

Plataforma Baseada em Realidade Virtual para Treinamento de Atividades em Linha Viva

Matheus Rosendo, Tiago Martinuzzi Buriol, Klaus de Geus, Daniele Felix, Sergio Scheer

Resumo—Atividades de manutenção em linha viva são aquelas realizadas em redes de distribuição de energia em que o fluxo de energia não é interrompido. Embora reduza custos, esta prática é considerada de alto risco, assim, a efetividade do treinamento prévio é importante. Nesse sentido, frequentemente buscam-se recursos para melhorar a retenção de conhecimento e qualidade das informações transmitidas. Este artigo relata o desenvolvimento de um sistema de Realidade Virtual semi-imersivo para treinamento de atividades de manutenção em linha viva. O principal objetivo é descrever a plataforma concebida a qual utiliza dispositivos, como o Wii Remote e televisores 3D para a construção de um novo modelo de interação e de navegação focados em princípios da computação pervasiva e tangíveis.

Palavras-chave—linha viva, treinamento, realidade virtual, wiimote, interface pervasiva e tangível .

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia da Realidade Virtual (RV) tem sido considerada durante décadas a mais sofisticada interface Humano/Computador existente [1]. Os sistemas baseados em RV buscam fazer uso de novas formas de interação, as quais permitam ao usuário comunicar-se com o ambiente virtual de forma mais intuitiva possível. A interação com o mundo virtual deve ser feita de forma natural baseando-se nos conhecimentos que o usuário possui sobre a física do mundo real. Para isso, os dispositivos utilizados em RV procuram estimular os vários sentidos do usuário e fazem uso de recursos como visualização estereoscópica, áudio multicanais e resposta tátil.

Nos últimos anos, alguns fatores têm influenciado a adoção e disseminação da RV na indústria, por exemplo, a disponibilidade de *hardware* mais poderoso por menor custo, o

uso de novas ferramentas de CAD 3D (*Computer Aided Design*), que já fornecem os modelos geométricos necessários, dentre outros [2]. Com isso, as técnicas de RV têm se estabelecido como ferramentas efetivas em aplicações como, por exemplo, o desenvolvimento de produtos, planejamento e validação dos processos de fabricação. O fácil acesso a diferentes protótipos virtuais de um produto e outros projetos permite realizar modificações e melhorias reduzindo os custos de correções futuras [3], [4] e [5].

Além da revisão e validação de projetos, outras aplicações da RV de interesse das indústrias são os sistemas de treinamento [6], [7], [8] e [9]. O treinamento e capacitação utilizando ambientes virtuais 3D podem prover diversos benefícios em relação às abordagens tradicionais. Por exemplo, possibilita reduzir custos e evitar situações de risco no treinamento. Também permite que modelos geométricos 3D complexos possam ser visualizados e manipulados de forma intuitiva e tarefas distintas possam ser simuladas muitas vezes, para um maior número de alunos e com menor custo.

Recentemente, a área de pesquisa conhecida como *Serious Games* tem emergido utilizando a tecnologia avançada dos atuais jogos eletrônicos para propostas como ensino e treinamento com intenso foco nos aspectos pedagógicos. Exemplos de aplicações pode ser encontrados, por exemplo, nas áreas de visualização científica, simuladores de controles de veículos e treinamento na área médica [10]. Tais tecnologias oferecem um nível de experiência prática que não pode ser obtida facilmente de outra maneira.

No setor elétrico, empresas treinam equipes para realização de atividades críticas e de alto risco, como, por exemplo, manutenção em linha viva. Tais atividades reduzem os custos e inconvenientes causados pela interrupção do fornecimento de energia. O treinamento em linha viva, em uma companhia do Paraná, pode ser realizado em cinco semanas divididas em uma fase teórica e outra prática [11]. A parte teórica é feita em sala de aula, usando material impresso, fotos e vídeos. A parte prática é realizada primeiramente com a linha não energizada e posteriormente com a linha energizada. O próprio treinamento com a linha energizada é uma atividade de alto risco e deve ser cuidadosamente monitorada pelo supervisor.

Em operações com linha viva, além do risco de perda de vidas humanas, o que é inestimável, o custo médio de um acidente de trabalho pode ser estimado em aproximadamente R\$120.000,00. O número de acidentes em uma concessionária durante um ano pode variar tipicamente entre 100 e 200. De acordo com alguns registros, os custos desses aci-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Matheus Rosendo é pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e-mail: matheus.rosendo@lactec.org.br

Tiago Martinuzzi Buriol é professor no Instituto Federal do Paraná (IFPR) e doutorando do CESEC/UFPR, e-mail: tiago.buriol@ifpr.edu.br

Klaus de Geus é professor colaborador do CESEC/UFPR e trabalha na Companhia Paranaense de Energia (COPEL), e-mail: Klaus@degeus.com.br, klaus@copel.com.

Daniele Felix é pesquisadora no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e-mail: daniele@lactec.org.br

Sérgio Scheer é Pró-Reitor de pesquisa e Pós-Graduação da UFPR e professor do CESEC/UFPR, e-mail: scheer@ufpr.br

desenvolvidos podem totalizar a quantia aproximada de R\$ 3.500.000,00. Dessa forma, aumentando a quantidade e qualidade das informações e conhecimentos adquiridos durante o treinamento, espera-se reduzir o número de acidentes e prejuízos associados.

Apesar das potenciais vantagens do uso de RV no processo de treinamento, ainda não existe disponível um sistema completo, voltado à demanda do setor elétrico, para uso em treinamento de atividades em linha viva. Além disso, o projeto de uma plataforma para um ambiente virtual é complexo e as escolhas de software e hardware não são triviais. A concepção de um modelo funcional e dos aspectos didáticos e instrutivos do sistema requer um extensivo estudo e testes junto ao usuário final.

Neste trabalho é relatada a experiência no desenvolvimento de um sistema baseado em Realidade Virtual semi-imersiva para treinamento de manutenção em linha viva. O sistema foi idealizado visando a tornar seu uso o mais fácil e intuitivo possível. A concepção da plataforma básica, escolhas de software e hardware, e aspectos do desenvolvimento do software principal são apresentados e discutidos. Os modelos de navegação e interação concebidos permitem que o sistema reaja a ações do usuário de forma “invisível”, respondendo a comportamentos naturais do usuário. Este tipo de interação, a qual foi baseada no conceito de computação pervasiva, é resultado da forma como são usados os dispositivos de entrada e saída de dados, incluindo televisores estereoscópicos e controles Wii Remote (wiimote).

