



REALIDADE VIRTUAL NA SIMULAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS
EM DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS

Victor Gonçalves Glória Freitas

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Roberto Schirru

Antônio Carlos de Abreu Mól

Rio de Janeiro

Maio de 2016

REALIDADE VIRTUAL NA SIMULAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS
EM DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS

Victor Gonçalves Glória Freitas

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

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

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

Prof. José Antonio Carlos de medeiros, D.Sc.

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2016

Freitas, Victor Gonçalves Glória

Realidade virtual na simulação de procedimentos operacionais em depósitos de rejeitos radioativos /Victor Gonçalves Glória Freitas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 107 p.: il.: 29,7cm.

Orientadores: Roberto Schirru

Antônio Carlos de Abreu Mól

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 103 - 107.

1. Realidade Virtual. 2. Rejeitos Radioativos. I. Schirru, Roberto *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família e amigos. Em especial dedico em memória de minha mãe, que sempre acreditou no poder de transformação da educação.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores Roberto Schirru e Antônio Carlos de Abreu Mól que me guiaram ao longo de todo o trabalho de tese, orientadores que disponibilizaram seus esforços e tempo para que um novo pesquisador fosse formado. Muito obrigado professores, palavras são poucas para descrever a gratidão e apressa que tenho pelos senhores.

Agradeço a CNEN pela bolsa concedida para a realização do doutorado. Agradeço a todos os integrantes da banca examinadora por aceitarem o convite de participação.

Meus agradecimentos também as equipes do Laboratório de Monitoramentos e Processos - LMP/PEN-COPPE e ao Instituto de Engenharia Nuclear - IEN/CNEN, que proveram todos os recursos necessários para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço ainda ao PEN que sempre conduziu este curso com extrema competência, em especial ao seu então coordenador Professor Fernando Carvalho da Silva que sempre se disponibilizou a me atender no que foi necessário. Professor Fernando muito obrigado, pela sua dedicação aos alunos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

REALIDADE VIRTUAL NA SIMULAÇÃO DE PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS
EM DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS

Victor Gonçalves Glória Freitas

Maio/2016

Orientadores: Roberto Schirru

Antônio Carlos de Abreu Mól

Programa: Engenharia Nuclear

Um dos maiores problemas na área nuclear ainda são os rejeitos radioativos gerados nas diversas aplicações desta forma de energia, todos esses rejeitos são armazenados em depósitos que, frequentemente, são monitorados e reestruturados para uma melhor alocação dos mesmos. Estes rejeitos são guardados até que seja seguro sua liberação no meio ambiente. Este trabalho apresenta uma metodologia, baseada em realidade virtual, para o desenvolvimento de depósitos virtuais de rejeitos radioativos com objetivo de possibilitar simulações virtuais nestes depósitos. Como aplicação será desenvolvido virtualmente o repositório de resíduos nucleares situado no Instituto de Engenharia Nuclear - IEN/CNEN. O desenvolvimento de um depósito virtual, mais especificamente, torna possível simular a alocação e realocação de materiais com baixo e médio nível de radioatividade, visto a possibilidade de locomoção de objetos virtuais e cálculo dinâmico da taxa de radiação neste ambiente. Utilizando esta metodologia também é possível conhecer a dose acumulada, pelo personagem virtual, nos procedimentos executados no ambiente virtual.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

