipamento e atendem as necessidades da indústria e operadoras na gestão do conhecimento técnico de sistemas de movimentação, constituindo uma ferramenta virtual de treinamento de operadores buscando o aumento do desempenho. O processo de desenvolvimento e inovação de sistemas de realidade virtual consolida e aprimora o conhecimento sensível a esta especialidade, permitindo atingir e competência científica necessária para o domínio da técnica. Desta forma empresas que procuram a eficiência na produção podem se beneficiar desta tecnologia na busca excelência de operação.

Palavras-Chaves: simulador, dinâmica, realidade virtual

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de aumentar a eficiência do processo de produção, movimentação e transporte de materiais é através da utilização de sistemas de realidade virtual para simulação e treinamento. Neste ambiente o comportamento dinâmico do equipamento de movimentação é simulado em tempo real e interfaces homem/máquina permitem o treinamento do operador. A VALE tem liderado

o processo de desenvolvimento nacional destas aplicações através da parceria de cooperação científica e tecnológica com a Universidade de São Paulo (USP). Investimentos em pesquisa estão permitindo a apropriação do conhecimento sensível ao processo aumentando a sua competência para assumir o papel de excelência mundial em eficiência na produção, transporte e exportação de minério. Como empresa líder nacional e internacional em produtividade vislumbrou a necessidade de estimular a

pesquisa e o desenvolvimento das ferramentas de engenharia para a criação de sistemas de realidade virtual para simulação das diversas etapas da sua cadeia produtiva. Um exemplo desta meta é o desenvolvimento do Simulador de Realidade Virtual para emular o comportamento do trem para efeito de treinamento de maquinistas.

2 METODOLOGIA

Os sistemas de realidade virtual para simulação de equipamentos de movimentação e treinamento de operadores, são concebidos com uma arquitetura de computadores trabalhando interconectados em rede. Esta estrutura permite aumentar a capacidade de processamento e maximizar a eficiência da troca de informações entre módulos do sistema e constitui-se em uma base completa para emular todos os aspectos operacionais do sistema através de consoles, painéis e displays de computadores.

Em geral o sistema simulação deve conter o modelo dinâmico do equipamento de movimentação e seus sub-sistemas de acionamento, e interação (locomotiva, caminhões, escavadeiras, embarcações, sistemas de propulsão e freio, via férrea, estrada, relevo da mina, sinalização, controle e operação, etc.). A movimentação do usuário, sonorização e visualização do ambiente devem permitir a imersão total e a melhor proximidade com a realidade. Todas estas funcionalidades devem ser calculadas em tempo real durante a simulação o que exige uma elevada capacidade de computação.

Uma das vantagens do uso do simulador é a disponibilidade de ferramentas de análise que permitem ao instrutor avaliar o desempenho do aluno e atuar diretamente na correção da inabilidade na operação para garantir o domínio adequado do equipamento, na busca da eficiência da produtividade da operação.

Outra grande vantagem é a possibilidade de realizar o treinamento do operador em condições adversas. Danificação do equipamento durante a uso ou insegurança de operação, são fenômenos indesejáveis com custo material e humano que pode ser considerável. Neste sentido o treinamento do

operador para atuar adequadamente durante um mau funcionamento ou pane do equipamento ou mesmo na iminência de um acidente, pode ser realizado sem de fato produzir o risco garantindo um treinamento com segurança poupando tempo e recursos.

Somente na EFVM, a VALE possui cerca de 3000 maquinistas que conduzem mais de 1000 locomotivas em trens extra-pesados, ao longo da sua malha de transporte. Possui ainda cerca de 350 condutores para operar 110 caminhões *off-road* de mina de Carajás, entre outros equipamentos de movimentação. Este grupo de operadores necessita de treinamento e atualização regular, exigindo, portanto recursos de simulação compatíveis com a magnitude de sua estrutura operacional.

3 O SIMULADOR DE TREM

Um dos exemplos de sistemas de realidade virtual é o simulador de trem. Trata-se um sistema de realidade virtual para emular o comportamento do trem com a finalidade de propiciar uma ferramenta prática, confiável e otimizada para o treinamento de maquinistas. O simulador desenvolvido reproduz com fidedignidade todos os sistemas que formam o trem. Os elementos que constituem o sistema vão desde a formação do trem (quadro de tração e peso bruto), escolha da locomotiva (modelo, potência, freio dinâmico e independente), dinâmica de vagões, sistema de freio pneumático, geometria da via férrea, até a visualização do ambiente e suas variações (dia com sol, chuva, neblina, noite, etc.) contendo a topografia do terreno e sons locais.



