

Sistema de Realidade Virtual de Simulação Multiusuários de Trens em Malha Ferroviária para Treinamento de Operadores

Roberto Spinola Barbosa^{1*}, Fuad Kassab Junior², Kazuo Nishimoto³, Ricardo Paulino Marques⁴ e Humberto Shigueki Makiyama⁵

¹ Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-970, São Paulo, SP.

^{2 e 4} Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05508-970, São Paulo, SP.

^{3 e 5} Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 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: rpm@lac.usp.br, 5º autor: betomaki@tpn.usp.br.

Resumo: O sistema de realidade virtual de simulação de trens é uma ferramenta que permite o treinamento de operadores de forma rápida e homogênea. Neste ambiente o comportamento dinâmico do equipamento de movimentação é simulado em tempo real, permitindo o treinamento do operador na condução do trem. O sistema de realidade virtual de simulação multiusuários desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo é constituído por computadores trabalhando interconectados em uma arquitetura de rede que permite a conexão entre os módulos de treinamento que passam a interagir dentro de uma malha viária completa. Desta forma, mais de um aluno pode ser treinado simultaneamente e com interação mútua dentro do mesmo cenário. O treinamento de múltiplos usuários, exemplo da simulação de operação do acoplamento de veículos em movimento (trem + locomotiva *helper*), formação de trem ou manobra em pátio, podem ser simuladas com interação entre equipamentos para treinamento multiusuário. Para um treinamento consistente, a relação causa e efeito é de fundamental importância na funcionalidade educacional do simulador. Com este objetivo foi introduzido o modelo completo do veículo que permite a interação com outros equipamentos e simula o comportamento dinâmico detalhado do vagão. A inclusão de controle de tráfego no simulador, especialmente contendo recursos relacionados ao despacho de trens, é uma evolução natural e necessária do sistema quando este trata do modo multiusuário. Para atender às novas demandas do simulador com características multiusuário, foi utilizada uma ferramenta especializada no desenvolvimento de visualização 3D de alto desempenho. Desta forma foi aumentada substancialmente a qualidade das imagens virtuais produzidas, com redução na demanda de capacidade de processamento dos computadores para produzir a visualização gráfica estereoscópica tridimensional. Desta forma disponibiliza-se sistema de realidade virtual multiusuário acessível customizado e de aplicação em escala para treinamento de operadores de trens em sistema ferroviário.

Palavras-Chaves: simulador, dinâmica, realidade virtual, trem, vagão

1. INTRODUÇÃO

O sistema de realidade virtual de simulação de trens é uma ferramenta que permite o treinamento de operadores de forma rápida e eficiente. Desta forma pode-se aumentar a produtividade nos processos de

movimentação e transporte de cargas instruindo seus operadores com os conhecimentos adequados. Neste ambiente o comportamento dinâmico do equipamento de movimentação é simulado em tempo real, permitindo o treinamento do operador, aumentando sua eficiência e segurança na

condução do trem. Os módulos de treinamento existentes atualmente permitem a simulação de apenas um trem em um determinado trecho da linha férrea. O sistema de realidade virtual de simulação multiusuário desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo é constituído por computadores trabalhando interconectados em uma arquitetura de rede que permite a conexão entre os módulos de treinamento que passam a interagir dentro de uma malha viária completa. Desta forma, mais de um aluno pode ser treinado simultaneamente e com interação mútua dentro do mesmo cenário. O treinamento de múltiplos usuários, exemplo da simulação de operação do acoplamento de veículos em movimento (trem + locomotiva *helper*), formação de trem ou manobra em pátio, podem ser simuladas com interação entre equipamentos para treinamento multiusuário. Para um treinamento consistente, a relação causa e efeito é de fundamental importância na funcionalidade educacional do simulador. Com este objetivo foi introduzido o modelo completo do veículo que permite a interação com outros equipamentos e simula o comportamento dinâmico detalhado do vagão. Desta forma pode-se avaliar a redução da margem de segurança do vagão quando se aplica uma frenagem de emergência no trem ou durante uma demarragem com vagão na curva. A inclusão de controle de tráfego no simulador, especialmente contendo recursos relacionados ao despacho de trens, é uma evolução natural e necessária do sistema quando este trata do modo multiusuário. Para atender às novas demandas do simulador com características multiusuário, foi utilizada uma ferramenta especializada no desenvolvimento de visualização 3D de alto desempenho. Desta forma foi aumentada substancialmente a qualidade das imagens virtuais produzidas, com redução na demanda de capacidade de processamento dos computadores para produzir a visualização gráfica estereoscópica tridimensional. A primeira versão do simulador encontra-se instalada nas dependências da VALE em Vitória (Centro de Excelência) e São Luiz. Um posto avançado de treinamento foi alocado em Moçambique (pode ser configurado de forma remota através da internet).