VIRTUAL REALITY IN SIMULATION OF OPERATIONAL PROCEDURES IN
RADIOACTIVE WASTE DEPOSITS

Victor Gonçalves Glória Freitas

May/2016

Advisors: Roberto Schirru
Antônio Carlos de Abreu Mól

Department: Nuclear Engineering

One of the biggest problems in the nuclear area are still the radioactive waste generated in the various applications of this form of energy, all these tailings are stored in warehouses that often are monitored and restructured for better allocation of them. These tailings are stored until it is safe to release into the environment. This work presents a methodology based on virtual reality, for the development of virtual deposits of radioactive waste in order to enable virtual simulations in these deposits. As application will be developed virtually the nuclear waste repository located at the Institute of Nuclear Engineering IEN/CNEN. The development of a virtual warehouse, more specifically, makes it possible to simulate/train the allocation and reallocation of materials with low and medium level of radioactivity, seen the possibility of locomotion of virtual objects and dynamic calculation of the rate of radiation in this environment. Using this methodology it also possible know the accumulated dose, by the virtual character, during the procedures run in the virtual environment.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 TRABALHOS RELACIONADOS	5
1.2 OBJETIVO	15
2 RADIOATIVIDADE.....	17
2.1 RADIAÇÃO IONIZANTE	17
2.2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	18
2.3 RADIOPROTEÇÃO	20
2.4 MODELO DE FONTES PONTUAIS	21
2.5 CÁLCULO DE BLINDAGEM PARA RADIAÇÃO GAMA	22
3 GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS	26
3.1 REJEITOS RADIOATIVOS.....	27
3.2 SEGREGAÇÃO	27
3.3 COLETA, ACONDICIONAMENTO, E ARMAZENAMENTO.....	29
4 REALIDADE VIRTUAL.....	31
4.1 RV PASSIVA, EXPLORATÓRIA OU INTERATIVA.....	32
4.2 AMBIENTES VIRTUAIS	34
4.3 DISPOSITIVOS DE ENTRADA	35
4.4 DISPOSITIVOS DE SAÍDA	38
4.5 A FERRAMENTA DE MODELAGEM SKETCHUP	43
4.6 NÚCLEO DE JOGOS	44
4.7 AVATARES.....	45
4.8 O NÚCLEO DE JOGO UNREAL ENGINE.....	48
4.9 O NÚCLEO DE JOGOS UNITY 3D	51
5 METODOLOGIA	54
5.1 A MODELAGEM DA ESTRUTURA VIRTUAL DO DEPÓSITO E SUAS FUNCIONALIDADES.....	55
5.1.1 A MODELAGEM DA ESTRUTURA DO DEPÓSITO	55
5.1.2 A REALOCAÇÃO DE OBJETOS NO AMBIENTE VIRTUAL	62
5.2 A MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS RADIAÇÕES NO AMBIENTE VIRTUAL	65

5.2.1 O LEVANTAMENTO DOSIMÉTRICO PARA MODELAGEM VIRTUAL	67
5.2.2 OS EFEITOS DE BLINDAGEM DA RADIAÇÃO	70
5.3 VISUALIZAÇÃO DE DADOS DE RADIAÇÃO	72
6 ESTUDO DE CASO: O DEPÓSITO DE REJEITOS DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR	76
6.1 O DEPÓSITO DE REJEITOS RADIOATIVOS DO IEN/CNEN	77
6.2 RESULTADOS	79
6.2.1 QUANTO À MODELAGEM DO AMBIENTE VIRTUAL	80
6.2.2 QUANTO À MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS RADIAÇÕES NO AMBIENTE VIRTUAL..	88
6.2.3 QUANTO AO MODELO DE BLINDAGEM	93
6.2.4 QUANTO A VISUALIZAÇÃO DO PERFIL DE RADIAÇÃO EM TEMPO REAL	96
7 CONCLUSÃO.....	101
8 TRABALHOS FUTUROS.....	102
9 REFERENCIAS.....	103

Índice de Ilustrações

Figura 1 - Ambientes virtuais para treinamento de descomissionamento	6
Figura 2 - O Vrdose, desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre.....	7
Figura 3 - Vrdose, desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre	8
Figura 4 - Sistema virtual para treinamento de evacuação	9
Figura 5 - O Simulador Virtual On-Line do Reator Argonauta	10
Figura 6 - Decaimento e blindagem da radiação calculados teoricamente e apresentados virtualmente	11
Figura 7 - Mapa de distribuição de risco associado a uma operação em plantas nucleares	12
Figura 8 - Tecnologias de visualização de ambientes virtuais em dispositivos portáteis.....	13
Figura 9 - Formas de apresentação de ambientes virtuais.	14
Figura 10 - Capacidade de penetração da radiação	20
Figura 11 - Dispersão da taxa de radiação com a distância	22
Figura 12 - Esquema de uma luva de dados baseada em fibra ótica	36
Figura 13 - Dispositivo completo uma luva de dados baseada em fibra ótica.....	37
Figura 14 - Hardware kinect desenvolvido para o console Xbox.	38
Figura 15 - Oculus rift DK2, um tipo de HMD mais atual.	40
Figura 16 - CardBoard da Google.	41
Figura 17 - HMD da empresa Beenoculus.....	41
Figura 18 - Exemplo de óculos ativo que pode ser sincronizado com TV ou computador para visualização em estéreo.	42
Figura 19 - Imagem da interface do SketchUp	44
Figura 20 - Estrutura de um motor de jogo.....	45
Figura 21 - Exemplo de avatar (personagem virtual) utilizado no núcleo Unreal	46