Durante o treinamento, o usuário utiliza apenas um wiimote como dispositivo de interação para simular a atividade. O wiimote possibilita tanto a livre manipulação de objetos como a navegação no espaço 3D da cena. Um outro wiimote é utilizado para rastrear a posição da cabeça do usuário e modificar a cena de acordo com o seu ponto de vista. O sistema reage aos movimentos do usuário em tempo real, atualizando a cena e fazendo com que o *display* pareça como uma janela para o mundo virtual. Neste artigo o modelo de navegação e de interação para manipulação dos objetos, inclusive os aspectos relativos ao desenvolvimento, são apresentados detalhadamente.

II. REALIDADE VIRTUAL E TECNOLOGIAS RELACIONADAS

Para uma melhor compreensão do sistema aqui proposto, alguns conceitos científicos e tecnológicos devem ser apresentados.

A. Realidade Virtual

Realidade Virtual pode ser definida como um conjunto de técnicas avançadas de interface, onde o usuário pode navegar e interagir em um ambiente virtual tridimensional (3D), estando completa ou parcialmente imerso pela sensação gerada por canais multi-sensoriais [1]. Em uma aplicação de computação gráfica, o termo ambiente virtual refere-se a um cenário onde o usuário pode navegar e interagir, comunicando-se com o ambiente e experimentando as reações do ambiente às suas ações. A visão estereoscópica, o som 3D e a resposta em tempo real às ações do usuário são elementos

chaves para prover imersão. Dessa maneira, a tecnologia da RV engloba tudo aquilo que é relativo à criação e aplicação de ambientes virtuais imersivos. Cada um desses elementos pode ser inserido em uma estrutura de grafo de cena, a qual irá representar o ambiente virtual. O usuário, então, interage utilizando os chamados dispositivos de interação (entrada e saída de dados).

B. Estereoscopia

A visão estereoscópica, ou tridimensional, que temos do mundo é resultado da interpretação pelo cérebro das duas imagens bidimensionais que cada olho capta a partir de seu ponto de vista. Em computação gráfica, a estereoscopia pode ser obtida por meio da geração de duas imagens, a partir das localizações de duas câmeras virtuais, separadas a uma determinada distância. Este par de imagens pode ser gerado por bibliotecas como a *Open Scene Graph* [12]. Para tal é preciso configurar alguns parâmetros, como a distância entre os olhos e o tamanho do *display*.

C. Dispositivos de Interação

Os dispositivos de entrada e saída de dados mais comuns são o monitor, o mouse e o teclado. Em sistemas de RV os dispositivos de interação têm a função de prover uma interface intuitiva e natural, proporcionando ao usuário a sensação de imersão, ou seja, sentir-se dentro do ambiente virtual. Alguns exemplos desses dispositivos são os HMDs (*Head Mounted Display*), que são *displays* acoplados na cabeça; as CAVEs (*Cave Automatic Virtual Environment*), que são estruturas com várias telas feita para comportar e isolar o usuário do ambiente externo; equipamentos com retorno de força ou *force-feedback*; equipamentos de áudio e vídeo em geral. Quanto aos dispositivos de entrada, alguns dos mais utilizados são: o *dataglove*, ou luva de dados, que possui sensores capazes de captar movimentos das mãos do usuário; o *mouse* de navegação 3D; os dispositivos de *tracking* usados para rastrear informações de posição, rotação e aceleração; óculos estereoscópicos; dentre outros.

1) O Wiimote

O Dispositivo Wii Remote Em 2006 a Nintendo lançou o console de *video game* Wii o qual se tornou popular no mundo todo devido em grande parte à técnica inovadora de interação que faz uso do seu controle sem fio chamado *Wii Remote*, ou simplesmente *Wiimote* (ver Figura 1). O dispositivo, além de botões, possui uma câmera infra-vermelha (IV) de alta resolução e frequência, acelerômetros nos três eixos, um pequeno auto-falante, um motor para vibração e conectividade via Bluetooth. Essas tecnologias fazem do wiimote um dos mais sofisticados dispositivos compatíveis com PC disponíveis nos dias de hoje [13].

A câmera pode captar até 4 fontes de luz IV a uma resolução de 1024 x 768 pixels pixels a uma frequência de 100 Hz e um campo de visão de 45 graus na horizontal e 30 graus na vertical. Ela possui um processador de imagens interno que analisa a imagem, identifica manchas brilhantes, e calcula suas coordenadas.

O Wiimote também possui doze botões, contando com os direcionais (cima, baixo, direita, esquerda), conforme pode ser observado na Figura 1. Na Figura 4 também pode ser observado como o usuário pode utilizar o controle, por exemplo, o dedo polegar é usado para pressionar o botão *A* e o indicador para pressionar o botão *B*.



1. Wiimote.

A conexão do dispositivo é feita através da tecnologia *Bluetooth*, o que o torna compatível com qualquer PC que possua esta tecnologia, e uma biblioteca para controlar o wiimote e ler os dados. A alimentação é feita por meio de duas pilhas do tipo AA que podem operar durante 20 a 40 horas. O Wiimote ainda possui um vibrador e pequenos auto-falantes internos.

O wiimote possui uma abundante gama de possibilidades para entrada e saída de dados. Essas características combinadas à facilidade de uso e conectividade com o PC tornaram esse dispositivo popular na exploração de alternativas para controle de aplicações existentes. Atualmente é possível encontrar muitos projetos explorando novas aplicações e plataformas com formas de interação inéditas utilizando o wiimote [13].

D. Grafo de Cena

Um grafo é uma estrutura matemática formada por nós, conectados entre si, e que armazena uma coleção de objetos de maneira organizada. Um grafo de cena é uma estrutura hierárquica de dados, acíclica, que utiliza uma abordagem de alto nível para modelagem e gerenciamento de cenas em computação gráfica. A estrutura hierárquica de objetos em um grafo de cena é usada para otimizar vários procedimentos da aplicação [12].

Por exemplo, em uma cena que contém várias casas, cada uma contendo vários quartos, ao se determinar que uma casa está fora do campo de visão, automaticamente fica determinado que todos os seus quartos também estão. Isto representa uma vantagem significativa, pois é possível excluir grandes partes da cena que não contribuem para a imagem final. Outra característica importante da estrutura hierárquica é a facilidade para manipulação. Por exemplo, um carro é construído de várias partes como chassi e rodas. Uma possível hierarquia a ser modelada seria estabelecer um objeto “carro” como pai, e os outros objetos como seus filhos. Para mover o carro, seria necessário apenas mover o “objeto raiz” da hierarquia e todos os outros objetos seriam movidos au-

tomaticamente.