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a segunda etapa do desenvolvimento do simulador foi centralizada na expansão de sua capacidade de treinamento e introdução de inovações. Um dos focos principais foi a inclusão do aspecto multiusuário quebrando a tradição dos simuladores existentes que permitem apenas a simulação de um trem em um determinado trecho da linha férrea. Outra inovação importante consiste na inclusão do modelo dinâmico do veículo completo. Desta forma a relação causa/efeito entre as ações do maquinista e o comportamento dinâmico do vagão se tornam possíveis. Nesta versão além da descrição da malha ferroviária em coordenadas georeferenciadas, um gestor de tráfego com sinalização integrada e módulo de despacho foi inserido para permitir controle do tráfego.

Nesta nova versão será possível realizar a simulação de operação de acoplamento de locomotivas em movimento (trem + locomotiva de auxílio), formação de trem ou manobra em pátio para treinamento. Finalmente foi adotada ferramenta de desenvolvimento especializada de imagens que permite o desenvolvimento de soluções de visualização 3D de alta qualidade e desempenho.

3. ARQUITETURA

Do ponto de vista da arquitetura, o sistema se destaca pela distribuição de tarefas e funcionalidades em uma rede gerenciada por meio de uma memória compartilhada. Desta forma, diferentes módulos podem ser distribuídos ou realocados facilmente, assim como novos módulos podem ser acrescentados dinamicamente com impacto mínimo sobre o desempenho global do sistema.

Um importante aspecto dessa concepção é que a implementação do que denominamos modo multiusuário, onde diferentes módulos e estações de treinamento podem interagir entre si, é bastante facilitada, o que viabiliza a realização de simulações com um grau de abrangência e realismo muito maior do que o de sistemas mais convencionais, que não contam com tais recursos.

4. MODO MULTIUSUÁRIO

O modo multiusuário de operação consiste, do ponto de vista do usuário, da possibilidade de que diferentes estações de treinamento,

representando tipicamente cada uma delas uma composição, possam compartilhar o mesmo espaço virtual, interagindo entre si. Assim é possível, por exemplo, que duas (ou mais) composições trafeguem numa mesma linha e que o sistema reconheça interações entre elas e o sistema de sinalização, comum a ambas. O grau de interação pode permitir que uma composição sirva como reboque a outra ou até mesmo que manobras inadvertidas causem colisões e outros incidentes.

O interesse em se implementar um modo multiusuário, além da ampliação da abrangência do simulador e da qualidade da experiência obtida pelo operador, envolve outros aspectos tão ou mais importantes. Um aspecto é que a interação entre composições leva a simulação de aspectos de sinalização da via a um patamar mais elevado, muito mais próximo da experiência real em diversos aspectos. Outro aspecto, e talvez aí resida o maior interesse, é que o modo multiusuário permite a simulação efetiva de pátios de manobra. Isso é bastante interessante, pois a capacidade de se simular interações entre composições é particularmente mais importante no espaço em que essas interações são mais frequentes.

São dois os principais desafios na implementação de um modo multiusuário. O primeiro é organizar e hierarquizar o fluxo de informações e garantir sua disponibilização em tempo real por qualquer nó da rede. Em grande medida, o uso de uma memória compartilhada, que permite que qualquer módulo tenha acesso imediato a informações de outros módulos, independente de sua localização ou nós específicos na rede, permite que esse desafio seja vencido.

O segundo desafio é fazer com que o sistema de gerenciamento da via, incluindo aspectos de sinalização, que num sistema convencional é relativamente simples, passe a incorporar todo o fluxo de informações multiplicado pela presença de diferentes agentes, tais como diferentes estações de treinamento, módulos de despacho, etc. Onde antes existia um gerenciador de via simples, passa a existir um gerenciador de via compartilhada, que deve receber e processar dados oriundos de diversos pontos da rede, desempenhando tarefas bastante mais complicadas e com escopo muito mais amplo.

5. MÓDULO DE DESPACHO

A inclusão de controle de tráfego, especialmente incluindo recursos relacionados ao despacho de trens, é uma evolução natural e necessária do sistema quando este passa a incluir o modo multiusuário. Além de viabilizar e harmonizar a operação de todo o ambiente de simulação, esse módulo permite que se faça também o treinamento de operadores de despacho.

O escopo desse módulo pode incluir um complexo de vias que pode chegar a mais de 800 km, com uma quantidade de trens trafegando simultaneamente que pode exceder uma centena, com diferentes características e prioridades (por exemplo, trens de passageiros, carga, manutenção, etc.). Para que se possa ter um ambiente mais realista na simulação, prevê-se que a maioria dos trens seja gerada virtualmente, isto é, a maioria dos trens será operada automaticamente pelo sistema, enquanto que uma minoria será efetivamente operada pelos treinandos em suas estações de treinamento.

