

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

DEISE GALVÃO DE SOUSA GONÇALVES

**SISTEMA DE DETECÇÃO VIRTUAL DE FONTES RADIOATIVAS
PARA TREINAMENTO E PLANEJAMENTO DE SEGURANÇA FÍSICA
DE UMA INSTALAÇÃO NUCLEAR**

**Rio de Janeiro
2014**

DEISE GALVÃO DE SOUSA GONÇALVES

**SISTEMA DE DETECÇÃO VIRTUAL DE FONTES RADIOATIVAS
PARA TREINAMENTO E PLANEJAMENTO DE SEGURANÇA FÍSICA
DE UMA INSTALAÇÃO NUCLEAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear – Acadêmico em Engenharia de Reatores.

Orientador: Prof. Antônio Carlos de Abreu Mól, D. Sc.
Coorientador: Mauricio Alves da Cunha e Aghina, D. Sc.

Rio de Janeiro
2014

GALV Galvão de Sousa Gonçalves, Deise.

Sistema de detecção virtual de fontes radioativas para treinamento e planejamento de segurança física de uma instalação nuclear/ Deise Galvão de Sousa Gonçalves – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2014.

PAGINAS f.

Orientador: Antônio Carlos de Abreu Mól.

Coorientador: Mauricio Alves da Cunha e Aghina.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2014.

1. Dosimetria. 2. Realidade Virtual.

SISTEMA DE DETECÇÃO VIRTUAL DE FONTES RADIOATIVAS PARA
TREINAMENTO E PLANEJAMENTO DE SEGURANÇA FÍSICA DE
UMA INSTALAÇÃO NUCLEAR

Deise Galvão de Sousa Gonçalves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE
ENGENHARIA NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA
NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
NUCLEAR – ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE REATORES

Aprovada por:

Prof. Antônio Carlos de Abreu Mól, D. Sc.

Prof. Claudio Marcio do Nascimento Abreu Pereira, D. Sc.

Mauricio Alves da Cunha e Aghina, D. Sc.

Nozimar do Couto, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2014

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Antônio Carlos de Abreu Mól, pela orientação e apoio ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Aos colaboradores e amigos do LabRV, Ana Paula Legey, André Cotelli, Daniel Chelles, Daniel Mól, Eugenio Rangel e Mauricio Aghina, que participaram direta e indiretamente deste trabalho. Sem vocês este trabalho não se tornaria realidade.

A todos os professores e funcionários da Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares pelo convívio e aprendizado, em especial ao Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa e à ex-funcionária Janaina Maria Borges Nogueira.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear que, através do Instituto de Engenharia Nuclear, proporcionou a estrutura necessária para a conclusão desta dissertação.

Às minhas amigas Gabriela Carvalho e Josiane Araújo. A amizade e apoio de vocês foram fundamentais para a concretização deste objetivo.

Aos meus pais, Silbene Galvão de Sousa Gonçalves e Vitorino Alvarenga Gonçalves, pelo amor, incentivo, educação e confiança depositada em mim. Por vocês e para vocês, sempre.

E finalmente ao meu noivo, Bruno Mendes da Cruz, por seu apoio, paciência, incentivo e amor. Você foi minha força e minha calma nestes últimos meses. Obrigada por existir na minha vida.

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de detecção virtual de fontes radioativas, visando auxiliar o treinamento e planejamento da segurança física nuclear. Para tal, criou-se um modelo virtual tridimensional do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) dotado de personagens virtuais (avatars), capazes de transitar e interagir com o meio, e detectores de radiação (fixos e portáteis) e fontes radioativas. A ferramenta desenvolvida possibilitou a simulação de detecção de indivíduos portando fontes radioativas por meio de detectores instalados em pontos estratégicos do sítio. Além disso, foi possível descobrir e localizar fontes pelo manuseio de detectores portáteis, operados pelos personagens dentro do ambiente virtual. Os resultados obtidos apresentaram a simulação da detecção de radiação diante do perfil contínuo de fontes radioativas, tornando possível avaliar a taxa de dose em qualquer posição do ambiente virtual. Desse modo, este trabalho poderá, futuramente, auxiliar tanto no treinamento de agentes de segurança bem como na avaliação da segurança radiológica do sítio nuclear.

Palavras-chave: Realidade Virtual, dosimetria, radioproteção.

ABSTRACT

The present paper proposed the development of a virtual tool to detection of radioactive sources, to assist in the training and planning of nuclear physical security. For such, a three-dimensional virtual model of the Institute of Nuclear Engineering (IEN) endowed with virtual characters (avatars), able to roam and interact with the environment, radiation detectors (fixed and portable) and radioactive sources. The developed tool enable the simulation of detection of individuals carrying radioactive sources through detectors installed at strategic points of the site. In addition, it was possible to detect and locate sources through handling portable detectors, operated by characters within the virtual environment. The results obtained showed the radiation detection simulation on continuous profile of radioactive sources, making it possible to evaluate the dose rate at any position of the virtual environment. Thus, this work can assist in the future both in the training of security officers as well as in the evaluation of radiological safety of the nuclear site.

Keywords: Virtual Reality, dosimetry, radioprotection.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	13
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2. PROBLEMA.....	14
1.3. TRABALHOS RELACIONADOS.....	14
1.4. PROPOSTA.....	16
1.5. DISTRIBUIÇÃO DOS CAPÍTULOS	16

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1. SEGURANÇA FÍSICA	18
3.1.1. Segurança física na área nuclear.....	22
3.2. DOSIMETRIA	28
3.2.1. Detectores de radiação	28
3.2.2. Principais características em detectores	29
3.2.3. Detectores de cintilação	31
3.3. REALIDADE VIRTUAL	32
3.3.1. Ambientes Virtuais	33
3.3.2. Avatares	34
3.3.3. Ferramentas de Modelagem	34
3.3.3.1. Autodesk 3ds Max.....	35
3.3.4. Motores de Jogos.....	36
3.3.4.1. Unity 3D	37

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA	40
4.1. MODELAGEM VIRTUAL DO AMBIENTE.....	40
4.1.1. Edificações.....	41
4.1.2. Terrenos.....	43
4.1.3. Dosímetros.....	44
4.2. IMPLEMENTAÇÕES.....	46
4.2.1. Fontes Radioativas.....	46
4.2.2. Detector de Radiação Portátil.....	47
4.2.3. Detector de Radiação Fixo.....	48

CAPÍTULO 5

TESTES E RESULTADOS	50
5.1. INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR	50
5.1.1. LabRV	51
5.2. AVALIAÇÃO DO AMBIENTE VIRTUAL.....	52
5.3. ESTIMATIVA DE DOSES.....	59
5.3.1. Aquisição de Dados	59
5.4. VALORES DE TAXAS DE DOSES.....	60
5.5. TAXAS DE DOSES NO AMBIENTE VIRTUAL.....	61
5.6. EXPERIMENTO COM UMA FONTE RADIOATIVA.....	62
5.7. EXPERIMENTO COM MÚLTIPLAS FONTES RADIOATIVAS.....	63

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO	65
6.1. TRABALHOS FUTUROS.....	66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
---	-----------

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Principais elementos de uma fotomultiplicadora acoplada a um cristal de cintilação.....	35
Figura 3.2 – Ferramenta de modelagem Autodesk 3ds Max.....	36
Figura 3.3 – Motor de jogos Unity 3D.....	39
Figura 4.1 – Menu de acesso ao Sistema de Detecção Virtual de Fontes Radioativas.....	41
Figura 4.2 – Modelagem dos edifícios no Autodesk 3ds Max sem textura.....	42
Figura 4.3 – Modelagem dos edifícios no Autodesk 3ds Max com textura.....	43
Figura 4.4 – Modelagem do terreno no Unity 3D.....	44
Figura 4.5 – Modelagem do dosímetro portátil.....	45
Figura 4.6 – Modelagem do dosímetro fixo.....	46
Figura 4.7 – Marcador representando fonte radioativa no ambiente virtual.....	47
Figura 4.8 – Visualização do dosímetro portátil.....	48
Figura 4.9 – Dosímetro fixo.....	49
Figura 5.1 – Localização do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN, 2013).....	51
Figura 5.2 – Fotografia da portaria principal do IEN, lado interno.....	53
Figura 5.3 – Imagem extraída do ambiente virtual da portaria principal do IEN, lado interno.....	53
Figura 5.4 – Fotografia da portaria secundária do IEN.....	54
Figura 5.5 – Imagem extraída do ambiente virtual da portaria secundária do IEN....	55
Figura 5.6 – Fotografia do estacionamento do IEN.....	55
Figura 5.7 – Imagem extraída do ambiente virtual do estacionamento do IEN.....	56
Figura 5.8 – Fotografia do caminho interno entre a portaria principal e a portaria secundária.....	56
Figura 5.9 – Imagem extraída do ambiente virtual do caminho interno entre a portaria principal e a portaria secundária.....	57
Figura 5.10 – Fotografia da entrada do IEN com vista externa da portaria principal.	57
Figura 5.11 – Imagem extraída do ambiente virtual da entrada do IEN com vista externa da portaria principal.....	58
Figura 5.12 – Fotografia do prédio onde está o LabRV.....	58
Figura 5.13 – Imagem extraída do ambiente virtual do prédio onde está o LabRV...	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características de alguns detectores de radiação	30
Tabela 5.1 – Taxas de doses medidas no Instituto de Engenharia Nuclear	61
Tabela 5.2 – Doses recebidas pelo avatar no ambiente virtual	62
Tabela 5.3 – Doses detectadas pelo dosímetro fixo durante deslocamento de uma fonte radioativa	63
Tabela 5.4 – Doses de duas fontes detectadas pelo dosímetro portátil	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEN – Instituto de Engenharia Nuclear

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

LabRV – Laboratório de Realidade Virtual, IEN, Brasil

RV – Realidade Virtual

3D – Tridimensional

AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica

ICRP – *International Commission on Radiological Protection*

NERAC – *Nuclear Energy Research Advisory Committee*

CPS – *Counts per second*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A segurança física de instalações nucleares tem sido uma preocupação constante da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Através de relatórios e normas definidos no *Nuclear Security Plan 2010-2013* (IAEA, 2009), a AIEA apresenta orientações quanto ao controle e à segurança de materiais radioativos em sítios nucleares. Para atender tais recomendações, realizam-se, de forma periódica, treinamentos e simulações com suas equipes de segurança nas instalações nucleares.

A realização de treinamentos na área nuclear pode envolver riscos de contaminação radioativa aos seres humanos, o que pode acarretar danos à sua saúde devido aos efeitos somáticos e genéticos produzidos pelas radiações ionizantes. De acordo com a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection – ICRP*), é recomendado que indivíduos ocupacionalmente expostos não ultrapassem um limite de dose acumulada de 3rem por trimestre, tornando relevante o controle da taxa de exposição (ou dose) a que determinado local ou indivíduo está exposto (Filho, 2004).

Materiais radioativos são empregados nas mais diversas finalidades como produção de energia, medicina, biologia, agricultura e pecuária; dessa maneira, a ciência nuclear tornou-se fundamental para proporcionar melhores condições de vida à sociedade. Contudo, a má utilização desses recursos figura-se como um perigo eminente, justificando, por exemplo, a existência de normas como a CNEN-NE-2.01.2011 – Proteção Física de Unidades Operacionais da Área Nuclear, e de políticas internacionais, como o Tratado de Não Proliferação Nuclear. Sendo assim, observou-se, nos últimos anos, uma crescente preocupação com a segurança física das instalações nucleares e, conseqüentemente, o aumento de estudos, procedimentos e normas visando minimizar os riscos existentes. Os sítios nucleares são alvos de constante atenção devido à existência de materiais radioativos em suas

dependências. O acesso indevido a essas fontes de radiação pode representar um grande perigo para a população.

1.2. PROBLEMA

Diversas são as instalações nucleares que realizam o manuseio e o armazenamento de materiais radioativos. Possíveis falhas de segurança física nesses sítios podem apresentar-se como um relevante problema, visto que salvaguardar o acesso a tais fontes deve ser uma prioridade para essas instalações.

Além disso, é deveras importante que sejam realizados treinamentos e simulações sem interferir no funcionamento da instalação e, principalmente, sem expor os indivíduos a riscos de contaminação radiológica diante de possíveis cenários diversos.

1.3. TRABALHOS RELACIONADOS

O uso de Realidade Virtual em atividades não vinculadas ao entretenimento tornou-se, ao longo dos últimos anos, uma constante. Estes projetos dedicam-se a empregar o arcabouço de técnicas e ferramentas já desenvolvidas para o mercado regular de RV no desenvolvimento de jogos educacionais, simuladores, sistemas dedicados à realização de treinamentos médicos, militares, etc. Em segurança física e na engenharia nuclear, essa tendência também é evidente em diversas publicações, que demonstram a utilização de sistemas de RV como opções alternativas e complementares aos treinamentos reais.

O Laboratório Virtual de Física Nuclear, desenvolvido por Dias et al., (2002), utilizou técnicas de Realidade Virtual para desenvolver uma ferramenta de apoio ao ensino de Física Nuclear, destinado a simular o funcionamento de um detector de radiação do tipo Geiger-Müller. Este programa, escrito em Visual Basic, implementa as principais características dos contadores comumente comercializados, bem como disponibiliza a modelagem de três amostras radioativas e placas absorvedoras.

O trabalho *Virtual environments simulation for dose assessment in nuclear plants*, Mól et al. (2009), apresenta um estudo de caso relativo à utilização de um

motor de jogo na realização de simulações e treinamentos em ambientes virtuais de plantas nucleares. O objetivo central do trabalho é auxiliar na estimativa da dose em rotinas operacionais, possibilitando sua minimização.