E. Computação Ubíqua e Interfaces tangíveis

A Computação Ubíqua (UbiComp) refere-se a um modelo de computação no qual muitos computadores compartilham cada indivíduo. O termo foi introduzido por Mark Weiser [14] e refere-se a um modelo de computação que pode ser integrado ao nosso ambiente como parte de nossas vidas cotidianas, sem sobrecarregá-las. É uma computação invisível ou imperceptível, inteligente e altamente integrada entre diferentes computadores e suas aplicações. A efetividade e disseminação da UbiComp requer avanços na capacidade de comunicação entre humanos e computadores, com vistas a torná-la o mais natural possível. Muitos esforços até hoje focaram-se no reconhecimento da voz e da escrita estimulando a interação física entre humanos e computadores, diferente do que atualmente é feita com mouse e teclado. O desafio nesse sentido é o de criar interfaces capazes de reconhecer, também, os gestos, expressões e aliar esses dados ao contexto das operações tornando as ferramentas computacionais cada vez mais invisíveis para o usuário final. As interfaces tangíveis correspondem a uma subárea da UbiComp e buscam mudar o paradigma tradicional de entrada e saída, criando novas possibilidades de interação que juntam os mundos físico e digital [15].

F. Simulação Física

O realismo de um objeto virtual pode ser considerado com base em dois aspectos principais: aparência e comportamento [18]. Uma aparência realística pode ser obtida por meio de técnicas de *rendering* como mapeamento de texturas e iluminação. Um comportamento físico realístico requer um processamento numérico envolvendo muitos cálculos baseados nas leis da física. Esse processamento pode ser realizado, por exemplo, por meio de uma chamada Máquina Física (MF), ou seja, biblioteca ou kit de desenvolvimento para simulação física.

A MF consiste de rotinas computacionais para simular corpos rígidos, partículas, ondas, objetos deformáveis tais como tecidos e para detectar colisões entre objetos. O nível de realismo provido por uma MF está diretamente relacionado com o nível de precisão dos resultados do processamento numérico envolvido. Muitas MF estão disponíveis atualmente e algumas delas são *open source* (códigos fonte abertos). Alguns exemplos são: PhysX¹, HAVOC², Bullet³ e Open Dynamic Engine⁴.

III. MOTIVAÇÃO: TREINAMENTO PARA ATIVIDADES EM LINHA VIVA

O projeto Sistema de Realidade Virtual para Treinamento de Atividades em Linha Viva, chamado aqui simplesmente de projeto RV-COPEL, preconiza o uso da tecnologia de RV aplicada a um sistema de treinamento para atividades

¹ http://www.nvidia.com.br/object/nvidia_physx_br.html

² <http://www.havok.com>

³ <http://www.bulletphysics.com>

⁴ <http://www.ode.org>

em linha viva.

Os principais objetivos do projeto RV-COPEL são: (1) A modelagem e o desenvolvimento de um Ambiente Virtual para treinamento de atividades de manutenção em linha viva utilizando as técnicas de RV combinadas a interfaces inovadoras; (2) O estudo investigativo do comportamento humano e da cultura brasileira nas atividades de manutenção em linha viva, para considerações na modelagem do sistema; (3) O estabelecimento de um novo modelo de treinamento, baseado no ambiente virtual, o que possibilita a complementação do processo existente, a participação de um maior número de alunos e uma maior segurança dos alunos; (4) o aumento do escopo e eficácia do processo e a geração de conhecimento especializado.

A atividade de modelagem e desenvolvimento do ambiente virtual engloba a modelagem geométrica e a modelagem comportamental (ou funcional) de todos os objetos que constituem a cena completa. A modelagem geométrica diz respeito à geração dos modelos digitais (ou malhas) dos objetos como postes, cabos, ferramentas, edificações e equipamentos diversos. Já a modelagem comportamental (ou funcional) diz respeito a como o usuário pode interagir com o ambiente e como o ambiente, e cada parte dele, reagirá às ações do usuário. Por exemplo, se o usuário se aproximar demais de uma linha energizada, poderá receber um choque elétrico simulado virtualmente. Um detalhado estudo investigativo do comportamento humano e da cultura brasileira nas atividades de manutenção em linha viva, o qual constitui o segundo objetivo, é fundamental para considerações acerca da modelagem funcional e comportamental do sistema. E finalmente, os dois outros objetivos que seguem serão resultado e consequência, respectivamente, dos dois primeiros.

Tendo em mente os objetivos do projeto (e o perfil geral do usuário final), o problema fica caracterizado de tal forma que se busca uma solução de software e hardware que proporcione certo nível de imersão e, também, que possua dispositivos de iteração simples e intuitivos. É desejável que as funcionalidades do sistema permitam que o usuário, com o mínimo de instruções sobre como utilizar o sistema, consiga reproduzir as ações que realizaria na prática. Conceber uma solução com essas características não é trivial, uma vez que, as atividades de manutenção em linha viva envolvem o manuseio de equipamentos que não podem ser representados de forma fiel em um ambiente virtual. Por exemplo, a rigidez, inércia e peso de ferramentas e equipamentos. A solução, portanto, deve estar focada nos aspectos cognitivos do treinamento e não na simulação física precisa. Nesse sentido, o sistema deve permitir que o usuário indique, interagindo de forma simples e intuitiva, o que faria em uma situação real. Assim, a simulação é focada nos procedimentos e sequência correta das ações ao invés da simulação física realística dos objetos do mundo virtual.

Para viabilizar tal solução, é preciso primeiramente analisar os aspectos abordados no treinamento, da forma como é realizado tradicionalmente. Existem três métodos distintos para realizar atividades de manutenção em linha viva: método ao contato, método à distância e método ao potencial. No método ao contato, o electricista permanece em contato direto com os condutores energizados. Nos métodos à distância e

ao potencial o electricista utiliza equipamentos especiais como bastões isolantes e vestimentas condutivas. Os métodos à distância e ao potencial representam menos de 5% das atividades de manutenção realizadas pela COPEL. Além disso, o método ao contato exige maior atenção por parte do electricista, por ser o mais perigoso dentre os três métodos. Por estes motivos, focou-se no método ao contato, no qual o electricista permanece em contato direto com os condutores energizados, como pode ser observado na Figura 2.