Figura 1 – Imagem do simulador de trem

O sistema é capaz de simular a condução normal de um trem ou reproduzir as condições adversas de operação. É constituído por interfaces amigáveis que permitem a fácil configuração do trem e do cenário, emulando condições de degradação dos equipamentos e permitindo a avaliação do desempenho do treinando através de relatórios com pontuação.



Figura 2 – Visão do maquinista

3.1 A arquitetura

O simulador de trem é composto por até 24 estações de treinamento, cada uma capaz de emular todos os aspectos funcionais pertinentes do trem, tais como são percebidos pelo maquinista. Um console reproduz os controles e painéis e displays de computador representam os mostradores existentes na locomotiva. Adicionalmente, parâmetros calculados durante a simulação são apresentados em tempo real ao usuário (por exemplo, força nos engates) constituindo uma função de realidade aumentada. Esta característica permite ao instrutor parar a simulação e mostrar ao maquinista os efeitos benéficos ou maléficos causados por um determinado comando realizado. Finalmente uma visualização virtual da geometria da via, e da topografia do entorno é gerada em um dos computadores da rede. A Figura 3 apresenta um esquema de uma estação típica nn (onde nn pode variar de 1 a 24).

Conforme mostrado na figura, o computador SInn é responsável pela simulação dinâmica do trem e pelo gerenciamento da comunicação entre os diferentes módulos. O computador VInn é responsável pela visualização digital 3D, e os painéis P1nn,

P2nn e PSnn complementam a interface com o operador. O módulo CSnn é responsável pela interface com os controles físicos emulados no console, tais como alavancas de tração, de freio, manetes, chaves, etc.

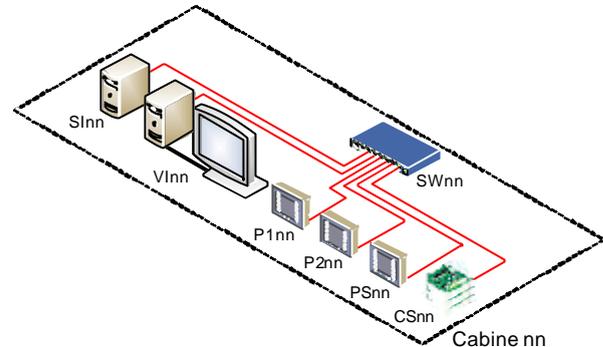


Figura 3 - Estação de simulação

Além das estações de simulação o sistema também comporta até 10 estações de configuração e supervisão, que servem tanto para a configuração das composições e da via como para monitoração e interação entre instrutores e maquinistas nas estações de simulação. A Figura 4 apresenta uma estação típica m (onde m pode variar de 1 a 10). Conforme a figura, o terminal SOPm é responsável pela supervisão e configuração, ao passo que o computador SVIm é responsável pela visualização digital, de forma similar a VInn.

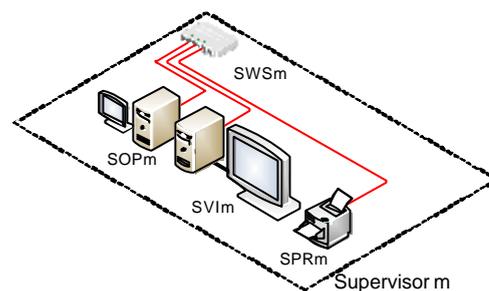


Figura 4 – Estação de supervisão

Além disso, o sistema é composto de dois servidores, um deles (SM00) responsável por uma rede de compartilhamento de estados entre as estações de simulação e outro (SERV), responsável por uma rede de comandos e supervisão, bem como pelo

armazenamento de arquivos e outras tarefas auxiliares.

A rede de compartilhamento, ou memória compartilhada, conecta as estações de simulação ao servidor SM00, e permite que blocos de dados de cada nó sejam compartilhados em tempo real a todos os outros nós da rede. A rede de comandos e supervisão transmite comandos e informações de supervisão, através do servidor SERV entre as estações de simulação e de supervisão, além de distribuir arquivos de dados, de configuração, etc.

Todos os equipamentos utilizados no simulador são convencionais, com plataformas de ampla utilização no mercado, tais como Computadores PC, Sistemas operacionais *Windows* ou *Linux*, equipamentos convencionais de rede e consoles e display.