Figura 22 - Ilustra a diferença de malhas em 3 versões do Unreal	47
Figura 23 - Interface da ferramenta de edição de cenários do unreal, o UnrealEd	49
Figura 24 - Interface do Unity 3D	52
Figura 25 - O avatar (personagem virtual) utilizado no sistema em Unreal	57
Figura 26 - O avatar (personagem virtual) do sistema em Unity	57
Figura 27 - Modelagem básica feita na ferramenta SketchUp.....	58
Figura 28 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity	59
Figura 29 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity	59
Figura 30 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity	60
Figura 31 - Poucos objetos inseridos na ferramenta unreal	61
Figura 32 - Detalhes dos pontos de luz do simulador desenvolvido em unity	62
Figura 33 - Distribuição de barris dentro de um depósito de rejeitos	63
Figura 34 - Diferenças na posição do garfo e torre da empilhadeira em unity.	65
Figura 35 - Procedimento de validação do modelo de fontes pontuais	68
Figura 36 - Situação para cálculo do coeficiente atenuador	70
Figura 37 - Visualização das retas referentes a radiação proveniente de cada barril.	71
Figura 38 - Blindagem de parte dos barris pela estrutura do ambiente	72
Figura 39 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da radiação sobre o avatar.....	74
Figura 40 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da malha radioativa	75
Figura 41 - Vista aérea do IEN/CNEN, com destaque no depósito de rejeitos radioativos.	76
Figura 42 - Planta baixa utilizada na construção do depósito de rejeitos do IEN.....	78
Figura 43 - Imagem do depósito de rejeitos radioativos.....	78
Figura 44 - Imagem com a disposição de alguns rejeitos no depósito estudado.	79
Figura 45 - Planta retirada do modelo AutoCAD sobre a qual o projeto foi executado	81

Figura 46 - Planta, na visão de cima, desenvolvida no Unreal Ed para construção do ambiente virtual.....	81
Figura 47 - Lado externo do ambiente real.....	82
Figura 48 - Lado externo do ambiente virtual em unreal	82
Figura 49 - Interior do depósito real.....	83
Figura 50 - Interior do depósito virtual através do Unreal	83
Figura 51 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D.....	84
Figura 52 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D.....	84
Figura 53 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D.....	85
Figura 54 - Imagem que, o personagem virtual, visualiza de dentro da empilhadeira.....	86
Figura 55 - Içamento do conjunto de barris utilizando a empilhadeira.	87
Figura 56 - Barris espalhados após simulação de incidente	88
Figura 57 - Representação da situação 1 testada no ambiente real.	89
Figura 58 - Ilustração da situação 2 testada no ambiente real	91
Figura 59 - Ilustração da situação 3 testada no ambiente real	92
Figura 60 - Ilustração da situação 4 testada no ambiente real	93
Figura 61 - Ilustração da situação 5 testada no ambiente real.	94
Figura 62 - Destaque da legenda de valores de taxa e dose de radiação recebidos pelo avatar..	96
Figura 63 - Ambiente virtual com a malha radioativa e a legenda de valores da radiação.	97
Figura 64 - Vista do ambiente virtual com a malha radioativa de dentro da empilhadeira	98
Figura 65 - Diferentes posições de alocação com a malha gerada.....	99
Figura 66 - Malha gerada com a simulação de incidente na operação de realocação	100

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Níveis máximos de contaminação radioativa permitidos em recipientes	29
Tabela 2 - Valores de taxa de dose gama encontrados no ambiente real e no ambiente virtual para situação 1.....	90
Tabela 3 - Valores encontrados no ambiente real referente à situação 2	91
Tabela 4 - Valores encontrados no ambiente real e no ambiente virtual para situação 3.....	92
Tabela 5 - Teste da atenuação de radiação gama para barril padrão no ambiente real.	94
Tabela 6 - Teste da atenuação de radiação gama para barril padrão no ambiente Virtual.	94
Tabela 7 - Valores de erro para medidas de atenuação entre ambiente real e virtual.	95