De acordo com o manual [11], os objetivos do treinamento para atividades em linha viva são: (1) Estabelecer os procedimentos corretos; (2) Estabelecer a sequência correta da execução; (3) Estabelecer medidas de segurança; (4) Dimensionar os recursos necessários para a execução; (5) Fornecer informações básicas sobre ferramentas usadas; (6) Fornecer dados sobre as características mecânicas e dielétricas das ferramentas; (7) Alertar sobre os cuidados que devem ser tomados quanto ao uso, conservação e recuperação. Tais objetivos têm caráter instrutivo (ou educativo/cognitivo) e não avaliativo. No contexto de um ambiente virtual para treinamento, tanto o caráter instrutivo como o avaliativo podem ser contemplados, de forma simultânea ou independente.



Figura 2. Atividade de manutenção em linha viva.

Existem mais de vinte atividades de manutenção que são comumente realizadas, dentre elas pode-se citar: troca de isolador de pino, troca de isolador de disco, troca de chave fusível, troca de pára-raios, troca de cruzeta, poda de árvores, emenda e/ou reparo de condutores, instalação de chave faca, retirada de objetos estranhos da rede e substituição de chave unipolar. Cada uma das atividades requer um conjunto de procedimentos distintos e específicos da atividade. Neste trabalho, definiu-se a atividade de troca de cruzeta para ser objeto do protótipo inicial do sistema, por esta ser uma operação considerada importante e frequente. Cada atividade possui uma sequência correta de procedimentos a serem seguidos. No caso da substituição de cruzeta, os procedimentos específicos da atividade consistem de um conjunto de 78 passos. A lista a seguir descreve os cinco primeiros passos:

1. Cobrir o neutro da baixa tensão
2. Cobrir a fase mais próxima (do electricista)
3. Cobrir a fase do meio
4. Cobrir o outro lado da fase mais próxima (em relação ao isolador)
5. Cobrir o isolador da primeira fase

De maneira geral, cada um dos passos a serem executados, no ambiente virtual, pode ser encarado como o ato de escolher um objeto e posicioná-lo corretamente. Os passos

devem ser realizados obedecendo à sequência correta.

No caso das atividades de manutenção em linha viva, aspectos físicos como o peso e a inércia dos equipamentos e das ferramentas utilizadas são, sem dúvida, relevantes. No entanto, tais aspectos têm sua representação limitada em ambientes virtuais imersivos.

Para simular simplesmente o peso e a resistência mecânica de um tijolo ao pegá-lo, por exemplo, seria necessário um dispositivo com resposta tátil (*force-feedback*) como, por exemplo, o *CyberForce* [19]. Neste trabalho, optou-se por não utilizar dispositivos com resposta de força, pois, além desse tipo de dispositivo ser, em geral, bastante caro, não traria ganhos consideráveis para o electricista em termos de aprendizado. Dessa maneira, este trabalho foca nos aspectos instrutivos do sistema, relacionados diretamente com os objetivos do treinamento descritos no manual [11].

A. Aspectos Educacionais

De maneira geral, quatro “modos” distintos para utilização de um sistema de treinamento virtual são possíveis [8]: (1) navegação e exploração interativa livre no ambiente virtual 3D podendo acessar conteúdo didático multimídia; (2) Apresentação com objetivo instrutivo de demonstrar como realizar determinada atividade (3) simulação guiada onde o usuário realiza uma tarefa e é monitorado de tal forma que, ao cometer um erro, o sistema responderá podendo alertá-lo e/ou demonstrar a maneira correta de fazer; e (4) o usuário realiza a simulação livremente e seu desempenho pode ser monitorado de forma transparente fornecendo um resultado no final [16].

O modo mais eficiente em termos educacionais é o modo 4, em que o usuário é livre para agir e realizar a tarefa sem qualquer suporte ou ajuda [8]. No contexto deste trabalho, quando a simulação é realizada, o treinando deverá agir no ambiente virtual como o faria na realidade. Basicamente, o treinando, já na posição próxima ao condutor energizado, indicará ao sistema quais equipamentos serão usados selecionando-os na cena e indicando onde este será reposicionado. Dessa maneira, durante a simulação, as tarefas do usuário basicamente consistem em: (1) selecionar objetos na cena e (2) movimentar o objeto de uma posição para outra. O electricista treinando deverá, a cada etapa, selecionar o objeto correto, obedecendo à sequência correta dos procedimentos. Além disso, ele deverá atentar para as distâncias e à manipulação segura dos objetos.

Apesar das equipes de linha viva serem formadas por grupos de três ou mais profissionais, na plataforma proposta, apenas um profissional será treinado por vez. A ênfase do trabalho está no treinamento do electricista que estará em contato direto com o condutor energizado. Nesse aspecto a simulação não pretende simular exatamente o que ocorre na realidade, mas sim verificar e incrementar as habilidades e conhecimentos de um único aluno. A participação de mais alunos será na posição de espectadores.

IV. PLATAFORMA E ARQUITETURA PROPOSTAS

O sistema foi desenvolvido na linguagem C++, em ambiente Linux (Ubuntu 9.10), e faz extensivo uso da biblioteca

OpenSceneGraph v2.8.2 para *rendering*, gerenciamento e otimização de grafos de cena. Também utiliza a máquina física *PhysX* para a simulação física, a biblioteca para controle de áudio *OpenAL* e, ainda, biblioteca *libCWiimote* para as funcionalidades do controle *Wii Remote*.

O *toolkit* *Open Scene Graph* foi escolhido por reunir uma série de características desejáveis, como, por exemplo, ser de código aberto, orientado a objetos, multiplataforma, eficiente para a esta proposta e possuir documentação e exemplos relativamente acessíveis em comparação a outras ferramentas livres de mesmo propósito. Para a simulação física a escolha se deu principalmente devido ao fato de que parte do processamento numérico pode ser realizado no processador gráfico das placas da *NVIDIA*, além do *PhysX* ter distribuição gratuita e possuir vasta documentação.

Quanto a hardware, o projeto inicialmente contemplava um *display* acoplado à cabeça (*HMD*), luvas com sensores e um conjunto de rastreadores de posição (*trackers*). Após um estudo mais detalhado e testes com alguns desses equipamentos, concluiu-se que esta combinação de dispositivos não era a melhor escolha para a plataforma final.