Outra relevante contribuição para a área nuclear é o sistema CIPRES (Ródenas, 2004), desenvolvido pela IBERINCO (*Iberdrola Ingeniería y Consultoría*) e pela Universidad Politécnica de Valencia, que permite o treinamento de operadores de instalações nucleares simulando operações de recarga de combustível.

Um importante trabalho na área de dosimetria é o sistema denominado Vrdose (IFE Halden Virtual Reality Centre, 2002), capaz de exibir a distribuição da taxa de dose e fornecer estimativa de doses ocupacionais para cenários de trabalho em instalações nucleares.

Dentre os trabalhos relacionados, existe um tipo particular de estudos que norteou o presente trabalho: ambientes computacionais virtuais desenvolvidos por meio de motores de jogos, que são ferramentas para a produção de jogos e auxiliares no desenvolvimento de sistemas de simulação (Mól, 2008). A utilização de motores de jogos para sistemas de simulações abriu uma nova área chamada *serious game*. Diferentes pesquisas têm demonstrado as aplicabilidades dos núcleos de jogos, que incluem o treinamento de situações de emergência (Jacobson, 2005; Jain, 2005; Chatam, 2007; Badler, 2002; Hajek, 2004). Na área nuclear, motores de jogos têm sido usados principalmente na simulação de operações em instalações com níveis de radiação acima dos padrões naturais (Freitas, 2011; Ródenas, 2004).

Por fim, o trabalho desenvolvido por Freitas *et al.* (2009), intitulado *Determinação de dose de radiação, em tempo real, através de inteligência artificial e realidade virtual*, dedica-se à determinação de dose de radiação no interior do reator de pesquisa Argonauta, instalado no Instituto de Engenharia Nuclear – IEN. Esse sistema utiliza o motor de jogo Unreal Engine, aliado a técnicas de inteligência artificial, para promover a modelagem em três dimensões da sala do reator, sendo dotado da capacidade de inferir a taxa de dose em cada ponto do local. O trabalho possibilita a realização de simulações e treinamentos, estimando a dose recebida por cada trabalhador envolvido no procedimento.

1.4. PROPOSTA

Este trabalho propõe a criação e a implementação de um sistema computacional de dosimetria virtual, baseado em tecnologia de Realidade Virtual, utilizando núcleo de jogos. A finalidade desse sistema é a realização de treinamentos e simulações, dotados de detectores virtuais de radiação, portáteis e móveis, com intuito de contribuir para o controle e a segurança física nuclear deste Instituto.

1.5. DISTRIBUIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está distribuído em capítulos, sendo o próximo, Capítulo 2, destinado à apresentação dos objetivos geral e específicos desta dissertação. No Capítulo 3 serão apresentadas as fundamentações teóricas envolvidas, a dosimetria e a Realidade Virtual. O Capítulo 4 destina-se à exposição da metodologia empregada no decorrer do trabalho. No Capítulo 5 serão descritos os testes e os resultados obtidos e, por fim, no Capítulo 6 está a exibição das principais conclusões obtidas do trabalho realizado.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização de um motor de jogos no desenvolvimento de uma ferramenta de dosimetria virtual para localização e detecção de fontes radioativas, que vise auxiliar o planejamento de segurança física de uma instalação nuclear.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a modelagem tridimensional e a programação de alguns detectores de radiação;
- Avaliar a modelagem tridimensional de uma instalação nuclear real;
- Simular a detecção de indivíduos portando fontes radioativas, por meio de detector fixo, instalado dentro do ambiente virtual;
- Simular a detecção e localização de fontes radioativas, por meio de detector portátil, operado pelo personagem dentro do ambiente virtual.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. SEGURANÇA FÍSICA

Entende-se por segurança física os aspectos relacionados à prevenção de acesso físico de pessoas não autorizadas a áreas seguras. Um planejamento de segurança física deve evitar que pessoas sem permissão consigam adentrar áreas restritas, evitando contato físico, acesso a dados e interferências não desejadas. Instalações que necessitem de restrição de acesso devem localizar-se em regiões seguras, cercada por um perímetro de segurança bem definido e protegido com barreiras de segurança, como cercas e muros, e controle eficiente de acessos permitidos. É conveniente que tais instalações possuam proteção condizente com o nível de risco existente.

Diversos setores, públicos e privados, que armazenam material crítico ou restrito, pensam a segurança física como ponto importante de sua organização. Utilizando como exemplo a Norma Brasileira ABNT NBR ISSO/IEC 17799, referente a técnicas de segurança aplicadas à tecnologia da informação, observam-se diversos requisitos de segurança física destinados à proteção de equipamentos computacionais portadores de informações sigilosas, à proteção contra roubos, sabotagens e acessos indevidos. De acordo com essa regulamentação, áreas consideradas seguras devem ater-se a seis principais aspectos:

- Perímetro de segurança física: indica-se a utilização de perímetros de segurança formados por barreiras como cercas, grades, paredes, portões de entrada controlados (por cartões ou recepcionistas), etc. Principais diretrizes:
 - Perímetros bem definidos, com localização e capacidade de resistência adequadas aos requisitos de segurança desta área (estabelecidos a partir dos ativos existentes e dos resultados da análise de riscos).
 - Perímetros fisicamente sólidos, sem brecha ou pontos de fácil invasão, paredes externas robustas e todas as aberturas (portas e janelas)

externas sejam adequadamente protegidas contra acesso não autorizado por meio de mecanismos de controle como barras, alarmes e fechaduras.

- Existência de área de recepção para controlar o acesso físico ao local.
 - Quando necessário, existência de barreiras físicas para impedir o acesso físico não autorizado e a contaminação do meio ambiente.
 - Portas corta-fogo providas de alarme, monitoradas e testadas juntamente com as paredes, para estabelecer o nível de resistência exigido, de acordo com normas regionais, nacionais e internacionais aceitáveis.
 - Sistemas adequados para detecção de intrusos que cubram todas as portas e janelas acessíveis; as áreas não ocupadas devem ser protegidas por alarmes o tempo todo.
 - Separação física das instalações de processamento da informação gerenciadas pela organização daquelas que são gerenciadas por terceiros.
- Controles de entrada física: indica-se que áreas seguras possuam controles apropriados, assegurando que somente pessoas autorizadas tenham acesso ao local. Principais diretrizes:
 - Devem ser registrados os históricos de visitantes, com data e hora da entrada e saída e visitantes sem acesso previamente aprovado devem ser supervisionados; as permissões de acesso devem ser concedidas somente para finalidades específicas e autorizadas, e emitidas com instruções sobre os requisitos de segurança da área e os procedimentos de emergência.
 - O acesso às áreas críticas deve ser controlado e restrito às pessoas autorizadas, preferencialmente com controles de autenticação.

- Uso de identificação visível para todos (funcionários, fornecedores e visitantes), com instrução para alertarem a segurança ao encontrar alguém não acompanhado ou não identificado.
- Funcionários terceirizados que realizam serviços de suporte devem ter acesso restrito às áreas seguras ou, quando for necessário, este acesso deve ser autorizado e monitorado.
- As permissões de acesso a áreas seguras devem ser revistas e atualizadas em intervalos regulares.
- Segurança em escritórios, salas e instalações: indica-se que tais locais sejam projetados e construídos com segurança física. Principais diretrizes:
 - Estes ambientes devem estar de acordo com os regulamentos e normas de segurança e saúde.
 - As principais instalações devem estar localizadas de maneira a evitar o acesso do público.
 - As edificações críticas não devem possuir placas, letreiros ou indicação de sua finalidade, dificultando a identificação de informações ou conteúdos restritos ali armazenados.
 - Listas de funcionários e telefones que identifiquem a localização das instalações de áreas seguras não devem ficar acessíveis ao público.
- Proteção contra ameaças externas e do meio ambiente: indica-se que áreas seguras sejam projetadas e construídas com proteção contra incêndios, desastres naturais (como enchentes, terremotos, etc.), explosões e perturbações da ordem pública. Principais diretrizes:
 - O armazenamento de materiais perigosos ou combustíveis deve ser realizado distante de áreas de segurança, assim como o armazenamento e suprimentos em grande volume.

- Equipamentos destinados à cópia de segurança de dados digitais e de contingência devem ser armazenados a uma distância segura, para estarem a salvo em caso de desastres na área de segurança.
- Equipamentos destinados à detecção e ao combate a incêndios devem ser corretamente providenciados e posicionados.
- Trabalhando em áreas seguras: indica-se que o trabalho em áreas seguras seja projetado e implantado para atender requisitos de proteção física com diretivas bem estabelecidas. Principais diretrizes:
 - A existência de áreas seguras (ou de atividades nelas realizadas) deve ser divulgada aos trabalhadores apenas quando estritamente necessário.
 - Trabalho não supervisionado em áreas seguras deve ser evitado, tanto por motivos de segurança como para prevenir possíveis atividades mal-intencionadas.
 - As áreas seguras que não estão sendo utilizadas devem permanecer trancadas e receber inspeção periodicamente.
 - A utilização de máquinas fotográficas, gravadores de vídeo, áudio, etc., deve, via de regra, ser proibida.
- Acesso do público, áreas de entrega e de carregamento: indica-se que os pontos de acesso para pessoas que não são previamente autorizadas possam entrar nas instalações sejam controlados e, se possível, isolados das instalações de áreas críticas, evitando o acesso não autorizado. Principais diretrizes:
 - Somente pessoal identificado e autorizado pode acessar área de entrega e carregamento que ligue ao exterior da área segura.
 - Áreas destinadas à entrega e ao carregamento devem ser projetadas para permitir entregas sem possibilitar aos entregadores acesso a outras partes da área segura.

- Acessos externos devem ficar protegidos durante os procedimentos enquanto as portas internas estiverem abertas.
- Deve-se realizar inspeção das entregas recebidas antes de encaminhá-las para as partes internas dos edifícios, a fim de detectar possíveis ameaças.
- As entregas devem ser registradas na sua entrada no local, utilizando procedimentos de gerenciamento de ativos.
- Remessas recebidas, sempre que possível, devem ser fisicamente separadas das remessas a serem despachadas.

3.1.1. Segurança física na área nuclear

O termo Segurança Nuclear compreende uma série de procedimentos implementados por Estados e organismos internacionais a fim de garantir a segurança no manuseio, uso e estocagem de materiais radioativos (IAEA, 2006). Diversas organizações internacionais agem em conjunto com os países signatários para desenvolver normas e procedimentos destinados à prevenção de acidentes, prestação de assistência quando esses ocorrem e prevenção ao acesso mal-intencionado a materiais radioativos. A aplicação dessas normas e procedimentos é responsabilidade de cada Estado, contudo, diante das possíveis consequências da má utilização de material radioativo, um conjunto de instrumentos legais internacionais foi criado para permitir que os Estados trabalhem de forma conjunta, garantindo assim a Segurança Nuclear em termos transnacionais (*Proceedings of an International Conference*, 2005, IAEA, 2009).

De acordo com o glossário de segurança da IAEA, em tradução livre, a Segurança Nuclear pode ser abordada em dois principais aspectos (IAEA, 2007):

Safety – A conquista de condições operacionais adequadas, a prevenção de acidentes ou mitigação das consequências de acidentes, resultando na proteção dos trabalhadores, do público e do ambiente contra riscos indevidos de radiações.

Security – A prevenção, detecção e resposta a roubo, sabotagem, acesso não autorizado, transferência ilegal ou outros atos maliciosos envolvendo material nuclear, outras substâncias radioativas ou os seus recursos associados.

A preocupação com a segurança física de instalações nucleares tornou-se evidente com a publicação das exigências relacionadas aos Reatores da Geração IV, por parte do *U.S. Nuclear Energy Research Advisory Committee* (NERAC). De acordo com o NERAC, espera-se que os reatores da nova geração atendam a quatro requisitos fundamentais: sustentabilidade, competitividade econômica, segurança (radiológica) e confiabilidade dos sistemas de energia nuclear e resistência à proliferação e proteção física (NERAC, Generation IV International Forum, 2012).

Entende-se por resistência à proliferação e proteção física o aumento das garantias de controle de acesso a materiais físséis, evitando desvios e roubos para construção de armas, e maior proteção de acesso físico das áreas controladas, coibindo atos de terrorismos. De acordo com o NERAC, são muitos os recursos de proteção destinados à redução de ameaças internas e externas à segurança física destes sítios como redundância, diversidade e independência dos sistemas de segurança.

No Brasil, a norma CNEN-NE-2.01 regulamenta os principais aspectos da segurança física no que concerne à definição internacional de *security*. Relacionada à proteção física de unidades operacionais da área nuclear, tem por objetivo estabelecer os princípios e requisitos necessários à proteção física de unidades operacionais onde se realizam atividades de interesse do Programa Nuclear Brasileiro, tais como produção, utilização, processamento, reprocessamento, manuseio, transporte ou estocagem de materiais radioativos.

Em específico para a segurança física de instalações nucleares, a norma CNEN-NE-2.01 subdivide-se em dois principais tópicos – plano de proteção física (PPF) e serviço de proteção física (SPF). O plano de proteção física estabelece os principais aspectos de segurança física a serem considerados desde o planejamento e desenvolvimento do projeto da instalação nuclear até a obtenção da Autorização para Operação inicial. O serviço de proteção física relaciona-se à manutenção da segurança física, gerindo equipes, equipamentos e procedimentos de segurança.