3.2 Visualização

A visualização em tempo real durante a simulação é um recurso essencial para garantir a imersão do usuário e uma proximidade maior com a realidade conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5 – Visualização de obra de arte

Para efeito de treinamento deve ser apresentada ao maquinista imagens da via, sua geometria e a sinalização local, necessário para permitir a condução adequada. Além disso, pontos notáveis como início de serra, trecho em curvas, ou estação, que auxiliam o treinando a relacionar posições instantâneas com ações ou comandos do

trem (início de uma frenagem, mudança de ponto de aceleração, etc.) devem ser apresentadas. Com este objetivo o simulador foi desenvolvido em uma base georeferenciada global. Desta forma o relevo topográfico do entorno da ferrovia é importado de fotos de satélite, conforme apresentado na Figura 6 que mostra o vale do Rio Doce. Com isto a flexibilidade do simulador para incorporar outros trajetos pode ser realizada ou atualizada de forma automática.



Figura 6 – Relevo do vale do Rio Doce

Adicionalmente o efeito estereoscópico que permite a visualização de imagem em profundidade também está contemplada havendo ainda a disponibilidade para projeção em 360°. Como exemplo desta recente tecnologia, podemos citar a renderização gráfica das condições ambientais como chuva, neblina e posição variável do sol, bem como os efeitos de iluminação no crepúsculo.



Figura 7 – Efeito do crepúsculo

O sistema de visualização em computação gráfica foi desenvolvido explorando os recentes avanços e potencialidades das

placas gráficas, hoje facilmente encontradas no mercado a custo acessível.

Com estes recursos o simulador de trem possui o mesmo nível de realismo gráfico e visual (ver Figura 8) dos mais sofisticados e avançados simuladores de realidade virtual existentes na atualidade.

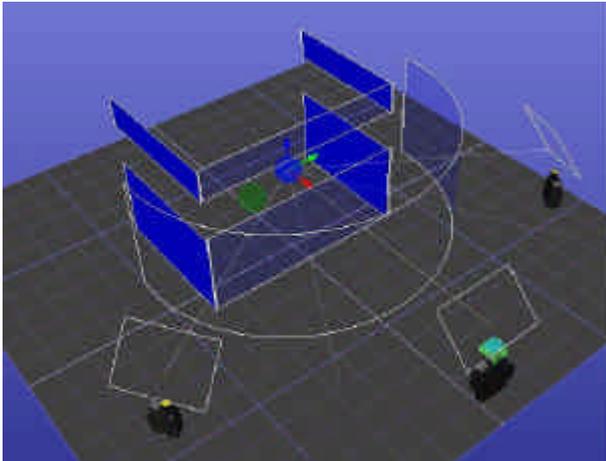


Figura 8 – Cabine 3D com tela de 180°

3.3 Descrição da via

O traçado geométrico da ferrovia é descrito para o simulador através de um arquivo no formato *XML*, um padrão amplamente usado no mercado, compatível com a base georeferenciada global (ver Figura 9). O arquivo permite a apresentação de toda uma malha ferroviária, incluindo desvios (ver Figura 10), sinalizações, elementos da paisagem e obras de arte (pontes, pontes, túneis, estações, etc).



Figura 9 – Traçado da via férrea

Dentro do arquivo de via, o traçado da ferrovia é representado por uma sequência de retas, curvas ou curvas de transição clotóide. Cada um desses segmentos é completamente caracterizado por seus parâmetros de inclinação, superelevação e raio de curvatura. Além disso, para qualquer trecho de ferrovia, pode-se definir parâmetros característicos como bitola, coeficiente de atrito dos trilhos e marcações quilométricas correspondentes ao caso real.



Figura 10 – Desvio ferroviário

Outro recurso do simulador é a geração procedural de trechos da ferrovia (editor de via). Esta ferramenta permite a criação de um trecho parametrizado de via (comprimento, raio de curva, inclinação, etc.) para efeito de treinamento ou mesmo a importação de um arquivo geométrico existente, incorporando automaticamente a paisagem no entorno da linha. A possibilidade de integração georeferenciada do arquivo de via com fotos de satélite é um recurso inédito e inovador do simulador.

3.4 Comunicação

As interfaces de configuração e entrada de dados do simulador foram concebidas no padrão da *web*. Desta forma a configuração ou edição de um cenário de treinamento, pode ser feita de qualquer *browser*. Como decorrência desta filosofia a interação no ambiente do simulador em posto remoto através da internet é natural. Isto permite que o instrutor possa configurar e monitorar um treinamento em local remoto. Esta facilidade é inédita em simuladores ferroviários.