6. VISUALIZAÇÃO

Para atender às novas demandas do simulador, dentre as ferramentas de desenvolvimento disponíveis no mercado, adotamos a ferramenta desenvolvida pela Unity Technologies [8], o chamado Unity-3D. Esta ferramenta permite o desenvolvimento de soluções de visualização 3D de alta qualidade e desempenho. A ferramenta tem como base a linguagem C#. Uma das grandes vantagens é a possibilidade de utilizar códigos nativos por meio de bibliotecas dinâmicas DLL (Dynamic-Link Library). Desta forma, códigos desenvolvidos para a primeira versão do visualizador podem ser reaproveitados nesta versão, evitando assim o retrabalho de escrita de código. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da arquitetura do visualizador. Módulos mais complexos foram praticamente reaproveitados nesta segunda versão. O novo motor gráfico permite a importação de modelos em formatos padrões utilizados no mercado como o formato FBX [8], desenvolvido pela Autodesk. Atualmente este formato é bastante utilizado pelas ferramentas de desenvolvimento de jogos principais do mercado. Desta forma, não é preciso utilizar soluções especializadas como o OGREmax [9], um formato desenvolvido por Nedelman para a

ferramenta Ogre-3D. Além do melhor resultado do formato FBX em termos de qualidade gráfica, ele proporciona maior segurança nas operações de exportação de modelo, evitando assim um número desnecessário de retrabalho.



Figura 1 - Arquitetura esquemática do novo visualizador

Outra vantagem é a maior gama de aceleradores gráficos compatíveis. Dependendo da tecnologia de renderização utilizada, é possível abaixar o nível do equipamento, tornando-o mais acessível aos computadores padrões do mercado que sejam capazes de executar programas comerciais. A Figura 2 e Figura 3 mostram uma comparação da qualidade gráfica entre as duas versões.

A ferramenta Unity-3D também permite adicionar objetos gráficos mais complexos como árvores, chuva, fecho de luz, etc.. A Figura 3 mostra um exemplo de árvores de qualidade superior, resultando em uma renderização mais realista.



Figura 2 - Tela da primeira versão do visualizador



Figura 3 - Tela da nova versão do visualizador

7. MODELO COMPLETO DO VAGÃO

As solicitações oriundas da condução do trem passam invariavelmente por todos os vagões. Os choques devido a tração ou ações de frenagem, produzem forças nos engates que influenciam no comportamento de cada vagão. Em alguns casos pode prejudicar a margem de segurança do vagão (ex. em curvas ou superelevação não compensada). Os vagões também tem seu comportamento dinâmico influenciado pela velocidade de tráfego e geometria da via.

Efeitos do sistema de freio pneumático ao longo do trem ou a margem de segurança do vagão (índice L/V) ao longo do trem em diferentes pontos da via, não são diretamente perceptíveis ao condutor na cabine da locomotiva. Então a identificação da relação entre causa e efeito é bem vinda no processo de instrução/formação de condutores.

A modelagem do comportamento dinâmico de veículos tem sido aprimorada nas últimas décadas. Mais recentemente a técnica de sistemas multicorpos baseado na formulação de equações de movimento nos métodos de *Lagrange* (Adams, 1994) e/ou *Kane* (Kane, 1985), tem sido utilizada para a modelagem de sistemas mecânicos com grande número de graus de liberdade.

A interação dinâmicas entre o veículo e a via é responsável pela produção das solicitações de contato entre a roda e o trilho. As solicitações de contato dependem das características dinâmicas do veículo e geometria da irregularidade da via. São funções também da velocidade de tráfego e da carga por eixo do vagão.

A técnica de modelagem de sistemas multicorpos produz equações algébrico/diferenciais de movimento a partir da concepção topológica tridimensional do sistema mecânico com corpos, vínculos e forças. A expressão abaixo apresenta a formulação de *Lagrange*, baseada na variação de energia cinética e potencial (função Lagrangeana L) dos corpos para as coordenadas q_r e multiplicadores de *Lagrange* λ_j dos vínculos não holônomos ϕ_j do sistema e forças generalizadas F_r , que permite obter as equações de movimento:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_j}{\partial q_r} \lambda_j - F_r = 0 \quad (1)$$

Algoritmos robustos e eficiente de integração numérica foram utilizados em função das características do modelo que contém autovalores de grande espectro e características de não linearidades. O conhecimento da força dinâmica de contato baseado na teoria de *Kalker* é de fundamental importância para a representatividade do modelo dinâmico do sistema. Este algoritmo é elaborado em códigos na linguagem C e deve ser rápido o suficiente para acompanhar o tempo real do simulador. Desta forma obtêm-se uma ferramenta eficiente para mostrar ao condutor os efeitos de seus atos sobre o vagão em qualquer posição, durante a condução do trem.