O plano de proteção física possui três principais etapas:

- **Requisitos Básicos do Planejamento** – cada instalação nuclear deve atender aos requisitos fundamentais de planejamento de segurança para iniciar qualquer atividade relacionada, antes mesmo do começo de sua construção. Os requisitos básicos do planejamento compreendem atividades como desenvolver seu próprio PPF para submeter à CNEN, desenvolvimento do projeto considerando localização geográfica, avaliação de ameaças potenciais e controle do acesso à instalação ou ao material nuclear, delimitação de áreas de segurança sucessivas como área vigiada, área protegida e área vital. As barreiras físicas das áreas vitais devem ser capazes de deter a intrusão de pessoas não autorizadas, as saídas de emergência de áreas vitais devem ser providas de dispositivos de alarme contra intrusão, os sistemas de detecção de intrusão devem ser capazes de operar independentemente do fornecimento normal de energia da rede, etc.
- **Plano Preliminar de Proteção Física (PPF preliminar)** – cada instalação nuclear deve submeter este plano para obtenção da primeira licença para construção. O PPF preliminar precisa compreender os critérios básicos de planejamento da proteção física, plantas e desenhos identificando os principais pontos da instalação, características das barreiras físicas, relação dos tipos de dispositivos de alarme e de dispositivos de detecção de intrusão, diretrizes da direção da instalação nuclear relativas à proteção física, descrição das comunicações de segurança, critérios de proteção física para a triagem e admissão de qualquer empregado nos trabalhos de construção, constituição do SPF, com identificação de pessoas com autoridades e responsabilidades e critérios para elaboração de procedimentos aplicáveis no SPF.
- **Plano Final de Proteção Física (PPF final)** – cada instalação nuclear deve submeter este plano para obtenção da Autorização para Operação inicial. O PPF final precisa compreender uma descrição atualizada de todas as informações relativas à proteção física já fornecidas no PPF preliminar, complementada com informações de critérios de proteção física para a admissão de pessoal, plantas e desenhos identificando a localização de equipamentos vitais e materiais nucleares, descrição dos

dispositivos de alarme e dos dispositivos de detecção de intrusão, descrição dos sistemas de proteção de painéis, fiações, comunicações de segurança e demais sistemas de proteção física, e, descrição da construção de barreiras físicas.

O serviço de proteção física possui onze tópicos principais, descritos resumidamente a seguir:

- Requisitos Gerais – abrangem as principais exigências e necessidades do SPF como a existência de um centro de coordenação geral, pessoal com treinamento específico, dispositivos, equipamentos e procedimentos escritos; a presença de uma força de segurança durante as 24 horas do dia; formulação de diretrizes administrativas aplicáveis ao SPF como seleção e emprego da força de segurança, programa de treinamento, o sistema de registros, investigação de violações, ações em situações de emergência, etc.; esclarecimento e treinamento sobre medidas de proteção física, prover a aplicação das medidas de proteção física requeridas para a movimentação de material nuclear; a existência de meios para detectar a entrada não autorizada e para a ação apropriada da força de segurança em caso de tentativas de intrusão; verificação rotineira e manutenção da operacionalidade das comunicações de segurança, etc.
- Vigilância e Controle de Acesso – disserta sobre os pontos críticos que necessitam ser vigiados e controlados para evitar acessos indevidos. Possui premissas como: a vigilância das áreas de segurança deve ser suficiente para as respectivas limitações de acesso estabelecidas; o controle da área vigiada deve ser adequado para impedir o acesso de pessoas não autorizadas; o acesso a áreas protegidas deve ser limitado a pessoas autorizadas e a veículos indispensáveis às atividades da instalação nuclear; o controle de áreas protegidas deve ser realizado pela força de segurança e/ou por dispositivos programados para admitir pessoal autorizado e impedir o acesso de pessoas, materiais e objetos não autorizados, etc.
- Identificação de Pessoas – concentra as orientações sobre as formas adequadas de realizar a identificação das pessoas que transitam na área de segurança nuclear como fornecimento de distintivos ou passes

especiais, devidamente registrados; orientação para que pessoas de acesso autorizado sem escolta devem usar um distintivo identificador, com fotografia, enquanto permanecerem nas áreas de segurança; orientação para que pessoas de acesso autorizado mediante escolta devem ser identificadas para verificação da respectiva necessidade de acesso; a distribuição de distintivos para acesso às áreas de segurança deve obedecer à classificação de tipo; por exemplo, pessoas com distintivo do tipo A precisam necessariamente possuir acesso às áreas vitais, com tipo B acesso às áreas protegidas, etc.; distintivos devem ser projetados e confeccionados de forma a evitar falsificação, etc.

- Procedimentos – define orientações de como os procedimentos internos de segurança devem ser criados, atualizados e divulgados aos trabalhadores da instalação, por exemplo, diretrizes administrativas devem prever a elaboração e a revisão dos procedimentos aplicáveis ao SPF; procedimentos devem ser periodicamente revistos no máximo a cada dois anos; cópias de procedimentos pertinentes devem estar disponíveis para sua utilização por empregados e pela força de segurança da instalação nuclear; a difusão de procedimentos relativos à proteção física deve ser estritamente limitada a pessoas direta ou indiretamente envolvidas, etc.
- Seleção do Pessoal do Serviço de Proteção Física – estabelece que a seleção e a permanência de candidatos no SPF, para aferir sua lealdade e confiabilidade, devem ser geridas por procedimentos preestabelecidos, incluindo, no mínimo, investigação da vida do candidato, exame médico e psiquiátrico e observação permanente dos empregados, para identificar procedimentos anormais, e adoção de medidas corretivas adequadas.
- Força de segurança – descreve as principais considerações a respeito da equipe de força de segurança destinada às atividades aplicadas. São definições relevantes: a seleção, o treinamento e o equipamento da força de segurança são da responsabilidade da direção da instalação; a força de segurança da instalação nuclear deve ser suficiente e ter ação adequada para contrapor-se, em tempo hábil, a tentativas de intrusão; deve ser levada em consideração a capacidade do pessoal para exercer atividades físicas árduas em situações de emergência; o pessoal da

força de segurança deve receber treinamento e retreinamento periódicos sobre assuntos, práticas e procedimentos adequados ao efetivo desempenho de suas funções, e sua atuação deve ser avaliada frequentemente, etc.

- Registros – determina quais registros relacionados à segurança física devem ser criados e como devem ser armazenados. Por exemplo, devem ser armazenados nomes, endereços, tipo e número do distintivo dos empregados da instalação, bem como nomes e identidades, hora de entrada e saída e motivo da entrada de visitantes e outras pessoas não empregadas que tiveram acesso a cada área de segurança; registros das inspeções, exercícios, ensaios e manutenção realizados em barreiras físicas, relação de equipamentos de comunicações de segurança e outros equipamentos ou dispositivos relacionados à proteção física; registros de alarmes falsos, reais ou de treinamento ocorridos, incluindo análise detalhada da reação da força de segurança; registros de movimentação de material nuclear; etc.
- Vistorias – estabelecem a realização de vistorias, programadas ou surpresas, aplicáveis a pessoas, embrulhos e veículos, durante a entrada e saída de áreas de segurança. Avisos deverão ser afixados nos locais de acesso alertando para tais vistorias.
- Exercícios e Ensaios – exercícios e ensaios periódicos devem ser realizados para assegurar a eficácia das medidas de proteção física, permitindo avaliar o desempenho do pessoal e averiguar o funcionamento dos equipamentos.
- Situações de Emergência – disserta sobre planos e ações para situações de emergência, considerando qualquer ameaça possível, incluindo tentativa de remoção não autorizada de material de interesse ou sabotagem, provendo treinamento do pessoal para reação a alarmes ou ações internas ou externas contra a instalação nuclear. Determinam também as responsabilidades em casos de emergência, as medidas para neutralizar a emergência e minimizar os seus efeitos, instruções para não remoção de material durante evacuações, elaboração de relatório correspondente a cada situação, etc.

- Comunicações de Segurança – estabelece que devem ser realizados ensaios periódicos das comunicações de segurança, de acordo com os procedimentos estabelecidos no PPF.

3.2. DOSIMETRIA

Dosimetria das radiações consiste na determinação da taxa de exposição (*dose-rate*) à radiação em determinado ponto ou meio. Formalmente, pode-se definir que tal taxa consiste na relação entre o intervalo de tempo e a dose de exposição. Por dose de exposição entende-se a razão entre todas as cargas de elétrons frenadas em um volume ΔV de ar (em CNTP), sendo esses produzidos por interação de raios X ou raios γ com a massa Δm de ar do volume em questão (Bitelli, 2006).

Para expressar a dose utiliza-se atualmente a unidade Gray (Gy), definida como a dose de radiação absorvida por uma porção de matéria, que corresponde a um joule por quilograma. Entretanto, uma unidade de medida comumente utilizada em medições reais é a taxa de contagem por unidade de tempo, CPS (*counts per second*), correspondente à taxa de eventos registrados em medições, sendo essa a unidade utilizada no presente trabalho.

As normas de dosimetria estabelecem limites aceitáveis de dose de radiação para o meio ambiente e para os seres vivos. De acordo com o princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) (ICRP Publication 60, 1990), a exposição à radiação deve ocorrer somente quando esta for realmente necessária, e deve ser tão baixa quanto razoavelmente exequível, garantindo assim a observância dos limites seguros de exposição, evitando uma dose nociva ao indivíduo.

3.2.1. Detectores de radiação

Detectores de radiação são artefatos importantes para radioproteção. Por meio deles é possível identificar a presença de radiação no ambiente, bem como mensurar sua intensidade e energia, possibilitando a detecção e localização de fontes radioativas. Esses dispositivos podem ser encontrados em vários modelos,

com diversas implementações e diferentes características, tanto no formato fixo como portátil.

Detectores de radiação portáteis são utilizados para localizar uma fonte de radiação com posicionamento indeterminado. À medida que são deslocados, esses detectores informam a variação da dose de radiação existente naquele ponto, possibilitando a identificação de aproximação ou distanciamento da fonte em questão. Detectores de radiação fixos são comumente posicionados em pontos estratégicos no ambiente monitorado, possibilitando a identificação de qualquer entrada ou saída de fontes radioativas através de alarmes sonoros e luminosos.

De forma simplificada, detectores de radiação consistem em instrumentos destinados à criação de um sinal elétrico proveniente da interação da radiação com o detector. Esta detecção pode ser realizada de diversas formas de acordo com o tipo de detector utilizado. Comumente se encontram detectores sensibilizados através de elétrons provenientes da ionização de um gás, através da excitação de elétrons presentes num semicondutor, por meio da emissão de fótons fluorescentes, oriundos da colisão da radiação com material de cintilação, etc.

3.2.2. Principais características em detectores

Detectores de radiação são encontrados em diversos modelos e configurações, destinados à detecção de diferentes fontes em diferentes condições.

Para realizar uma avaliação, comparação ou escolha de um dispositivo adequado a cada necessidade, três principais características devem ser observadas (Filho, 2004):

- Eficiência Intrínseca – corresponde à capacidade em detectar radiação, comumente estabelecida como a razão entre o número de partículas (ou fótons) detectadas e o número de partículas que incidiram sobre o detector.
- Tempo Morto – corresponde à capacidade de um detector para funcionar em altas taxas de contagem sem perder, de forma relevante, um número de partículas a serem registradas.
- Discriminação de Energia – corresponde à capacidade de um detector em distinguir radiações de diferentes energias.

Além dessas, outras características devem ser consideradas para determinar o detector adequado a cada necessidade, como por exemplo:

- o tipo de radiação detectada pelo dispositivo devido aos diferentes modos de interação das radiações eletromagnéticas com a matéria, partículas carregadas leves, partículas carregadas pesadas e nêutrons;
- o intervalo de tempo de medida diante da necessidade de realizar medições instantâneas ou acumuladas ao longo do período;
- precisão, exatidão e resolução de acordo com as incertezas aceitáveis para a medição desejada;
- as condições de trabalho de acordo com o processo de medição desejado como portabilidade, robustez e autonomia;
- o tipo de informação desejada de acordo com o objetivo da medição (número de contagens ou energia da radiação);
- a facilidade de operação;
- a facilidade de manutenção;
- os custos;
- a sensibilidade à variação de temperatura e umidade.

Tabela 3.1 – Características de alguns detectores de radiação (Filho, 2004).

Detector	Eficiência Intrínseca	Tempo Morto	Discriminação de Energia	Aplicação básica em laboratório
Câmara de Ionização	Muito baixa	Não pode ser usado como contador	Nenhuma	Medidas de exposição de feixe contínuo e pulsado (aparelhos de raios X).
Contador Proporcional	Muito baixa	~ms	Moderada	Medidas de exposição.
Contador Geiger-Müller	Moderada	~ms	Nenhuma	Medidas de campo; monitoração de superfícies contaminadas; segregação de rejeitos.
Contador de Cintilação NaI (TI) (survey meter)	Alta	μ s	Moderada	Busca de superfícies contaminadas; segregação de rejeitos.
Contador Estado Sólido Ge (Li)	Moderada	< μ s	Muito boa	Análises de ativação de nêutrons.

3.2.3. Detectores de cintilação

Detectores de cintilação têm seu funcionamento baseado na emissão de luz quando expostos à radiação. A partir do advento das fotomultiplicadoras, em 1947, o processo de detecção de radiação por cintilação tornou-se possível e, atualmente, é o mais utilizado.