O monitor acoplado à cabeça *5DT HMD 800-26*, por exemplo, possui resolução de 800 por 600 pixels e oferece um campo de visão restrito, de 28° na horizontal e 21° na vertical, 26° na diagonal. Seu cabo e o peso de aproximadamente 600g diminuem o conforto e restringem a movimentação do usuário. Esse modelo custa em torno de USD4.000,00 e o modelo *5DT HMD 800-40*, com campo de visão de 40° na diagonal, custa em torno de USD10.000,00. Para a cena ser atualizada de acordo com a posição da cabeça do usuário do *HMD* é preciso usar um *tracker*. O modelo *Pollemus5 MINUTEMAN* com três graus de liberdade (3 *DOF* em inglês), ou seja, é capaz de detectar a inclinação em relação aos três eixos principais, custa aproximadamente USD1500,00. [17]

Ponderando essas características, optou-se por substituir o *HMD* por duas televisões *Mitsubishi WD-73735* de 73 polegadas. Essa televisão custa aproximadamente USD2.500,00 e possui resolução de 1920 por 1080, suporta a geração de imagens estereoscópicas e, com o usuário a 1,5 metros do centro da tela, fornece um campo de visão de 57,8° na horizontal e 40,5° na vertical. Dispondo outra televisão abaixo da primeira e com uma inclinação de 45° com a horizontal (Figura 3), o ângulo do campo de visão do usuário pode chegar a 81° na vertical. Ou seja, usando as duas televisões o campo de visão horizontal dobra e na vertical é quatro vezes maior comparado ao *HMD*.

⁵ <http://www.polhemus.com/>

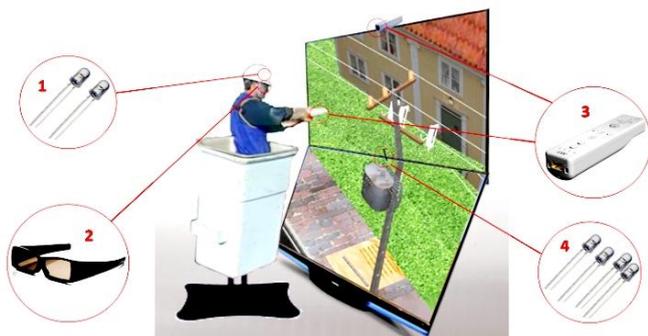


Figura 3. Plataforma proposta: (1) LEDs para o headtracker; (2) óculos para a visão 3D, (3) Wiimotes, (4) LEDs para o pointer.

Em geral, as atividades de manutenção em linha viva são realizadas com o electricista suspenso por uma grande haste e permanece dentro da chamada cesta isolada e, portanto, seus movimentos ficam limitados. A posição da cabeça não ultrapassa um metro de raio em torno da posição central ou inicial quando o electricista se inclina ou debruça. Essa situação configura um caso propício para utilização de um *head-tracker* (traçador da posição da cabeça) baseado no sistema apresentado por Johnny Lee [13].

No sistema de Lee o ponto de vista do usuário é rastreado por meio da câmera infravermelha de um Wii Remote, ou Wiimote (controle sem fio do video-game Nintendo Wii), o qual capta sinais de um par de LEDs (diodo emissor de luz) infravermelhos acoplados, por exemplo, aos óculos do usuário. Uma desvantagem desse sistema é que o usuário precisa estar no campo de visão da câmera, o que para este trabalho não representa nenhuma limitação considerando que o usuário possui restrição de movimentação.

Portanto, fixando um wiimote na televisão, a câmera infravermelha do wiimote pode detectar a posição de um par de LEDs emissores de luz infravermelha, instalado no capacete do electricista, por exemplo. Assim, o sistema pode rastrear a posição da cabeça do electricista e atualizar a imagem conforme o ponto de vista do usuário. Isso permite que o usuário movimente a cabeça para o lado e consiga ver um objeto oculto atrás de um outro objeto da mesma forma como fazemos, naturalmente, no “mundo real”.

O dispositivo principal de interação que inicialmente seria um par de luvas de dados (*dataglove*) foi substituído por um outro wiimote, controlado pelo treinando. Isso foi feito porque o wiimote pode ser usado como um “apontador” para movimentar objetos na cena virtual de maneira fácil e intuitiva, basta apontar, clicar e arrastar os objetos na cena. Enquanto a luva requer que o usuário memorize uma série de gestos [7]. O wiimote também tem a vantagem de ser mais robusto e resistente, uma vez que foi projetado para jogos eletrônicos.

Além disso, a diferença de custo entre os dois dispositivos é grande, um wiimote custa aproximadamente 2% do preço de uma *dataglove* simples. Por exemplo, um par de luvas 5DT Data Glove 5 Ultra (Figura 4) custa em torno de US\$2,000 enquanto o Wiimote custa US\$35.

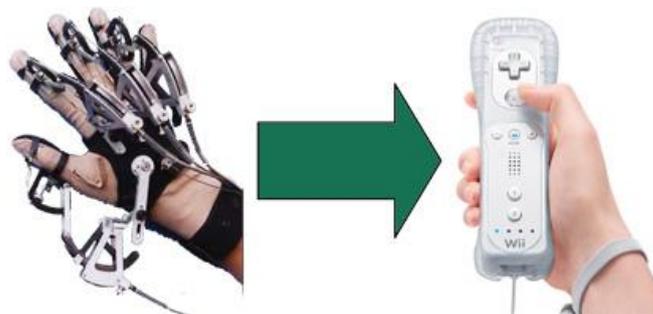


Figura 4. Utilização do wiimote ao invés do dataglove.

Dessa maneira, um wiimote é usado para rastrear a posição da cabeça do usuário e outro é usado para manipular os objetos da cena. As coordenadas 2D das fontes de luz IV, usadas como pontos de referência para o wiimote, são mapeadas para um cursor na tela, ou seja, funciona de forma semelhante a um mouse e permite selecionar e arrastar objetos na cena. Ao selecionar um objeto e “pegá-lo” pressionando um dos botões, o usuário passa a ter um controle 3D do objeto na cena. A distância entre os LEDs fornece a terceira coordenada, ou seja, a profundidade.

A. Modelo de Navegação e Visualização

Um aspecto importante na interação do usuário com o mundo virtual é a navegação no espaço 3D. Para o usuário sentir-se confortável para explorar e interagir com o ambiente virtual é desejável que a navegação possa ser realizada de forma fácil e natural.