A nova arquitetura para a versão multiusuário permite visualização de esforços dinâmicos exercidos sobre o vagão. A Figura 4 apresenta uma tela do modelo completo do vagão com os esforços exercidos sobre ele. Para a sua implementação, foi criado um sistema de modos de visualização que permite visão dos esforços envolvidos. O modelo do vagão foi dividido em partes menores, permitindo um movimento distinto com seis graus de liberdade para cada parte. Além disso, oito esforços de contato roda-trilho mais dois componentes de forças relativos aos engates são representados visualmente por vetores tridimensionais. O comprimento desses vetores indica a magnitude das forças de forma qualitativa e a cor revela as margens de segurança com relação a um nível preestabelecido.

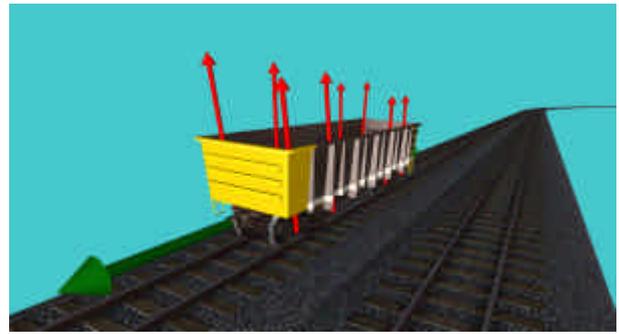


Figura 4 - Visualização do modelo completo de vagão

8. COMENTÁRIOS FINAIS

O processo de desenvolvimento e inovação de sistemas de realidade virtual consolida e aprimora o conhecimento desta especialidade, permitindo atingir a competência científica necessária para o domínio da técnica e disponibilização à sociedade. Desta forma empresas que procuram aprimorar o treinamento de seus colaboradores conta com recurso informatizado de realidade virtual acessível customizado e de aplicação em escala. Desta forma pode-se aumentar a eficiência na produção de transporte, reduzindo o consumo de energia e com segurança na busca da excelência na operação de transporte. Finalmente a introdução da gestão da malha torna-se o princípio para o desenvolvimento de um simulador de centro controle operacional (CCO), permitindo o treinamento dos controladores.

9. AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos a VALE, pelo incentivo na realização deste trabalho e outros desenvolvimentos em curso com quem dividimos o mérito desta publicação.

10. REFERÊNCIAS

- [1] Barbosa R. S., Kassab Jr, F., Nishimoto, K., Padovese, L. R., Marques, R. P., Taniguchi, D. Sistemas de Realidade Virtual para Simulação de Equipamentos de Movimentação e Treinamento de Operadores. II Encontro de Ferrovias, ANTF, 6 p., 2010.
- [2] Barbosa R. S., Kassab Jr, F., Nishimoto, K., Padovese, 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.

- [3] OGRE-3D, Disponível em: <<http://www.ogre3d.org/>>, Acesso em: 18 jul. 2011.
- [4] NISHIMOTO, K. ; RUSSO, Antonio Augusto ; TANIGUCHI, Denis. Tanque de Provas Numérico: TPN View- Visualização dos Resultados da Simulação em Realidade Virtual. In: Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção naval e Offshore, 19-SOBENA, 2002, Rio de Janeiro. Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção naval e Offshore, 19-SOBENA, 2002.
- [5] NISHIMOTO, K. ; FERREIRA, Marcos Donato ; MASETTI, Isaias Q . Numerical Offshore Tank: Development of NOT for ultra deep water oil production system. In: congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção naval e Offshore, 19, 2002, Rio de Janeiro, 2002.
- [6] Unreal Development Kit (2011) Epic Games. Disponível em: <<http://www.udk.com/>>, Acesso em: 18 jul. 2011.
- [7] CRYENGINE (2011) Crytek. Disponível em: <<http://www.crytek.com/>> , Acesso em: 18 jul. 2011.
- [8] UNITY-3D, Unity Technologies. Disponível em: <<http://unity3d.com/>>, Acesso em: 18 jul. 2011.
- [9] DNV Survey Simulator (2011) Det Norske Veritas (DNV). Disponível em: <http://eng.dnv.com.pl/services/software_solutions/survey_simulator/index.asp>, Acesso em: 18 jul. 2011.
- [10]FBX (2011) Autodesk. Disponível em: <<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=6837478&siteID=123112>>. Acesso em: 18 jul. 2011.
- [11] NEDELMAN, Derek. (2011) Autodesk. Disponível em: <<http://www.ogremax.com/>>. Acesso em: 18 jul. 2011
- [12] ADAMS/VIEW (1994). User's reference manual, Version 8.0, Mechanical Dynamics, 576 pp.
- [13] KANE, T. R.; LEVINSON, D. A. (1985). Dynamics: theory and applications. McGraw-Hill, 379 p., USA.