Uma fotomultiplicadora possui um fotocátodo sensível à luz, um ânodo e diversos dínodos (placas intermediárias). Esses dínodos são revestidos por um material capaz de emitir radiação secundária ao ser colidido com elétrons. O cátodo, por sua vez, ao receber luz emite elétrons (efeito fotoelétrico), que serão atraídos pelo primeiro dínodo com um potencial V . Esse dínodo libera novamente um grupo de elétrons que irão incidir no próximo dínodo, com um potencial $2V$, e assim, de modo sucessivo, o processo continua até que o ânodo identifique uma quantidade considerável de elétrons. Uma pequena cintilação inicial é capaz de produzir 10^6 elétrons no ânodo, que produzirão um pulso de corrente a ser identificado pelo sistema de contagem do detector (Bitelli, 2006).

A principal vantagem dos detectores de cintilação é a correspondência entre energia do fóton que incidiu na fotomultiplicadora e o pulso elétrico produzido no final do processo, possibilitando a identificação de fótons de diferentes energias.

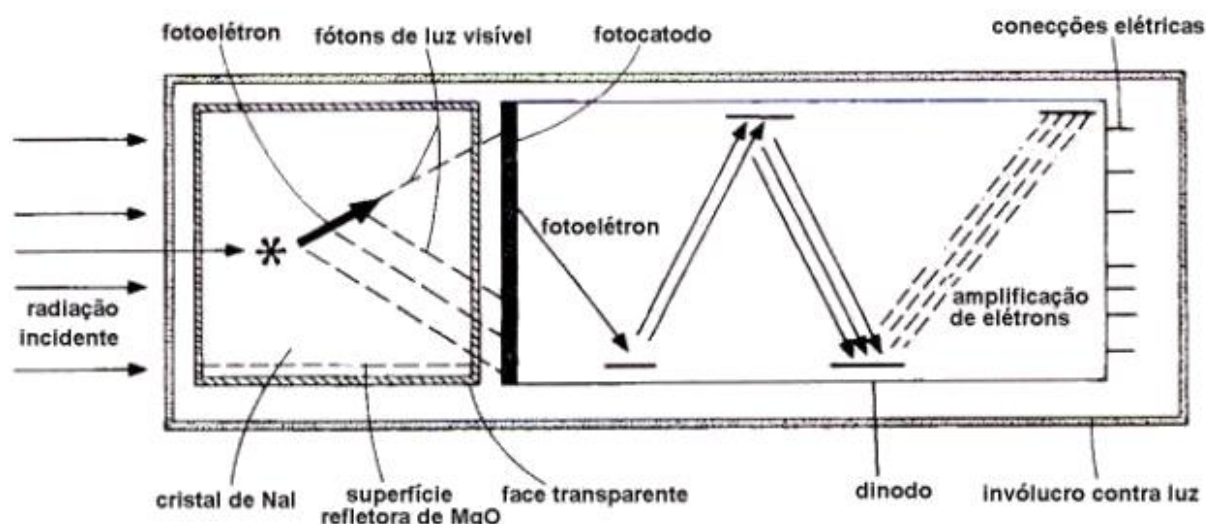


Figura 3.1 – Principais elementos de uma fotomultiplicadora acoplada a um cristal de cintilação (CARTESIANO, 2014).

3.3. REALIDADE VIRTUAL

Entende-se por Realidade Virtual (RV) o conjunto de técnicas, tecnologias e interfaces destinadas a fornecer ao usuário a sensação de integração com o sistema computacional e a possibilitar a sua imersão no ambiente virtual (Burdea e Philippe, 1994). Com esse intuito, a RV utiliza interações em tempo real, ambientes tridimensionais e equipamentos computacionais, permitindo que o usuário tenha a sensação de se relacionar de forma presencial com as aplicações. Um sistema desenvolvido sobre as premissas da RV fornece avançadas interfaces entre o usuário e o ambiente computacional capaz de proporcionar visualização e interação dentro de ambientes simulados eletronicamente, utilizando dispositivos multissensoriais neste intermédio (Kirner e Siscoutto, 2007).

O surgimento da Realidade Virtual ocorreu em um contexto militar, no período posterior à Segunda Guerra Mundial, sendo utilizada pela Força Aérea dos Estados Unidos da América para construção de simuladores de voo. Posteriormente, a RV passou a ser utilizada em diversas áreas como realização de treinamentos, construção de simuladores de diversos tipos, construção de maquetes virtuais, etc., e, principalmente, na indústria do entretenimento, que atualmente concentra a maior utilização dessas técnicas em jogos, animações e filmes (Francis e Tan, 1999).

Três aspectos básicos podem ser utilizados para caracterizar a Realidade Virtual: imersividade, interatividade e envolvimento. Estes três conceitos coexistem de forma integrada e simultânea, e permitem uma avaliação da qualidade de cada sistema de RV (Augusto, 2008). De maneira simplificada, podemos defini-los como:

- Imersividade – relaciona-se à sensação do usuário de estar dentro do ambiente virtual.
- Interatividade – corresponde à capacidade do ambiente de, em tempo real, responder as ações executadas pelo usuário dentro do ambiente, proporcionando o sentimento de que esse está interagindo com o ambiente virtual em uso.
- Envolvimento – descreve o grau de motivação do usuário durante a utilização do ambiente virtual.

Diante do crescimento da RV, com diversas aplicações para diferentes finalidades, outras classificações surgiram. De acordo com Burdea e Coiffet (2003), pode-se classificar a RV de acordo com o tipo de interação que o usuário estabelece

com o ambiente como Realidade Virtual Imersiva (RVI), Realidade Virtual Não Imersiva (RVNI) e Realidade Virtual Semi-Imersiva (RVSI).

Classificam-se como Realidade Virtual Imersiva as aplicações destinadas a fornecer ao usuário a maior imersividade possível, isolando-o do ambiente real de tal forma que suas sensações externas sejam bloqueadas. Para isso, utilizam-se tecnologias especiais, com reconhecimento e controle por voz, visão em 360 graus (possibilitando a movimentação da cabeça do usuário), controle do ambiente por meio de gestos, orientação sonora dos eventos do ambiente, etc. (Haguenauer, Cunha e Filho, 2011).

Na Realidade Virtual Não Imersiva o usuário interage com o ambiente virtual com menor intensidade, sem isolar-se por completo do ambiente real. Para isso, não é necessário utilizar dispositivos dedicados; a utilização de equipamentos convencionais (como monitor, mouse, fones de ouvido e caixas de som) atente os requisitos do sistema.

A Realidade Virtual Semi-Imersiva (RVSI) apresenta-se com interfaces intermediárias nas quais o usuário é parcialmente isolado do ambiente real, fazendo uso de dispositivos convencionais e dispositivos dedicados à RV simultaneamente.

3.3.1. Ambientes Virtuais

Ambientes virtuais são cenários criados através de técnicas de Realidade Virtual, onde são executadas todas as ações da aplicação. Esses ambientes são controlados por personagens virtuais que se deslocam e interagem com o ambiente e com os elementos nele existentes (Stanney, 2002).

Os ambientes virtuais buscam respeitar as leis da física, proporcionando que a interação do usuário com o ambiente virtual seja semelhante à interação humana com o ambiente real equivalente (Augusto, 2007).

As simulações em Realidade Virtual são realizadas nestes ambientes sintéticos, construídos de forma semelhante aos ambientes reais, para fornecer uma semelhança visual respeitando dimensões, proporções, disposição de objetos, metragens, etc.

3.3.2. Avatares

Avatares são personagens virtuais existentes dentro de ambientes gerados por meio da Realidade Virtual, capazes de deslocar-se e interagir com esses ambientes artificiais. Avatares proporcionam ao usuário da aplicação, responsável por suas ações, sua representação no ambiente em uso.

Um avatar pode possuir qualquer forma, de acordo com a aplicação em questão, mas aplicações que necessitam de forte identificação com a realidade comumente utilizam avatares com aparência humana. Busca-se também utilizar avatares caracterizados de maneira coerente com o ambiente e atividades propostas com características físicas, vestuário e acessórios (Augusto, 2007).

3.3.3. Ferramentas de Modelagem

Ferramentas de modelagem destinam-se à confecção de objetos virtuais em três dimensões. Entende-se por modelagem tridimensional o processo de desenvolvimento da representação gráfica computacional de superfícies ou objetos tridimensionais. Esses objetos podem ser animados ou estáticos, dotados de diversas características como formas, texturas e estruturas.

Destinadas a centralizar funções necessárias à construção de modelos tridimensionais, as ferramentas de modelagem reúnem diferentes técnicas de construção de malhas como polígonos, vértices e bordas, destinadas a darem formas aos objetos desenvolvidos. Esta flexibilidade permite que o desenvolvedor abstraia a representação matemática de cada modelo, detendo-se na arte visual do objeto modelado (Autodesk, 2010).

O processo de modelagem tridimensional pode ser descrito em algumas fases principais (Calciolari, 2011):

- modelagem – através de malhas, concedendo formato ao objeto pretendido;
- iluminação – fornecerá ao objeto modelado as características relacionadas ao posicionamento de luzes e sombras;
- texturização – destinada a fornecer aos modelos virtuais a textura de suas superfícies;

- renderização – construção de imagem a partir do modelo virtual tridimensional desenvolvido;
- animação – fornece ao objeto modelado a capacidade de realizar ações animadas, movimentos, etc. Essa fase é opcional.

3.3.3.1. Autodesk 3ds Max

O Autodesk 3ds Max é uma das ferramentas de modelagem mais utilizadas atualmente e objetiva fornecer a centralização de todos os recursos necessários à modelagem bidimensional e tridimensional. Capaz de realizar modelagem, renderização, animação e simulações, é amplamente utilizada por profissionais de computação gráfica para desenvolvimento de jogos, maquetes virtuais, animações, etc. (Harper, 2012).

Por suportar mapas vetoriais e a criação de objetos paramétricos, o Autodesk 3ds Max facilita a construção de malhas e superfícies. Tais recursos de modelagem e texturização permitem a atribuição e edição das texturas e sombreamentos aplicados aos modelos (Calciolari, 2011).

Essa ferramenta possibilita o controle e animação dos personagens nela modelados para atender as necessidades de desenvolvedores de jogos e vídeos, fornecendo maior realidade às cenas geradas. Diversas ferramentas auxiliares e suporte a *plugins* como controle de colisões, inserção de gravidade, inserção de explosões, inserção de vento, etc., possibilitam esta característica (Gahan, 2011).

O Autodesk 3ds Max permite ainda a aplicação de dinâmica e efeitos específicos aos objetos, visando fornecer maior realidade aos modelos virtuais. Alguns dos efeitos mais utilizados são: dinâmica de fluxo de partículas, dinâmica de corpos rígidos, movimentação de cabelos e pelos e movimentação de tecidos (Autodesk, 2010).

A partir das características expostas e da facilidade de configuração da interface de usuário, esta ferramenta foi a escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho.



Figura 3.2 – Ferramenta de modelagem Autodesk 3ds Max

3.3.4. Motores de Jogos

Destinados à produção de jogos eletrônicos, os motores de jogos reúnem diversas funções, bibliotecas e ferramentas necessárias ao desenvolvimento. Também conhecidas como núcleos de jogos e *game engines*, proporcionam aos programadores a centralização dos principais requisitos envolvidos na criação de jogos de forma rápida e integrada.

Os principais recursos encontrados em motores de jogos são o núcleo de renderização de gráficos em tempo real e o núcleo de física e funções destinadas à detecção de colisão. Além desses, os motores de jogos mais utilizados são comumente acompanhados de editores de cenários, ferramentas destinadas à criação e à edição de conteúdo, interpretadores de *scripts*, suporte a animações, suporte à reprodução de áudio e vídeos, comunicação por rede (aplicações *multiplayer*), manipulação de arquivos e funções de inteligência artificial, etc. (Augusto, 2007).

Deve-se salientar que motores de jogos facilitam e agilizam o desenvolvimento de jogos não apenas por sua integração de ferramentas, mas

também por possibilitarem a reutilização de conteúdos desenvolvidos (como objetos gráficos, *scripts*, personagens, cenários, etc.) evitando retrabalhos, e permitem a abstração de plataforma de desenvolvimento (possibilitando que um mesmo jogo possa ser compilado e executado em diferentes computadores, *video games* e arquiteturas).

Diante da gama de ferramentas que constituem os motores de jogos, esses podem ser utilizados para o desenvolvimento de outras aplicações relacionadas à realidade virtual, que também necessitem de gráficos gerados em tempo real como filmes e animações (Trenholme e Smith, 2008).

Atualmente, existem diversos motores de jogos disponíveis, em versões gratuitas e versões proprietárias (com licenças pagas), sendo os mais utilizados a CryEngine 3 (mycryengine.com), o Unreal Engine (unrealengine.com), a Source Engine (source.valvesoftware.com) e o Unity 3D (unity3d.com).

3.3.4.1. Unity 3D

O Unity 3D é um dos motores de jogos mais utilizados atualmente. Composto por motor de renderização bidimensional e tridimensional, aliado a funções necessárias ao desenvolvimento de jogos como motor de física, funções de inteligência artificial, ferramenta de modelagens de cenários e funções de controle para iluminação e áudio, fornece, portanto, os subsídios necessários à construção de jogos.