Aspectos importantes como o tempo de percurso, consumo de combustível, choques de força de tração/compressão em engates, índice de segurança contra o descarrilamento [1] entre outros estarão incorporados no simulador e permitem o estudo de novas configurações de trens, formas de operação e ser utilizado como ferramenta de engenharia.

Pode-se mencionar que neste desenvolvimento, as inovações introduzidas de forma integrada, tornam o simulador de trens um sistema inédito no cenário internacional.

Finalmente este desenvolvimento propicia a VALE a possibilidade de replicação da estrutura de simulação e treinamento em todas as suas dependências ao longo do país, a um custo reduzido.

4 INTERAÇÃO VIRTUAL

Nos sistemas de realidade virtual a interação com o usuário deve ser equivalente à realidade. Desta forma a percepção humana (visão, audição, movimentação, tato, etc.) deve ser estimulada para que os sentidos no ambiente virtual componham para o usuário uma sensação equivalente à real. Neste sentido novos aspectos podem ser desenvolvidos e incorporados neste ambiente

4.1 Movimentação

Um dos aspectos importantes é a movimentação do usuário. Neste sentido o uso de plataforma móvel conduzida pela resposta dinâmica do equipamento de movimentação pode ser utilizado (ver Figura 11). No caso de simuladores de caminhões off-road este tem sido o padrão devido à intensa movimentação durante o tráfego em terrenos irregulares. Sistemas hidráulicos servo-controlados sofisticados tem sido integrado a simuladores. O desafio está no desenvolvimento de um sistema de custo acessível e boa resposta em frequência capaz de atender a demanda específica de cada projeto.



Figura 11 – Sala de projeção 3D com plataforma móvel no centro.

4.2 Condições ambientais

As condições climáticas também podem ser objeto de controle no processo de criação do ambiente virtual. A temperatura, umidade e ventilação são fatores que alteraram o comportamento do ser humano podem causar desconforto ou mesmo a fadiga durante o período de trabalho. Em condições severas de temperatura e umidade pode haver a degradação da resistência resultando em fadiga indesejada.

4.3 Interação e Realimentação

A manipulação de objetos de forma interativa tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento. Atuadores e sensores são utilizados com esta finalidade para a comunicação entre o homem e as máquinas. Alguns tipos de equipamentos dependem da ação precisa de força do operador. É o caso de sistema de direção assistida de veículos. Simuladores deste equipamento exigem a resistência de força de atuação (*feedback*) tornando a resposta dinâmica do equipamento similar ao caso real.

4.4 Realidade aumentada

Outro recurso importante do simulador é a possibilidade de produzir a realidade aumentada. Para a representação adequada

do comportamento do sistema, algoritmos de cálculos são utilizados para determinar forças, posições e velocidades. Desta forma informações não percebidas pelo condutor estão disponíveis e podem ser utilizadas no processo de treinamento. O instrutor pode orientar o treinando sobre os efeitos produzidos pelos comandos realizados. Assim o processo de treinamento fica mais amplo que a própria atuação real.

4.5 Monitoramento de funções vitais

Finalmente o monitoramento de funções vitais do usuário tais como pressão sanguínea, pulsação, estado de atenção, etc, podem ser incorporadas no ambiente de simulação. Em condições adversas a possibilidade de degradação da atenção e concentração pode resultar em comportamento arriscado indesejado e deve ser considerado.

5 OUTROS DESENVOLVIMENTOS

A arquitetura de rede descrita aumenta a capacidade de processamento e permite maximizar a eficiência da troca de informações entre módulos do sistema, e constitui-se numa base completa que permitirá que extensões do simulador possam ser implementadas, tais como:

- Simulação distribuída com integração das estações de simulação, ou seja, que diversas estações compartilhem uma mesma linha, interagindo entre si (*multiplayer*). Desta forma pode-se simular a manobra de acoplamento de locomotiva auxiliar (*helper*), operação seleção de vagões (*ramp yard*), movimentações no pátio, além de trens virtuais, gerados e operados pelo próprio sistema.
- Simulação da dinâmica do vagão completo, incluindo truque e rodeios produzindo informações sobre o comportamento dinâmico com maior riqueza de detalhes.
- Simulação de um Centro de Controle de Operações integrado às estações de

simulação (ver Figura 13). Com essa extensão será possível simular um conjunto de linhas (malha ferroviária) com o tráfego de um conjunto de trens (diversa estações de treinamento) de forma supervisionada e controlada (CCO) Nesse esquema será possível simular de maneira realística a operação de um sistema ferroviário completo.