Pesquisas têm sido realizadas no sentido de desenvolver dispositivos em que o usuário possa caminhar sobre alguma estrutura, a qual permanece fixa no mesmo lugar, e ter a sensação de estar andando livremente em um ambiente virtual. Alguns exemplos são o Virtusphere (<http://www.virtusphere.com/>), o CyberWalk (<http://www.cyberwalk-project.org/>) e o CirculaFloor [21]. Esses dispositivos têm a característica em comum de prover um mecanismo para que o usuário navegue no ambiente virtual caminhando, como o faz naturalmente. Uma outra categoria de dispositivo para navegação são os *joysticks*, outros são conhecidos como mouse 3D. Existem muitos modelos de mouses 3D, a principal característica desses dispositivos é prover controle dos 6 graus de liberdade (translação e rotação nas três direções). Dessa forma, o usuário pode desloca-se livremente pelo espaço como se estivesse voando.

No modelo de navegação proposto o wiimote aponta para a tela e controla o cursor como o mouse controla o cursor em um PC, portanto, é um cenário familiar para quem usa computador. Pressionando um botão o usuário controla a câmera virtual podendo rotá-la e, então, focá-la para qualquer ponto da cena de forma simples e intuitiva. Para transladar a câmera na direção do foco, ou seja, “andar para frente e para trás” o usuário, precisa apenas aproximar e afastar o controle da tela, respectivamente.

Assim o usuário pode navegar livremente no espaço 3D da cena. A velocidade da navegação é controlada pela aproximação ou afastamento do controle à tela. Ao pressionar um botão do controle, o sistema computa a distância entre os

LEDs e quando essa distância aumenta ou diminui, a velocidade aumenta no sentido positivo ou negativo proporcionalmente.

O usuário também pode mudar a posição e orientação da câmera movimentando a cabeça e assim obter um novo ponto de vista da cena devido ao *headtracker*. Isso promove a sensação de imersão e permite que o usuário mude a posição da câmera virtual sem utilizar diretamente o dispositivo de entrada e saída de dados. Os movimentos naturais e intuitivos que o usuário faz com o corpo visando obter um melhor ângulo de visualização da cena, alteram a posição da câmera buscando simular o que ocorre no “mundo real”.

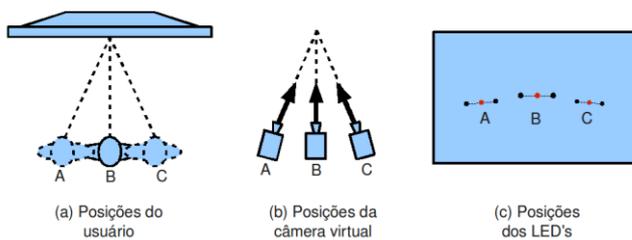


Figura 5. Headtracker. Esquema com três possíveis posições do usuário.

Na Figura 5 é mostrado o esquema do headtracker com o wiimote: em Figura 5 (a) é ilustrado três possíveis posições da cabeça do usuário (A, B e C) onde B é a posição inicial; em Figura 5 (b) é ilustrada a correspondente posição da câmera virtual; e em Figura 5 (c) é ilustrado como a câmera IR do wiimote “enxerga” os LEDs presos no óculos do usuário. Em cada posição, a câmera detecta três pontos que correspondem aos dois LEDs e o ponto médio do segmento de reta que liga os dois pontos extremos. Baseado na distância entre os dois LEDs é possível estimar a variação na distância do usuário à tela em relação à posição inicial e, com isso, transladar a câmera virtual para controlar o nível de *zoom*. O resultado é que, se o usuário se aproxima da tela, ele terá um campo de visão maior do mundo virtual, semelhante ao que acontece quando ele se aproxima de uma janela. Dessa forma, busca-se causar a sensação de que a tela funciona como uma janela para o mundo virtual.

Na Figura 6 é ilustrado o funcionamento do *headtracker* e é possível observar os diferentes pontos de vista do usuário correspondentes às diferentes posições onde ele se encontra.

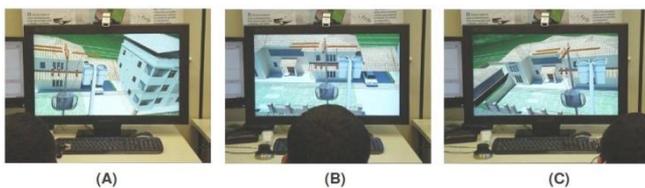


Figura 6. Funcionamento do headtracker.

Dessa forma, a câmera virtual é reposicionada, de acordo com a posição do usuário, de maneira que o *display* simule uma janela para o mundo virtual. O usuário pode se aproximar para aumentar o campo de visão ou se movimentar para o lado para observar objetos obstruídos por outros objetos na cena.

B. Modelo de Interação e Manipulação dos Objetos na Cena

Um dos principais objetivos do treinamento é garantir que o aluno lembre da sequência correta dos procedimentos que devem ser realizados durante a atividade de manutenção. Por exemplo, uma vez que o electricista encontra-se próximo ao condutor energizado, na posição correta para o início da atividade, ele deve primeiramente cobrir os cabos de baixa tensão utilizando uma cobertura isolante rígida. Então, em seguida, deve cobrir o cabo de alta tensão da fase mais próxima a ele. Passo-a-passo o electricista precisa executar os procedimentos obedecendo à sequência pré-determinada e utilizando os equipamentos corretos. De forma geral, podemos dizer que a atividade consiste de uma sequência de ações simples, envolvendo basicamente selecionar um equipamento e reposicioná-lo.

Dessa maneira é importante que o sistema ofereça formas de interação simples e intuitivas, em que o usuário possa selecionar objetos na cena e movimentá-los livremente no espaço 3D sem dificuldade ou limitações. Essa interação deve ser natural o suficiente para que o usuário possa concentrar-se na atividade em si, sem precisar memorizar comandos ou funções de botões. Além disso deseja-se que a interação ocorra de forma semelhante ao que ocorre na realidade para, dessa forma, preservar a sensação de imersão.

Tendo isso em mente e observando o comportamento humano quando transportamos algum objeto, especialmente algo que requer cuidado e atenção, nota-se que é comum permanecermos olhando para o objeto enquanto o deslocamos de um local para outro. De maneira bastante simplificada, pode-se dizer que permanecemos olhando o objeto durante o trajeto até que ambos, objeto e local de destino, estejam no campo de visão. Em um ambiente virtual, esse comportamento pode ser simulado fazendo com que o usuário controle a câmera, durante a movimentação de um determinado objeto, mantendo a posição desse objeto fixo em relação à câmera.

Por exemplo, em uma situação hipotética onde alguém está transportando uma xícara de café quente da cozinha até a mesa da sala. Durante o trajeto, é natural que esta pessoa fique olhando para a xícara enquanto caminha da cozinha até a sala. Certamente, tal pessoa continuará olhando para a xícara até que a mesa da sala também esteja no seu campo de visão, então, quando estiver ao seu alcance, ela repousará a xícara sobre a mesa.