O Unity 3D utiliza para renderização de seus objetos as APIs (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicativos) Direct3D (msdn.microsoft.com/directx), OpenGL (www.opengl.org), OpenGL ES (www.khronos.org/opengles), dentre outras proprietárias de menor expressão no mercado de desenvolvimento de jogos. As principais características da renderização no Unity 3D são suporte a mapeamento de relevo, processamento de sombras dinâmicas, reflexão e paralaxe e efeitos pós-processamento. Destaca-se também a utilização do Método da Oclusão Implícita (*occlusion culling*), que possibilita a renderização seletiva, em tempo real, apenas dos objetos visíveis em cada cena. Com a utilização do *occlusion culling* os objetos ocultos a câmera do jogo não são

processados, evitando cálculos desnecessários e, conseqüentemente, melhorando o desempenho da aplicação (Blackman, 2011).

Uma importante característica deste motor de jogos é seu suporte a multiplataformas, que garante a portabilidade dos jogos desenvolvidos. Dessa forma, o programador pode desenvolver suas aplicações abstraindo qualquer característica específica de um sistema operacional ou *hardware*, deixando a cargo da Unity 3D os ajustes e conversões necessários à compatibilidade. Os jogos atualmente desenvolvidos nesse motor de jogos podem ser portados para iOS, Android, Windows, Blackberry 10, OS X, Linux, PlayStation 3, Xbox 360, Windows Phone 8, Wii e Wii U. Além disso, a portabilidade também atende a execução de jogos em navegadores (web browsers) como Chrome, Safari, Firefox e Internet Explorer, a partir de conversão das aplicações para Flash (Kyaw, Peters e Swe, 2013).

O Unity 3D foi criado no *framework* de desenvolvimento Mono (www.monoproject.com), que consiste em uma implementação da plataforma .NET (www.microsoft.com/net) em código fonte aberto; contudo, o desenvolvimento dentro do motor de jogo é multilinguagem de programação. O Unity 3D suporta scripts em três linguagens de programação: JavaScript (developer.mozilla.org/en/JavaScript), C# (msdn.microsoft.com/vcsharp) e Boo (boo.codehaus.org). A flexibilidade de opções de linguagem de programação possibilita que o programador escolha a linguagem de sua preferência, e permite ainda a utilização simultânea de scripts de diferentes linguagens em uma mesma aplicação (Goldstone, 2011).

Dois versões de licenciamento desse motor de jogos são disponibilizadas – a versão gratuita, comumente referenciada como Unity, e a versão proprietária (licença paga), conhecida como Unity Pro. As principais vantagens da Unity Pro são recursos e funcionalidades adicionais geralmente destinados ao desenvolvimento de jogos profissionais como suporte à textura 3D, recursos adicionais de animação, *streaming* de vídeos, filtros de áudio, etc.

Diante das características expostas e da facilidade de acesso a documentações e qualidade de seus jogos, essa ferramenta foi a escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho.

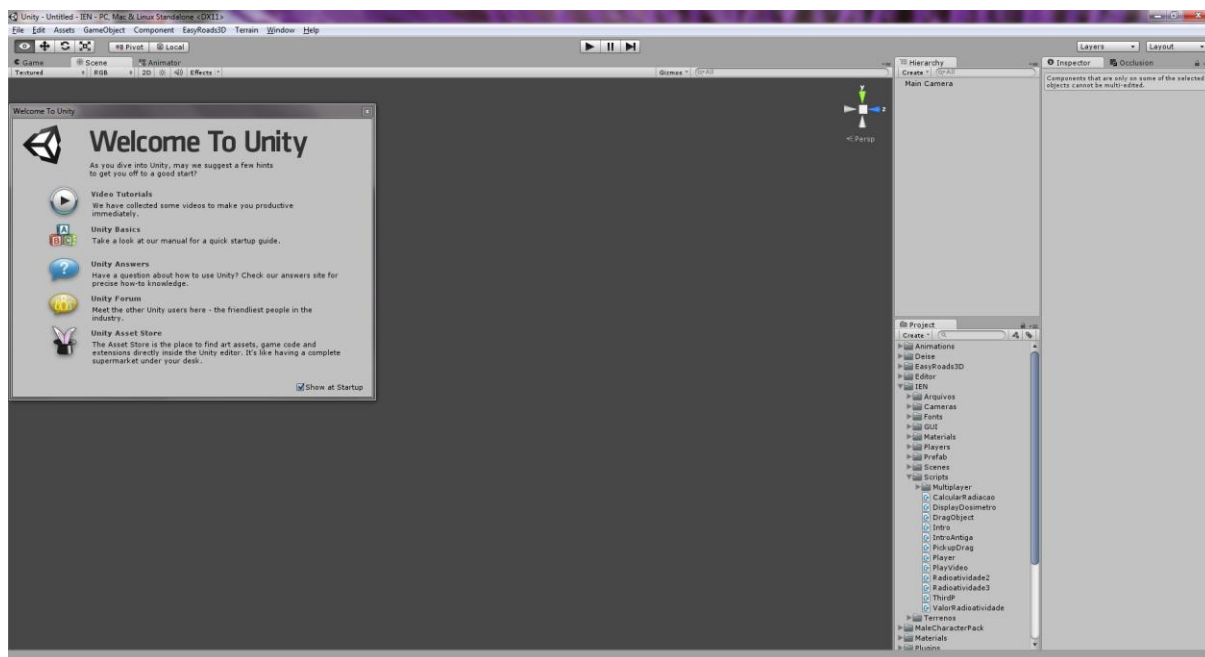


Figura 3.3 – Motor de jogos Unity 3D

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

No presente capítulo será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação, dividida em duas principais etapas. Primeiramente, construiu-se o modelo virtual do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), localizado na Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil. A seguir, implementou-se o funcionamento de fontes radioativas e detectores de radiação. As próximas seções descrevem de forma detalhada estas etapas.

4.1. MODELAGEM VIRTUAL DO AMBIENTE

A partir de imagens topográficas, fotos e medições presenciais dos objetos, terrenos e edificações existentes nesta instalação nuclear, mensuraram-se as distâncias, tamanhos e proporções existentes no cenário real para serem utilizadas na criação de modelos tridimensionais por meio da ferramenta Autodesk 3ds Max (versão 2013). As medidas e proporções foram fidedignas na modelagem para fornecer ao usuário uma melhor imersão nas simulações.

Para acesso ao ambiente virtual modelado, desenvolveu-se um menu de acesso, onde o usuário pode optar pelo avatar que utilizará para interagir com o cenário (masculino ou feminino) e o número de fontes radioativas que estarão posicionadas no ambiente virtual.



Figura 4.1 – Menu de acesso ao Sistema de Detecção Virtual de Fontes Radioativas

4.1.1. Edificações

As edificações foram modeladas no software Autodesk 3ds Max. A partir de uma imagem topográfica, utilizada como referência da área a ser modelada, os edifícios existentes foram modelados, respeitando formatos e proporções. Para estimar a altura dos edifícios, posicionou-se uma pessoa de estatura mediana (1m70cm) ao lado de cada construção. De acordo com essa proporção, a altura dos prédios foi estimada e transferida à ferramenta de modelagem.

A maior parte das edificações modeladas no presente trabalho deteve-se à parte externa de cada construção, ou seja, somente as fachadas foram modeladas. Esta técnica, denominada *Poly Modelling* (Daniele, 2009), baseia-se na adição de primitivas simples presente na ferramenta de modelagem como caixas (*box*), até que o objeto desejado seja esculpido em forma semelhante à realidade.

Algumas edificações, devido aos objetivos desta dissertação, precisaram ser modeladas de forma mais precisa, interna e externamente, devido a sua importância para a segurança física da instalação. O critério para esta escolha foi o alto fluxo de

peças entrando e saindo do sítio e, por isso, as construções escolhidas foram as portarias do IEN. Nesses modelos, objetos genéricos (cadeiras, mesas, etc.) foram adquiridos em sites especializados.

Após fornecer as formas pertinentes a cada edificação, iniciou-se o processo de texturização. Para isso, as malhas dos objetos foram planejadas e transformadas em figuras. Nessas figuras foram aplicadas diferentes camadas de textura de acordo com as fotografias originais destas construções. Optou-se por preservar nesta fase os aspectos relacionados à conservação, como umidade, manchas, poeira, etc., para garantir maior credibilidade ao cenário.

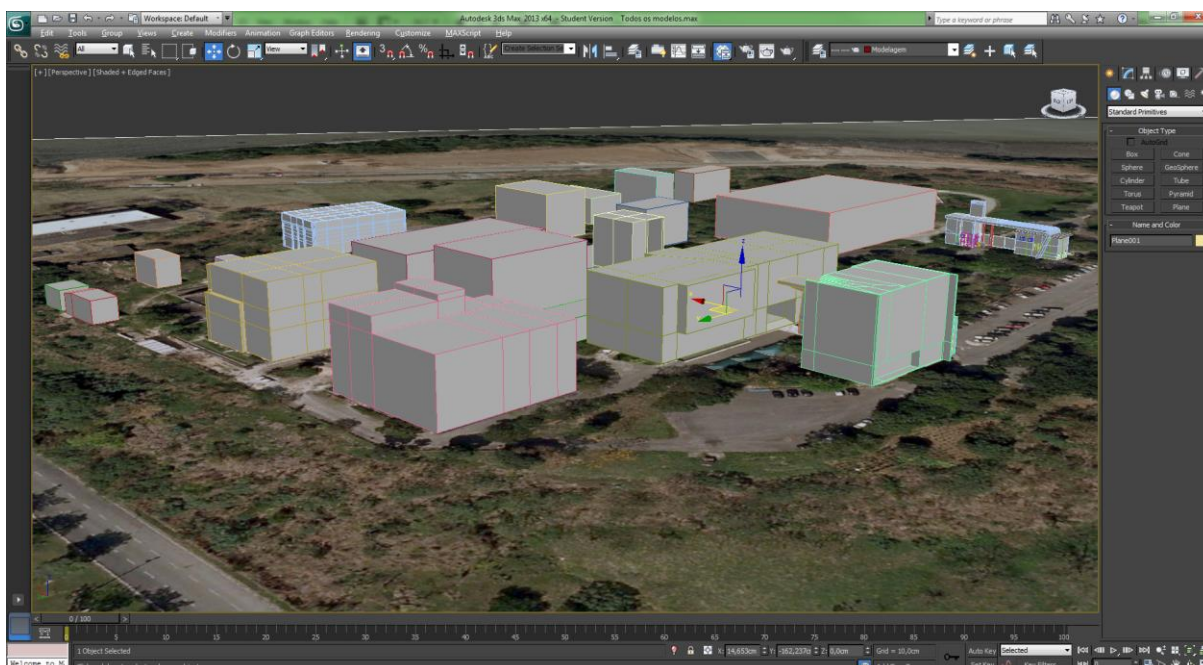


Figura 4.2 – Modelagem dos edifícios no Autodesk 3ds Max sem textura

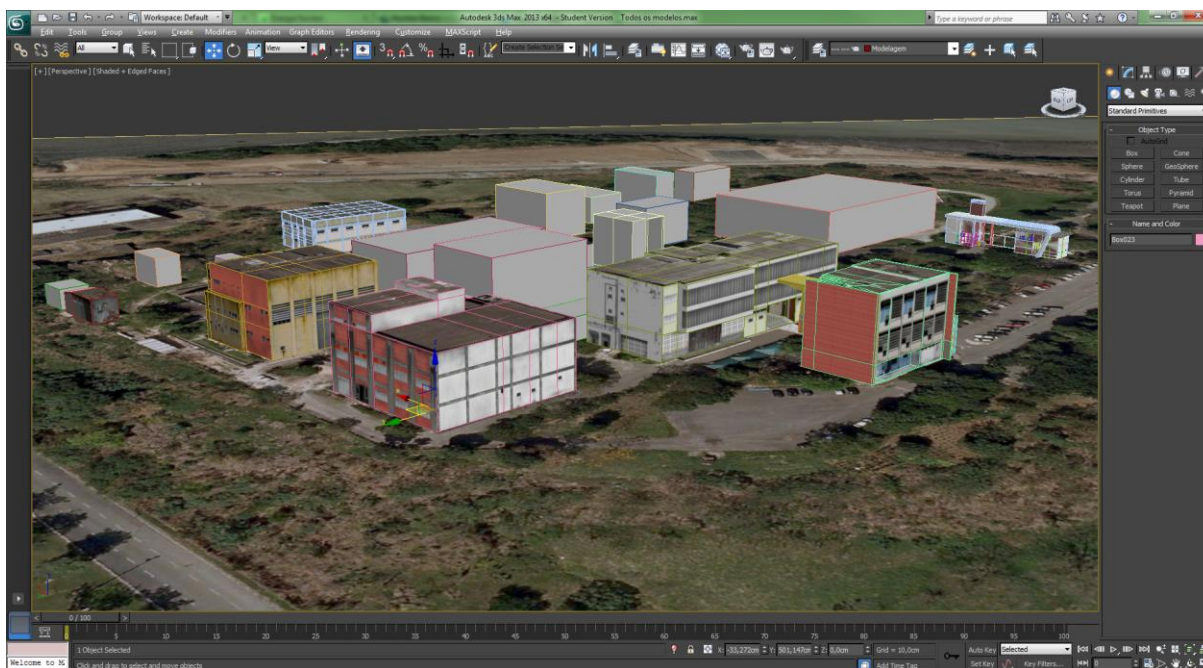


Figura 4.3 – Modelagem dos edifícios no Autodesk 3ds Max com textura

4.1.2. Terrenos

A modelagem do terreno do ambiente virtual aqui desenvolvido foi realizada no motor de jogos Unity 3D. Partindo de um terreno padrão da ferramenta (sem formas, cores ou texturas), utilizando as medidas e proporções adquiridas por fotos, imagens topográficas e medições presenciais, modelou-se e dimensionou-se o terreno padrão, tornando-o compatível com as extensões e escalas do cenário real.