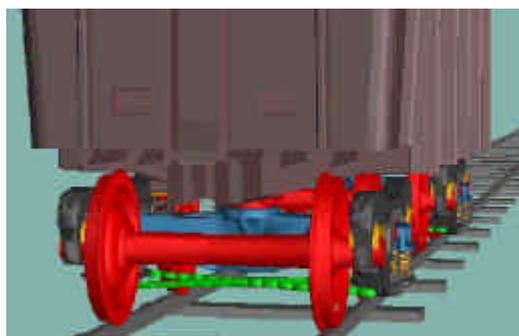


Figura 12 – Vagão completo

- Avaliação de desempenho e eficiência. Dependendo do tipo de operação o consumo de combustível por tonelada transportado pode variar. Adicionalmente as restrições de tráfego podem prejudicar o fluxo dos trens. Desta forma a produtividade e eficiência do sistema ferroviário, poderão ser avaliadas dentro do ambiente virtual de simulação.

Mesmo para um sistema de transporte de massa avançado como o Metrô sem condutor (*driveless*), a ferramenta de simulação é útil. Afinal durante uma pane alguém terá que operar o sistema no modo manual para retirar o trem desta situação.



Figura 13 – Centro de Controle de Operação

Entre os possíveis desenvolvimentos, pode-se citar o visualizador 3D (Figura 14) com recurso editável de treinamento (Figura 15) que pode ser aplicado em qualquer tipo de equipamento com finalidade de treinamento de operação ou manutenção.



Figura 14 – Detalhe de motor diesel no visualizador 3D

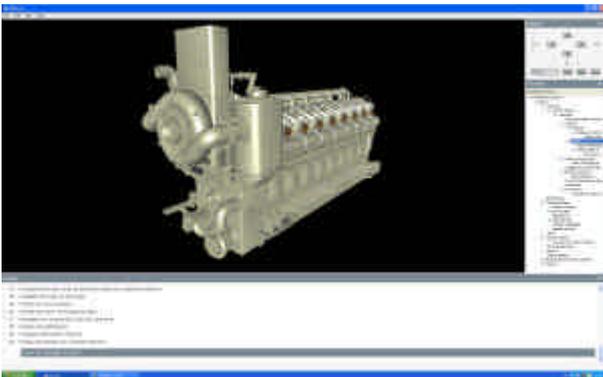


Figura 15 – Visualizador 3D com recursos de treinamento

Na mineração o processo de extração com interação entre as máquinas e o minério, pode ser modelada pelo método de partículas (ver Figura 16), incluindo a topografia georeferenciada da mina (Figura 17) atualizada por *D-GPS* de alta precisão, sistema de transporte por caminhões *off-road* (Figura 18) e processos de armazenagem e recuperação da matéria prima (Figura 19).



Figura 16 – Extração de minério



Figura 17 – Topografia da Mina



Figura 18 – Caminhão *off-road* para transporte de minério



Figura 19 – Recuperadora de minério

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Os benefícios do uso da técnica de realidade virtual para simulação de equipamentos de movimentação e treinamento de operadores ficam evidentes em função das facilidades e vantagens que oferecem na complementação dos recursos de treinamento e engenharia disponíveis.

Não se pretende substituir os métodos tradicionais de treinamento, mas tão somente complementá-los com recursos visuais e interativos, proporcionando agilidade, flexibilidade e atratividade aos usuários.

Estas são algumas das possíveis áreas de pesquisa que podem ser desenvolvidas por instituições acadêmicas como a USP, que tem competência e características multidisciplinares, adequadas para enfrentar tal amplo desafio.

Espera-se com esta iniciativa despertar o interesse das empresas nacionais no investimento em pesquisa para a criação e aprimoramento de tecnologia na área de simulação computacional, contribuindo para aumentar ainda mais a qualidade e produtividade, valorizando os recursos humanos.

7 AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos a VALE, pelo incentivo na realização deste trabalho e outros desenvolvimentos em curso.

8 REFERÊNCIAS

- [1] Barbosa R. S., Kassab Jr, F., Nishimoto, K., Padovesse, L. R., Marques, R. P., Taniguchi, D. Simulador de Realidade Virtual para Treinamento de Maquinistas da VALE. I Encontro de Ferrovias, ANTF, 6 p., 2008.