Essa ideia é a base do modelo de interação desenvolvido para o sistema descrito nesse trabalho. A movimentação dos objetos contidos na cena virtual 3D foi feita usando o wiimote como dispositivo apontador. Basicamente o wiimote controla o cursor de forma semelhante a um apontador laser, como aqueles usados em apresentações. Uma diferença, no entanto, é que as fontes de luz IV precisam estar no campo de visão da câmera do wiimote, o que representa uma limitação mas não impede o funcionamento correto. O cursor é utilizado para selecionar um objeto na cena, ou seja, quando o cursor encontra-se sobre um objeto, esse objeto muda sua coloração indicando ao usuário que é um objeto selecionável e que “está na mira”. Se o usuário pressionar o botão B do wiimote o cursor passa a rotacionar a câmera virtual, exata-

mente da mesma maneira que ocorre no modelo de navegação, no entanto, agora, o objeto também está sendo movimentado, mas mantém-se fixo em relação à câmera.

É comum, em computação gráfica, descrever a localização e orientação da câmera por meio de um conjunto de três vetores, por exemplo, os vetores *up*, *eye* e *center*, são utilizados na especificação da câmera em OpenGL [22].

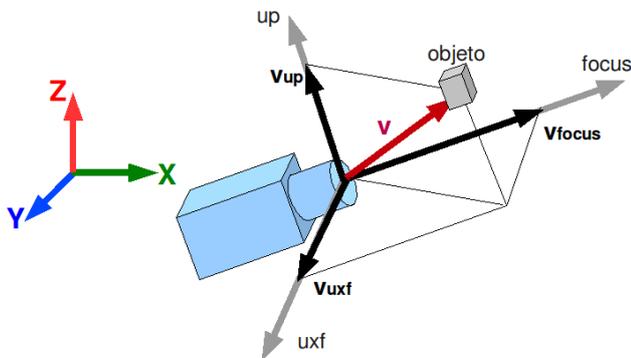


Figura 7. Manipulação da câmera e do objeto virtual.

Na Figura 7 é mostrada o esquema do posicionamento do objeto em relação à câmera virtual que foi usado neste trabalho. Os vetores que definem a câmera são chamados *up*, *focus* e *uxf* e o vetor *v* define a posição do objeto em relação à câmera. Para manter o objeto fixo em relação à câmera basta descrever o vetor *v* em relação às suas componentes nas direções dos vetores que definem a câmera.

Da mesma forma como ocorre no modelo de navegação, o usuário pode rotacionar a câmera apenas movimentando o cursor. Levando o cursor para a direita ou para a esquerda, na tela, a câmera é rotacionada em relação ao vetor *up*, ou seja, é como olhar para um ou outro lado. Levando o cursor para cima e para baixo a câmera rotaciona em relação ao eixo *uxf*, ou seja, é como olhar para cima ou para baixo, respectivamente. Dessa maneira, o usuário tem total controle sobre qual direção ele quer visualizar. Além disso o objeto permanece dentro do campo de visão, fixo em relação à câmera, enquanto é movimentado.

Para completar o modelo de interação, o usuário precisa também poder soltar o objeto em qualquer posição da cena. Ou seja, além de rotacionar livremente a câmera, o usuário deve poder transladar no sentido de aproximar ou afastar o objeto de si, ou melhor, da câmera virtual. Em outros termos, observando a Figura 7, temos que o objeto se afasta da câmera se o vetor *v* for multiplicado por um número maior que um e se aproxima da câmera se *v* for multiplicado por um número entre zero e um. Então, controlando o tamanho do vetor *v* e a direção para onde a câmera aponta, o usuário pode soltar o objeto em qualquer ponto da cena 3D.

A forma como o usuário altera o tamanho do vetor *v* no modelo de interação aqui apresentado é simplesmente aproximando e afastando o controle wiimote da tela, ou display. Ou seja, se o usuário deseja projetar o objeto para “dentro da tela” basta que aproxime o controle da tela. Dessa maneira, movendo o wiimote para “frente” e para “trás” o objeto virtual é deslocado nos sentidos “para dentro” e “para fora” da tela respectivamente. A implementação desse método é relativamente simples e a ideia por trás é extremamente

simples, pois baseia-se apenas na distância entre os dois pontos de referência, ou fontes de luz IR, fixados na tela. Quanto mais afastado o wiimote está das fontes de luz IR mais próximos os pontos aparecem na câmera e vice-versa.



Figura 8. Testes de navegação e manipulação.

Basicamente, as coordenadas do ponto médio entre os LEDs da tela fornecem os deslocamentos 2D e a distância entre os LEDs fornecem a terceira coordenada. Os dois LEDs que são a referência para o wiimote na mão do usuário ficam posicionados no friso do televisor. Uma dificuldade nesse sentido é que os LEDs precisam estar no campo de visão da câmera do wiimote. Há, portanto, uma relação de proporção entre o deslocamento do wiimote controlado pelo usuário e o deslocamento do objeto na cena virtual. Por exemplo, cada 20 cm de translação do wiimote correspondem a um metro na cena.

A Figura 8 mostra o usuário movimentando o objeto virtual através da aproximação do wiimote em relação aos LEDs localizados entre as TVs. Nesta figura é mostrada a interação do usuário com o sistema em testes preliminares, ainda sem o suporte apresentado na ilustração da Figura 3 para manter as TVs alinhadas a 45° de inclinação uma da outra.

Nas Figuras 9 e 10 são mostradas imagens da tela do aplicativo. Na primeira imagem aparece parte da cena com alguns elementos do cenário 3D como construções, automóveis na rua e vegetação. Na segunda imagem, com um ângulo mais próximo do poste, é mostrada uma etapa onde alguns passos da atividade já foram realizados.



Figura 9. Captura de tela mostrando a cena 3D



Figura 10. Captura de tela mostrando alguns passos da atividade já realizados

V. CONCLUSÃO

Este artigo relata o desenvolvimento de uma plataforma baseada em Realidade Virtual semi-imersiva para treinamento de atividades em linha viva (linha energizada). Conceitos sobre elementos da tecnologia de Realidade Virtual e do desenvolvimento de sistemas gráficos 3D interativos foram apresentados. Os modelos de navegação e de interação foram descritos em detalhes. Aspectos sobre as escolhas de software e hardware e a definição da plataforma final foram discutidos. Como resultado e principal contribuição foi proposto um novo modelo de interação e navegação em um ambiente 3D para um sistema de treinamento de atividades de manutenção em linha viva.