No primeiro momento adaptou-se a escala do terreno para que esse englobasse uma área equivalente ao IEN. A seguir a imagem topográfica real foi inserida sobre o terreno e serviu como guia para a texturização do mesmo. Nesse momento o terreno estava impresso, mas ainda planejado. No terceiro passo realizou-se a inserção do relevo, respeitando elevações, declives, áreas destinadas a ruas e construções, etc., conforme o ambiente real.

Após conclusão do terreno, iniciou-se a fase de inserção de objetos. Tanto as edificações construídas no Autodesk 3ds Max como os objetos genéricos (mesas, cadeiras, etc.) foram importados, posicionados em seus devidos lugares e escalonados no Unity 3D, deixando-os compatíveis com as proporções utilizadas no terreno. A unidade métrica utilizada pelo Unity corresponde a 1 (um) metro, então,

todos os objetos importados foram parametrizados para conservar a mesma escala. Ainda nesta fase, foram inseridos itens de vegetação (árvores, gramíneas e arbustos) para conferir maior realismo ao cenário virtual.

Após fornecer ao ambiente virtual todas as características visuais necessárias, foram inseridos personagens virtuais, também chamados avatares, controlados pelo usuário, para realizarem as interações com o cenário. Existem dois principais tipos de avatares, em primeira e em terceira pessoa. Avatares em primeira pessoa utilizam o ponto de vista do usuário, como se ambos fossem o mesmo observador. Avatares em terceira pessoa são independentes da visão do usuário, e durante a utilização do ambiente podem ser vistos por completo, como outra pessoa controlada pelo usuário da aplicação.

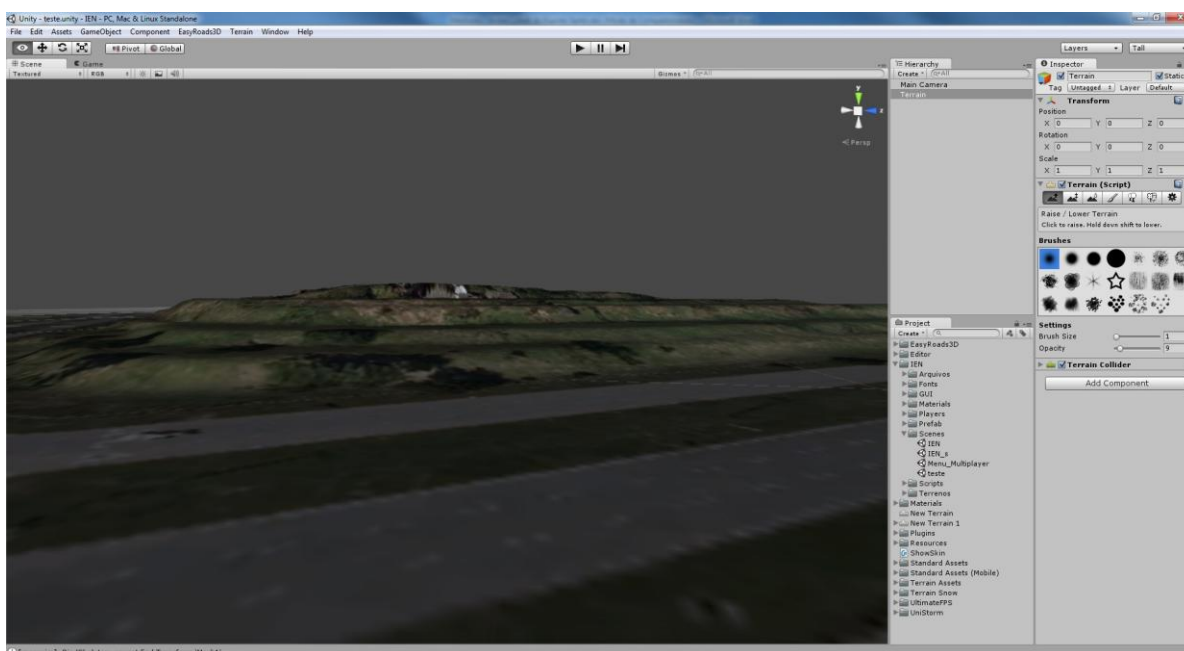


Figura 4.4 – Modelagem do terreno no *Unity 3d* (SANTO, 2013).

4.1.3. Dosímetros

Os dosímetros foram modelados no *software* Autodesk 3ds Max. A partir de fotografias feitas de detectores verdadeiros, utilizadas como referência de formato, cores, texturas e proporções, os detectores de radiação portáteis e fixos foram modelados com riqueza de detalhes, visando possibilitar uma fácil identificação visual por parte dos usuários do sistema.

Após concluídos, esses objetos foram inseridos no ambiente virtual desenvolvido. O dosímetro portátil foi inserido no campo de visão do avatar em primeira pessoa. Dessa forma, sempre que o usuário do sistema optar por esta visualização estará utilizando o dosímetro portátil, constantemente visível para este personagem. Já o dosímetro fixo foi posicionado na portaria principal do IEN, podendo ser visualizado por avatares em primeira ou terceira pessoa.

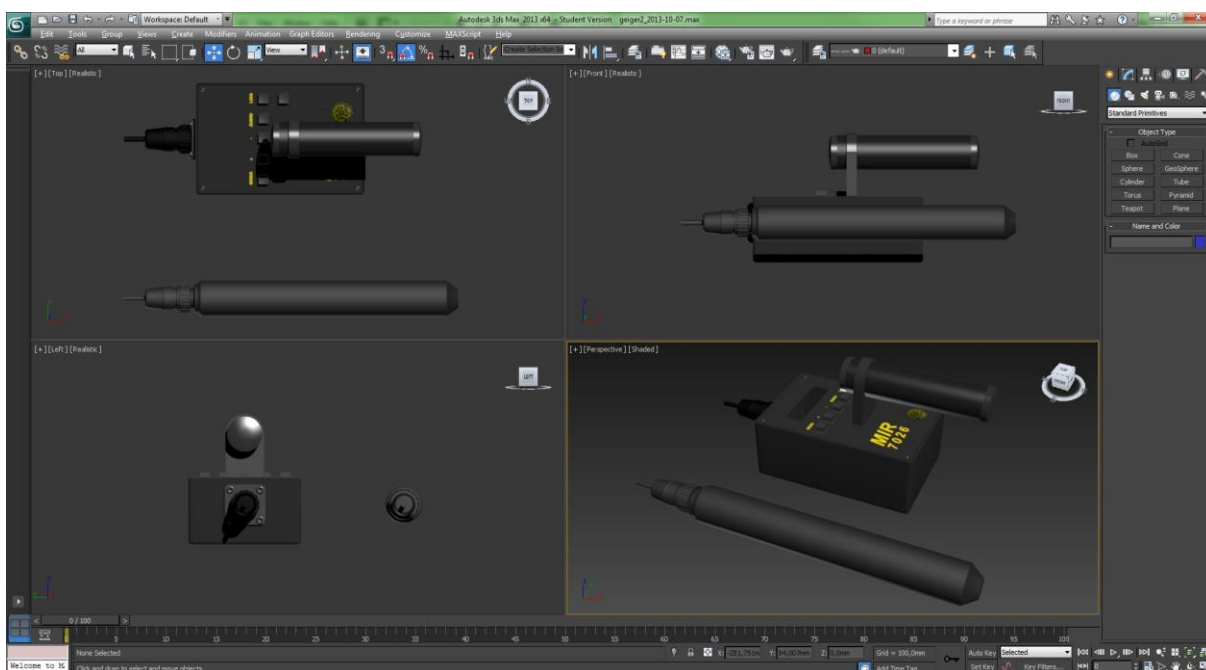


Figura 4.5 – Modelagem do dosímetro portátil

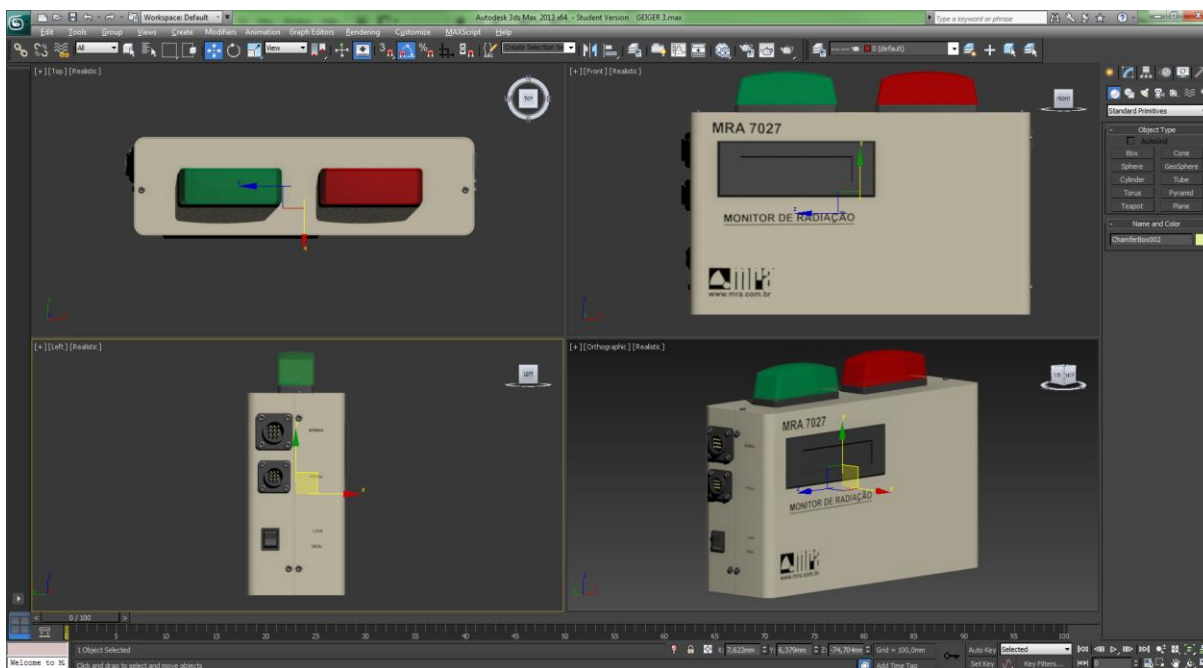


Figura 4.6 – Modelagem do dosímetro fixo

4.2. IMPLEMENTAÇÕES

A linguagem de programação utilizada para realização de implementações dentro deste núcleo de jogo foi C# (msdn.microsoft.com/vcsharp), pertencente ao Framework .NET, escolhida por sua simplicidade e robustez, por ser orientada a objeto e possuir tipagem segura.

4.2.1. Fontes Radioativas

Por tratar-se de radiações eletromagnéticas, a intensidade das radiações X e gama variam de acordo com a distância entre a fonte radioativa e o detector. Neste trabalho utilizaram-se fontes pontuais isotrópicas e monoenergética expostas no ar, um meio homogêneo. Dessa forma, a taxa de exposição (X) pode ser aproximada pela seguinte fórmula:

$$X = \tau A/d^2$$

Onde A corresponde à atividade da fonte utilizada, em Ci; d expressa a distância do detector à fonte, em metros; e τ refere-se à constante específica de radiação gama, em Rm^2/Cih , tabelados para diversas fontes (FILHO, 2004). Diante disso, a taxa de exposição foi programada considerando o decaimento de sua intensidade de acordo com o inverso do quadrado da distância existente entre fonte radioativa e detectores.

Para a representação das fontes radioativas foram utilizados marcadores simbólicos no ambiente virtual, visto que fontes reais não possuem uma identificação visual determinada. Os marcadores escolhidos no presente trabalho consistem em cubos amarelos, identificados com o símbolo de material radioativo, posicionados em diferentes pontos do cenário.



Figura 0.7 – Marcador representando fonte radioativa no ambiente virtual

4.2.2. Detector de Radiação Portátil

Conforme citado na seção 4.1.3 o dosímetro portátil é associado diretamente ao avatar em primeira pessoa, permanecendo constantemente visível durante os

deslocamentos realizados por esse avatar. Dessa forma, a taxa de dose necessita ser ajustada dinamicamente de acordo com a variação da distância entre o personagem e a fonte radioativa. A configuração desse dosímetro foi realizada de acordo com o cálculo da taxa de exposição (taxa inversamente proporcional ao quadrado da distância). A figura a seguir mostra o ambiente virtual desenvolvido a partir desta visualização, apresentando as taxas de dose de acordo com a localização do avatar no ambiente.



Figura 0.8 – Visualização do dosímetro portátil

A taxa de dose total detectada em um dosímetro portátil corresponde ao somatório da dose de *background* com as doses existentes em seu raio de ação, oriundas de uma ou mais fontes radioativas em sua proximidade.

4.2.3. Detector de Radiação Fixo

O dosímetro virtual fixo foi posicionado na portaria principal da instalação em estudo, ponto estratégico do sítio nuclear virtual, fundamental para trânsito, entrada

e saída de pessoas e veículos. Esse tipo de dosímetro não é reposicionado no ambiente como ocorre com o dosímetro portátil que se desloca junto ao avatar, então, a variação de taxa de doses ocorre de acordo com o deslocamento das fontes radioativas, quando transportadas dentro do ambiente virtual.

Na ferramenta Unity 3D é utilizado, por padrão, um raio de interação do avatar com o ambiente de 0,4m. Esse espaço corresponde ao corpo do avatar, área não penetrável pelos demais objetos presentes no cenário. Assumindo que existe a possibilidade do avatar tocar ou transportar uma fonte radioativa, convencionou-se no presente trabalho um raio externo ao avatar de 0,1m para manuseio da fonte (correspondente a um recipiente sendo carregado junto a seu corpo). Desta maneira, a menor distância possível da fonte ao centro do avatar foi totalizada em 0,5m.

A taxa de dose total detectada em um dosímetro fixo corresponde ao somatório da dose de *background* com a dose correspondente a uma ou mais fontes em sua proximidade. A figura a seguir apresenta o posicionamento de um dosímetro fixo na portaria principal do IEN.



Figura 0.9 – Dosímetro fixo

CAPÍTULO 5

TESTES E RESULTADOS

O presente trabalho escolheu o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para aplicação do estudo de caso proposto. Unidade pertencente à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), o IEN localiza-se na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, Brasil, e atua como principal órgão estatal responsável pelo gerenciamento de rejeitos radioativos do Estado do Rio de Janeiro.

A partir do ambiente virtual desenvolvido, dotado de cenários semelhantes aos existentes no IEN, com os dosímetros portátil e fixo modelados, programados e posicionados no ambiente virtual e avatares interagindo com o cenário, foram realizadas simulações de dosimetria virtual. Fontes radioativas foram posicionadas em diversos pontos do ambiente, possibilitando que o avatar, munido de um dosímetro portátil, pudesse localizar estas fontes e determinar suas intensidades. Realizaram-se também simulações nas quais o avatar se deslocava pelo ambiente virtual carregando consigo uma fonte radiativa, tornando possível verificar o funcionamento do dosímetro fixo, que detecta o aumento da radioatividade nas suas proximidades, possibilitando, portanto, a identificação de tentativas de retiradas indevidas de fontes radioativas da instalação nuclear.

5.1. INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

O Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) foi fundado no ano de 1962 como unidade vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que por sua vez está vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

O IEN dedica-se a atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área nuclear, contribuindo para o domínio nacional de tecnologias nessa e em áreas correlatas. Suas atividades suportam serviços como patentes, publicações, licenciamento de tecnologias, fornecimento de radiofármacos, ensaios e análises de materiais, recolhimento de rejeitos radioativos, consultorias e formação de recursos humanos (www.iem.gov.br).



Figura 5.1 – Localização do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN, 2013)

5.1.1. LabRV

Fundado em 2005, o Laboratório de Realidade Virtual (LabRV) do Instituto de Engenharia Nuclear dedica-se à realização de pesquisas, experimentos, treinamentos e simulações utilizando tecnologias baseadas em Realidade Virtual, como motores de jogos, para confecção de sistemas computacionais voltados para as necessidades relacionadas à área nuclear.

O presente trabalho foi desenvolvido com suporte do LABRV, que forneceu toda a infraestrutura necessária para a pesquisa e a implementação deste estudo. Além disso, a autora desta dissertação está vinculada a esse laboratório.

5.2. AVALIAÇÃO DO AMBIENTE VIRTUAL

O ambiente virtual desenvolvido neste trabalho buscou reproduzir o sítio nuclear do Instituto de Engenharia Nuclear com primazia de detalhes, proporcionando ao usuário do sistema uma fácil identificação visual com as reais instalações do instituto. Baseando-se em fotografias, mapas, imagens topográficas, plantas e medições das reais edificações existentes no IEN, foi desenvolvido o cenário virtual no qual todas as simulações aqui descritas foram realizadas.

O cenário virtual buscou preservar as principais características existentes do terreno como proporções e distâncias, aparência e proporções das construções, vegetação existente, etc., assim como primou por implementar o avatar respeitando velocidades e proporções reais.

Nas figuras que seguem é possível observar a semelhança entre ambientes reais e ambientes modelados virtualmente. A figura 5.2 consiste em uma fotografia real da parte interna da portaria principal do Instituto de Engenharia Nuclear. A figura 5.3 foi feita da mesma posição, mas no ambiente virtual. É possível observar que não somente as características arquitetônicas como também os objetos existentes na instalação real foram reproduzidos no ambiente virtual, tais como ar-condicionados e vegetação.



Figura 5.2 – Fotografia da portaria principal do IEN, lado interno



Figura 5.3 – Imagem extraída do ambiente virtual da portaria principal do IEN, lado interno

As imagens a seguir, figuras 5.4 e 5.5, correspondem respectivamente à imagem real e à imagem modelada virtualmente da portaria secundária do Instituto. As duas portarias foram modeladas internamente e externamente, permitindo que o avatar entre, interaja com os objetos existentes e atravesse essas edificações, tendo acesso aos demais prédios do IEN.



Figura 5.4 – Fotografia da portaria secundária do IEN



Figura 5.5 – Imagem extraída do ambiente virtual da portaria secundária do IEN



Figura 5.6 – Fotografia do estacionamento do IEN



Figura 5.7 – Imagem extraída do ambiente virtual do estacionamento do IEN



Figura 5.8 – Fotografia do caminho interno entre a portaria principal e a portaria secundária.



Figura 5.9 – Imagem extraída do ambiente virtual do caminho interno entre a portaria principal e a portaria secundária

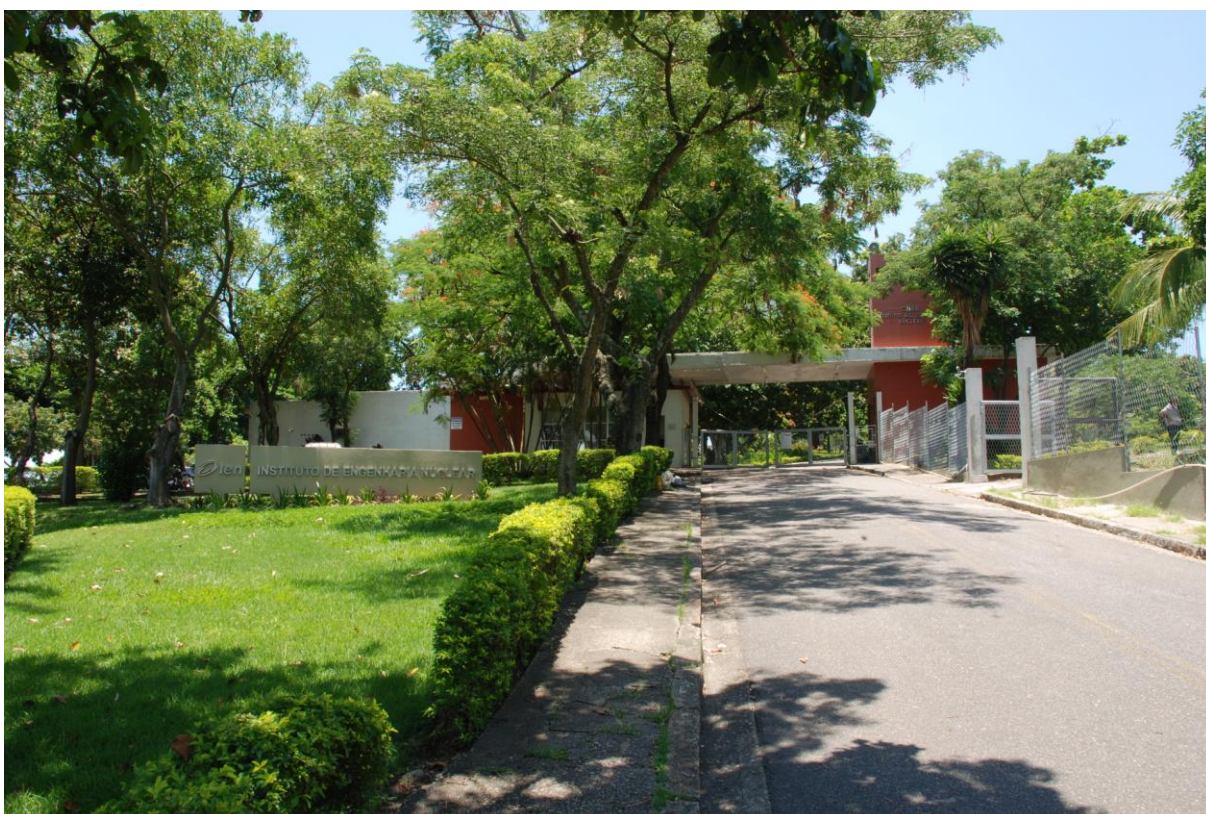


Figura 5.10 – Fotografia da entrada do IEN com vista externa da portaria principal



Figura 5.11 – Imagem extraída do ambiente virtual da entrada do IEN com vista externa da portaria principal



Figura 5.12 – Fotografia do prédio onde está o LabRV



Figura 5.13 – Imagem extraída do ambiente virtual do prédio onde está o LabRV

5.3. ESTIMATIVA DE DOSES

Para validar a dosimetria no ambiente virtual desenvolvido, realizou-se uma estimativa de doses no ambiente real do Instituto de Engenharia Nuclear. Em um primeiro momento, realizou-se a estimativa de doses existente de forma natural, como radiação de fundo (*background*) e, a seguir, com a inserção de uma fonte radiativa.

5.3.1. Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados que fundamentam este estudo, utilizou-se como detector de radiação o Monitor de Rejeitos Hospitalares MRH 7029 em conjunto com a Sonda Cintilométrica SCT 7026, previamente calibrados. Esse detector possibilita a identificação de raios gama e raios X, em uma faixa de energia de 50keV a 2MeV.

Utiliza como cristal o iodeto de sódio ativado à Tálcio - NaI (TI), e opera a uma alta-tensão de aproximadamente 650V, sendo sua máxima alta-tensão de 1250V.

A seguir estão descritos os principais passos para a realização desta atividade:

Passo 1 – estimou-se o valor da atividade referente ao *background* existente no terreno do Instituto de Engenharia Nuclear. Esse valor é encontrado naturalmente.

Passo 2 – posicionou-se uma fonte radioativa em um ponto ao ar livre do sítio e, a um metro de distância, posicionou-se o dosímetro. Diversas medições foram realizadas nesta configuração. A repetição das medidas deu-se no intuito de contornar a flutuação estatística do decaimento radioativo.

Passo 3 – posicionou-se uma fonte radioativa em um ponto ao ar livre do sítio, e, a dois metros de distância, posicionou-se o dosímetro. Assim como no passo 2, diversas medições foram realizadas a fim de contornar a flutuação estatística do decaimento radioativo.

Passo 4 – montaram-se planilhas para cada conjunto de medições.

Passo 5 – foram geradas planilhas em que o valor de *background* é subtraído das medições, determinando assim a atividade isolada da fonte em estudo, sem interferência da radiação natural do ambiente.

5.4. VALORES DE TAXAS DE DOSES

Primeiramente, foi obtido o valor médio das taxas de dose referentes ao *background* do Instituto, identificado por meio de medições com dosímetros portáteis em diversos pontos da instalação. O valor identificado e utilizado no presente trabalho corresponde a 140CPS.

Em um segundo momento, coletaram-se diversas medições provenientes da inserção de uma fonte radioativa no ambiente. Para determinar a atividade desta

fonte adicional, realizaram-se diversas medidas a 1m e 2m de distância (entre a fonte e o detector). Conforme citado seção 5.3.1, realizou-se a repetição das medidas para contornar a flutuação estatística do decaimento radioativo. A tabela 5.1 fornece os valores obtidos no experimento.

Tabela 5.1 – Taxas de doses medidas no Instituto de Engenharia Nuclear

Fonte	Distância	Taxa de Contagem
120 μ Ci	1m	572.90 CPS
		572.80 CPS
		573.20 CPS
		573.10 CPS
		573.10 CPS
	2m	275.50 CPS
		275.50 CPS
		275.30 CPS
		275.20 CPS
		274.90 CPS

O valor médio de taxa de dose para uma fonte de 120 μ Ci, a uma distância de 1m, foi de 573.02CPS, e o valor médio dessa taxa com a mesma amostra, à distância de 2m, é de 275.28CPS. Descontando o *background*, têm-se, respectivamente, taxas de doses de 433.02CPS e 135.28CPS.

5.5. TAXAS DE DOSES NO AMBIENTE VIRTUAL

No ambiente virtual configurou-se a atividade da fonte de acordo com os experimentos e estimativas realizadas no ambiente real. Definiu-se o valor base como 433.02CPS para a distância de 1m (um metro). Partindo do princípio que a radiação é proporcional ao inverso do quadrado da distância, e que a menor distância entre o avatar e a fonte (0,5m, conforme explicado na seção 4.2.3) corresponde ao dobro desta medida de referência, estimou-se a taxa de dose máxima em aproximadamente 1732.08CPS sem *background*, e 1872.08CPS com *background*.

A atividade referente ao *background* do Instituto de Engenharia Nuclear foi configurada como fixa para todo o terreno, com o valor encontrado como médio, de

140CPS. Dessa forma, se não existirem fontes radioativas depositadas no terreno, os dosímetros portátil e fixo identificarão somente esta atividade.

A taxa de dose recebida por um avatar inserido no sistema corresponde ao somatório das taxas existentes e do *background* aliado à dose correspondente a uma ou mais fontes radioativas de acordo com a distância entre elas e o avatar.

5.6. EXPERIMENTO COM UMA FONTE RADIOATIVA

A primeira etapa de testes deu-se com a inserção de uma fonte radioativa isolada no ambiente virtual desenvolvido. Essa fonte foi configurada com a atividade de 433.02CPS, podendo ser localizada tanto pelo dosímetro portátil como pelo dosímetro fixo.