Quanto a produção técnico científica o presente trabalho serviu de base para a elaboração de três artigos publicados e apresentados em congressos relacionados à área de educação, engenharia e realidade virtual: ICBL[20], CILAMCE[17] e SVR[16], respectivamente. Além da aceitação de um artigo em periódico (Revista Espaço Energia).

Ter conhecimento da real contribuição do software desenvolvido para o processo de treinamento em linha viva é uma tarefa complexa. Requer um criterioso processo de avaliação com vários usuários e análise do comportamento dos mesmos durante e, também, depois do treinamento. Tais atividades de avaliação serão contempladas em projetos futuros.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do bolsista de iniciação científica e graduando em engenharia civil Yuri Grubber por todo o trabalho de design 3D exercido e o esmero nos detalhes que possibilitaram tornar o sistema mais realista. Aos estagiários e graduandos em ciência da computação Luis Carlos Miranda e Rodrigo Maia Escorsim que contribuíram com vários aspectos do projeto, desde codificação até a elaboração de circuitos de LEDs para os wiimotes. Ao analista de sistemas Cesar Andreazza que contribuiu com a aplicação da biblioteca OpenAL para utilização de áudio no sistema. A secretária do CESEC Maristela Bandil por seu sorriso e sua palavra amiga em todos os momentos.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. BURDEA, and P. COIFFET, *Virtual Reality Technology*. 2 ed. Wiley, New Jersey, 2003.
- [2] C. BELARDINELLI, E. BLÜMEL, G. MÜLLER, and M. SCHENK, "Making the virtual more real: research at the fraunhofer iff virtual development and training centre". *Cognitive Processing*, 9(3):217–224, 2008.
- [3] E. E. R. Russo, A. B. Raposo, T. Fernando, and M. Gattass. "A Realidade Virtual na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo". In: R. TORI, C. KIRNER E R. SISCOOTTO, Ed(s), *Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada*. Porto Alegre: SBC, 2006, p. 313-318.
- [4] PETROBRAS, Site oficial. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br>>. Acessado em: 18 de Maio de 2009.
- [5] EMBRAER, Site Oficial. Disponível em: <<http://www.embraer.com.br>>. Acessado em: 18 de Maio de 2009.
- [6] C. H. PARK, G. JANG, and Y.H. CHAI, "Development of a Virtual Reality Training System for Live-Line Workers." In: *International Journal of Human-Computer Interaction*, Volume 20, Issue 3 July 2006, p.285-303.
- [7] J. E. BROUGH, M. SCHWARTZ, S. K. GUPTA, D. K. ANAND, R. KAVETSKY, AND R. PETERSEN. "Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operations". Springer-Verlag London 2007. *Virtual Reality* (2007), p.189-206.
- [8] S. GERBAUD, N. MOLLET, F. GANIER, B. ARNALDI, AND J. TISSEAU. "GVT: a platform to create virtual environments for procedural training." In: *Virtual Reality Conference*, 2008. VR '08. IEEE. 8 a 12 de Março de 2008, p. 225-232.
- [9] G. GAZIN. "Virtual reality used to train next generation of workers", *reliable plant magazine*. Disponível em: <http://www.reliableplant.com/Article.aspx>, Acessado em: 18 de Janeiro de 2010.
- [10] T. BARNES, L. M. ENCARNAÇÃO, AND C. D. SHAW. *Serious games*. *Computer Graphics and Applications*, IEEE, 29(2):18–19, March-April 2009.
- [11] C. C. P. de Energia. *Manual do Curso: linha viva de distribuição método ao contato, tensão 13,8 KV*. COPEL, 2008.
- [12] P. MARTZ, *OpenSceneGraph Quick Start Guide*. PMARTZ Computer Graphics Systems, 2007.
- [13] J. C. LEE, *Hacking the Nintendo Wii Remote*. In: *IEEE Pervasive Computing*. v.7, n.3, 2008, p. 39-45.
- [14] M. WEISER. "The computer for the 21 century." *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. ACM. New York, NY, USA* 1999.
- [15] T. P. FALCÃO AND A. S. GOMES. "Design de interfaces tangíveis educacionais: uma metodologia baseada em contexto". In *IHC '06: Proceedings of VII Brazilian symposium on Human factors in computing systems*, pages 13–16, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [16] T. M. BURIOL, M. ROSENDO, K. DE GEUS, S. SCHEER, and C. E. FELSKY. "Ambiente virtual 3D para treinamento de atividades críticas com base em conceitos de computação pervasiva e interação tangível." In: *SVR 2010 - XII Symposium on Virtual and Augmented Reality*, 2010, Natal - RN. Proceeding of XII Symposium on Virtual and Augmented Reality, 2010.
- [17] T. M. BURIOL, M. ROSENDO, K. DE GEUS, S. SCHEER, C. E. FELSKY, E. OTTO FILHO, J. C. GOULART. "Proposta de Plataforma Baseada em Realidade Virtual Para Treinamento de Atividades em Linha Viva." In: *30 CILAMCE - Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, 2009, Armação de Búzios. Anais do 30 CILAMCE - Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia. Rio de Janeiro : UFRJ, 2009. v. 1. p. 1-13.
- [18] C. CHAE AND K. KO. "Introduction of physics simulation in augmented reality." In *Ubiquitous Virtual Reality, 2008. ISUVR 2008. International Symposium on*, pages 37–40, July 2008.
- [19] I. T. Company. Site oficial da Immersive Technologies. Disponível em: <http://www.immersivetechologies.com>, Acessado em: 17 de Janeiro de 2010.
- [20] T. M. BURIOL, M. ROSENDO, K. DE GEUS, S. SCHEER, and C. E. FELSKY. "A virtual reality training platform for live line maintenance of power distribution networks." In: *ICBL2009 - International Conference on Interactive Computer Aided Blended Learning*, 2009, Florianópolis. Proceedings of the conference ICBL2009. Kassel, Germany : Kassel University Press, 2009. v. 1. p. 1-13.
- [21] H. IWATA, H. YANO, H. FUKUSHIMA, AND H. NOMA. "Circulafloor". *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25:64–67, 2005.

- [22] N. CHIN, C. FRAZIER, P. HO, AND K. P. S. ZICHENG LIU. *The OpenGL Graphics System Utility Library Version 1.3*. Editor Jon Leech, 1998.