Esta fonte radioativa foi inicialmente posicionada na área de estacionamento do IEN. Com o dosímetro portátil o usuário estava habilitado a deslocar-se dentro do sítio e, através da leitura do dosímetro, que constantemente informa alterações na radioatividade do ambiente, poderia identificar sua aproximação da fonte procurada. A tabela 5.2 fornece exemplos de valores obtidos a partir da simulação virtual com este dosímetro.

Tabela 5.2 - Doses recebidas pelo avatar no ambiente virtual (detectadas pelo dosímetro portátil)

Distância	Dose Recebida
0.5095401m	1807.828CPS
0.5099648m	1805.051CPS
0.5138517m	1779.957CPS
0.5167696m	1761.489CPS
0.5251723m	1710.017CPS
0.5303277m	1679.641CPS
1.01572m	540.8796CPS
1.574886m	298.5712CPS
2.035021m	234.2307CPS
2.679985m	198.3283CPS

Em um segundo momento, realizaram-se testes com o deslocamento da fonte radiativa dentro do ambiente virtual. Para a realização desta simulação, o usuário controlava um avatar em terceira pessoa (sem a visualização do dosímetro portátil), que se apoderava da fonte virtual e se deslocava junto a ela. Estas simulações

tinham por objetivo averiguar o funcionamento do dosímetro fixo, a alteração da sua leitura da dose de radiação do ambiente e o disparo de alarmes na tentativa de retirada da fonte das instalações do IEN. No ambiente virtual, o dosímetro fixo foi posicionado na portaria principal do IEN, ponto escolhido pelo posicionamento estratégico para a segurança física do local. A tabela 5.3 fornece exemplos de valores obtidos a partir da simulação virtual com este dosímetro.

Tabela 5.3 – Doses detectadas pelo dosímetro fixo durante deslocamento de uma fonte radioativa

Distância	Dose Recebida
0.5038399m	1845.78CPS
0.52071m	1737.041CPS
0.5772543m	1439.492CPS
0.6742337m	1092.548CPS
0.7143928m	988.4648CPS
0.8412206m	751.9108CPS
0.9570694m	612.7386CPS
1.154752m	464.7362CPS
1.902737m	259.6053CPS
2.236635m	226.5601CPS

5.7. EXPERIMENTO COM MÚLTIPLAS FONTES RADIOATIVAS

Após as avaliações das taxas de doses provenientes de fontes radioativas independentes realizou-se a inserção de múltiplas fontes neste ambiente virtual. Dessa forma, tornou-se possível avaliar a taxa de dose correspondente à totalidade das fontes. Para o dosímetro portátil configurou-se o avatar como ponto convergente de todas as doses existentes no meio e, à medida que esse se desloca, sua distância altera-se dinamicamente em relação a cada uma das fontes existentes, alterando, conseqüentemente, as doses individuais, que irão modificar constantemente o total de dose radioativa recebida pelo avatar.

Um ponto a ser observado é a contabilização da dose de *background*, que deve ser somada ao valor total de todas as doses inseridas no ambiente virtual, visto que este valor base existe independente de qualquer fonte adicional, não sendo relativo a cada uma das fontes inseridas.

Tabela 5.4 – Doses de duas fontes detectadas pelo dosímetro portátil

Distância da fonte 1	Dose da fonte 1	Distância da fonte 2	Dose da fonte 2	Dose total com <i>background</i>
55.6409m	0.1398684CPS	83.97739m	0.06140209CPS	140.2013CPS
9.76285m	4.543125CPS	43.96428m	0.224031CPS	144.7672CPS
0.6388086m	1061.125CPS	36.10044m	0.3322638CPS	1201.457CPS
0.8305193m	627.7814CPS	36.16615m	0.3310574CPS	768.1125CPS
36.34216m	0.3278585CPS	27.20304m	0.5851576CPS	140.913CPS
44.84069m	0.2153592CPS	11.38016m	3.343578CPS	143.5589CPS
37.05875m	0.3153017CPS	1.019473m	416.6359CPS	556.9512CPS
36.78617m	0.3199917CPS	0.8130068m	655.118CPS	795.438CPS

Na configuração do dosímetro fixo determinou-se que o próprio aparato corresponde ao ponto de convergência das múltiplas doses existentes no meio. Assim, a taxa de dose total será alterada de acordo com as fontes radioativas em deslocamento no ambiente virtual, à medida que essas são transportadas pelo avatar. O dosímetro fixo é capaz de identificar o deslocamento simultâneo de mais de uma fonte dentro das instalações virtuais.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs a verificação da viabilidade do uso de um motor de jogos para a criação de um ambiente virtual, modelado tal qual um sítio nuclear, para servir como ferramenta auxiliar a estudos e treinamentos relacionados à dosimetria, procedimento recorrente em atividades de segurança física de instalações nucleares.

A partir dos resultados obtidos nas modelagens tridimensionais dos detectores de radiação e da instalação nuclear conclui-se que a utilização de ferramentas de Realidade Virtual, como 3ds Max e Unity 3D, pode atender de forma satisfatória a construção de ambientes destinados a treinamentos e simulações de detecção de fontes radioativas, fornecendo ao modelo computacional construído grau satisfatório de realismo ao ter sua estrutura física virtual comparada ao ambiente real.

A ferramenta produzida neste estudo possibilitou a realização de simulações para a identificação de radiação no ambiente virtual. Dois tipos de dosimetria foram implementadas: dosimetria portátil e dosimetria fixa. Na dosimetria portátil realizaram-se simulações nas quais as fontes radioativas estavam imóveis, posicionadas ou abandonadas no terreno, permitindo que o avatar, utilizando um dosímetro portátil, se deslocasse pelo ambiente em busca dessas fontes. Já na dosimetria fixa, o dosímetro estava fixo no principal ponto de entrada e saída do sítio nuclear, e foram realizadas simulações em que as fontes radioativas estavam em movimento, carregadas por um avatar. As simulações de dosimetria fixa reproduziram tentativas de retiradas indevidas de fontes radioativas de dentro da instalação.

De acordo com os resultados alcançados nas simulações realizadas, o sistema desenvolvido poderá, futuramente, auxiliar no planejamento de segurança física de instalações nucleares no que tange a atividades de dosimetria, pois permitirá a visualização e a organização de estratégias, a realização de treinamentos e simulações de proteção e tornará possível aferir pontos estratégicos para a implantação de novos detectores.

Por fim, pelos resultados apresentados, esta dissertação atingiu seu propósito de servir como ferramenta complementar ao planejamento de segurança física de uma instalação nuclear na realização de dosimetria para a localização e a detecção de fontes radioativas.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

1. Implementação do deslocamento de avatares através de veículos automotores, possibilitando a realização de simulações em que as entradas e saídas de invasores possam ser realizadas por estes meios.
2. Implementação do cálculo de blindagem para as barreiras existentes entre as fontes radioativas e os dosímetros.
3. Implementação do cálculo de dose acumulada pelo avatar, com alertas de limites excedidos e risco de vida.
4. Implementação da comunicação entre os avatares, possibilitando simulações cooperativas, com troca de informações entre eles.
5. Desenvolvimento de um sistema de avaliação que possibilite mensurar a qualidade das ações realizadas pelos avatares durante as simulações, de acordo com objetivos propostos e metas atingidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Código de Prática para a Gestão da Segurança da Informação*. NBR ISO/IEC 17799. São Paulo. 2001.

BADLER, N. I. *LiveActor: a virtual training environment with reactive embodied agents*. Workshop on Intelligent Human Augmentation and Virtual Environments. University of North Carolina, Chapel Hill, NC. 2002.

BITELLI, T. *Física e Dosimetria das Radiações*. 2 edição. São Paulo: Atheneu. 2006.

CHATAM, R.E. *Games for training*. Communications of the Association for Computing Machinery, v.7, p. 36–43. 2007.

CNEN-NE-2.01.2011. *Proteção Física de Unidades Operacionais da Área Nuclear*. 2011.

DANIELE, T. *Poly-Modeling with 3ds Max: Thinking Outside of the Box*. Oxford: Elsevier. 2009.

DIAS, N. L.; PINHEIRO, A. G.; BARROSO, G. C. *Laboratório Virtual de Física Nuclear*. In Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, nº 2. Ceará, Brasil. Junho 2002.

FILHO, P. F. L. H.; XAVIER, A. M.; PONTEDEIRO, E. M.; FERREIRA, R. S. *Segurança Nuclear e Proteção do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: E-Papers. 2004.

FRANCIS, G. A.; TAN, H. S. *Virtual Reality as a training instrument*. In The Temasek Journal, v. 7, p.4-15, 1999.

FREITAS, V. G. G. *Determinação de dose de radiação, em tempo real, através de inteligência artificial e realidade virtual*. IEN, Rio de Janeiro, Brasil. 2009.

SANTO, A. C. E. *Uso de Realidade Virtual na criação de uma ferramenta de apoio ao planejamento de segurança física em instalações nucleares*. IEN, Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

HAJEK, B.; KANG, K.; LEE, Y.; SHIN, Y.J. *Internet virtual reality environment for simulating, predicting, and minimizing worker radiation exposure*. Proceedings of the American Nuclear Society's 4th International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Instrumentation and Human Machine Interface Technologies. ISBN 0-89448-688-8, Columbus, Ohio. 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear Security Plan - 2010-2013*. 2009.

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR. *O Instituto*. Apresenta informações sobre a instalação. Disponível em: <<http://www.ien.gov.br/oinstituto/local.php>>. Acesso em: 12 dezembro, 2013.

JACOBSON, J.; LEWIS, M. *Game engine virtual reality with CaveUT*. Computer 38, v.4, p.79–82, 2005.

JAIN, S.; McLEAN, C. *Integrated simulation and gaming architecture for incident management training*. Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference, Orlando, Florida., pp. 904–913. 2005.

MÓL, A. C. A.; JORGE, C. A. F.; COUTO, P. M.; AUGUSTO, S. C., CUNHA, G. G.; LANDAU, L. *Virtual Environments Simulation for Dose Assessment in Nuclear Plants*. Progress in Nuclear Energy, 2008.

RÓDENAS J.; ZARZA I.; BURGOS M. C.; FELIPE A.; SÁNCHEZ-MAYORAL M. L. *Developing a virtual reality application for training nuclear power plant operators: setting up a database containing dose rates in the refuelling plant*. NCBI, PubMed. Radiat Prot Dosimetry. p. 173-180, 2004.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRIZIO, R.; DI PRIZIO, A. R. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. IRD/CNEN. 5ª revisão. Rio de Janeiro, Brasil. 2003.

U.S. DOE NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Generation IV International Forum. Dezembro 2002.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear Security - Measures to Protect Against Nuclear Terrorism*. Annual Report, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *IAEA Safety Glossary - Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*. 2007.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear Security Plan - 2010-2013*. 2009.

CARTESIANO. *Proteção Radiológica: Detectores à Cintilação*. Disponível em: <<http://cartesiano.com.br/detetoressacintilacao.htm> >. Acesso em: 12 janeiro, 2014.

KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. *Realidade Virtual e Aumentada Conceitos, Projeto e Aplicações*. Mostra de Produtos e Protótipos de RV e RA – IX Symposium on Virtual and Augmented Reality – SVR, 2007.

FRANCIS, G. A.; TAN, H. S. *Virtual Reality as a training instrument*. The Temasek Journal, v. 7, p.4-15, 1999.

AUGUSTO, S. C. *Utilização de Ambientes Virtuais na Estimativa de Dose de Radiação em Instalações Nucleares*. Rio Janeiro: UFRJ. 2008.

AUGUSTO, S. C.; MÓL, A. C. A.; JORGE, C. A. F., et al. *Use of virtual reality to estimate radiation dose rates in nuclear plants*. International Atlantic Conference – INAC 2007, Santos, São Paulo, Brasil, Outubro 2007.

BURDEA, G. C.; COIFFET, P. *Virtual Reality Technology*. 2. ed. Nova Jérsei: Wiley-IEEE Press, 2003, 464p.

STANNEY, K. M. *Handbook of virtual environments: design, implementation and applications*. New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates, 2002, 1232 p.

AUTODESK. *Guia Oficial 3ds Max*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier - Campus, 2010, 648p.

CALCIOLARI, F. *3ds Max 2012 - Modelagem, Render, Efeitos e Animação*. 1. ed. São Paulo: Erica, 2011, 424p.

HARPER, J. *Mastering Autodesk 3ds Max 2013*. Camp Hill: Sybex, 2012.

GAHAN, A. *3ds Max Modeling For Games*. 2. ed. Waltham: Focal Press, 2011, 432p.

TRENHOLME, D.; SMITH, S. P. *Computer Game Engines for Developing First-Person Virtual Environments*. *Virtual Reality* 12 (3), 181 – 187. 2008.

BLACKMAN, S. *Beginning 3D Game Development with Unity 4: All-in-one, multi-platform game development*. Nova Iorque: Apress Academic, 2011, 970p.

KYAW, A. S.; PETERS, C.; SWE, T. N. *Unity 4.x Game AI Programming*. Nova Iorque: Packt Publishing, 2013, 232p.

GOLDSTONE, W. *Unity 3.x Game Development Essentials*. 2. ed. Nova Iorque: Packt Publishing, 2011, 488p.

IFE Halden Virtual Reality Centre. *VRdose software*. 2002. Disponível em: <<http://www2.hrp.no/vr/products/vrdose/download/pdf/vrdose-brochure.pdf>>. Acesso em: 03 fevereiro, 2013.

BURDEA, G.; PHILIPPE, C. *Virtual reality technology*. Nova Iorque: John Wiley & Sons. 1994.

ICRP Publication 60. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. 1990.