Acrônimos

ALARA – *As Low As Reasonably Achievable*

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

IEN – Instituto de Engenharia Nuclear

LMP – Laboratório de Monitoramentos e Processos

RWM – *Radioactive waste management*

RV – Realidade Virtual

VR – *Virtual Reality*

1 Introdução

Hoje, o mundo enfrenta problemas importantes relacionados com a demanda energética e meio ambiente. Com a crescente demanda energética, a humanidade se viu obrigada a explorar as fontes potenciais de energia como o gás natural, carvão mineral, petróleo, recursos hídricos e, a energia nuclear que, como as outras, também causa efeitos adversos ao meio ambiente. Um dos principais fatores que limitam maiores investimentos em energia nuclear é a sua imagem perante a sociedade, muitas vezes por desconhecimento a energia nuclear ainda encontra muita ojeriza por parte da população. A aceitação pública desta tecnologia tem sido considerada uma condição crítica para o seu desenvolvimento e difusão. Uma assunção comum entre decisores políticos e cientistas é a de que cidadãos informados estarão mais dispostos a apoiar tecnologias novas ou controversas. No entanto, esta assunção tem sido desafiada pela investigação que tem revelado que a percepção do risco é um processo complexo envolvendo múltiplos elementos, não sendo evidente que a informação conduza à aceitação. (HOBMAN e ASWORTH, 2013). A produção de energia por fissão nuclear é um exemplo de uma tecnologia altamente estigmatizada (FLYNN, 2003) que, no início do seu desenvolvimento, foi apresentada como um símbolo do progresso tecnológico. Tal como mostrado por Gamson e Modigliani (1989), até à década de 1970 não havia qualquer discurso anti-nuclear na mídia em geral, mas este enquadramento positivo tornou-se negativo após os acidentes nas centrais de energia nuclear de Three Mile Island e Chernobyl. Juntamente com protestos públicos anti-nucleares na Europa ocidental e o desenvolvimento dos movimentos ambientalistas, as reações públicas à energia nuclear tornaram-se com frequência fortemente negativas (Schmidt, 2003), enfatizando preocupações relativas aos seus riscos (relacionados com acidentes, terrorismo e armamento), bem como com os resíduos radioativos. Apesar disto

o uso da energia nuclear tem crescido nos últimos anos e uma maior quantidade destes resíduos tem sido gerados por esta forma de energia. Estes rejeitos, também assim chamados, emitem radiação ionizante o que é nocivo à saúde humana. Sendo assim, práticas e métodos que promovam um maior controle e treinamento no gerenciamento destes rejeitos são altamente importantes para manter os riscos de acidentes baixos (IAEA, 1999a, 1999b). Os rejeitos de pequena e média atividade, embora contenham somente uma fração pequena da atividade total produzida em escala mundial, representam mais que 90% do volume total dos rejeitos radioativos gerados no uso da energia nuclear (IAEA, 2002a). Devido a suas características peculiares, todo material radioativo está sujeito a um rígido controle quanto à sua utilização e posterior descarte. Segundo definição da CNEN, é considerado rejeito radioativo "qualquer material resultante das atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados na norma CNEN-NE-6.02, e para o qual a utilização é imprópria ou imprevista". Por essa razão, todo material radioativo que é considerado rejeito deve ser recolhido, tratado e armazenado adequadamente em instalações específicas para essa finalidade. A busca e implementação de soluções viáveis para o gerenciamento seguro do rejeito radioativo, incluindo sua deposição, é um dever da geração presente. A esta cabe implementar práticas, ambientalmente sustentáveis, que contribuam para reduzir os custos ambientais, de saúde pública e o ônus econômico imposto às gerações futuras. A Comissão Nacional de Energia Atômica (CNEN) adota em suas normas o termo deposição, para designar a colocação de rejeitos radioativos em instalações licenciadas pelas autoridades competentes, sem a intenção de removê-los (CNEN, 1985b, 1988a, 2002). Alguns países utilizam o termo para incluir descargas de efluentes para o meio ambiente (IAEA, 2003a). O sistema de deposição tem como objetivos isolar o rejeito, controlar liberações de radionuclídeos evitando que alcancem o ambiente externo e a

contaminação do meio ambiente. No sistema de deposição constam alguns procedimentos a cerca do gerenciamento dos rejeitos dentro dos depósitos de rejeitos radioativos. Uma das principais normas é o princípio ALARA (**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable) (ICRP Publication 60, 1990), ou seja, quando for necessária a exposição à radiação, esta deve ser “tão baixa quanto razoavelmente exequível”, de forma a minimizar os efeitos sobre a saúde. Outra norma importante é a observância dos limites seguros estabelecidos para dose de radiação (ICRP Publication 60, 1990).

Devido aos elevados níveis de radiação e os problemas de armazenagem a gerência segura e eficaz dos rejeitos radioativos é uma operação que se encontra entre as mais importantes à indústria nuclear (Blowers, et. al., 1991).

Na armazenagem geológica profunda os rejeitos são pouco ou raramente manipulados, já na armazenagem de superfície os tempos de meia-vida são menores e, devido à questão de espaço físico e blindagem das radiações, frequentemente os resíduos nucleares são realocados. Sendo assim, procedimentos operacionais são executados rotineiramente de modo a promover uma alocação mais eficiente dos objetos, um melhor aproveitamento do espaço físico do ambiente e a minimização da dose recebida pelo operador do depósito.

Considerando o processo rotineiro desse trabalho e devido à gravidade da questão, são de grande utilidade métodos e técnicas que permitam prever a dose de radiação absorvida por um indivíduo cuja ocupação o expõe à radiação e sistemas que auxiliem no controle do inventário de rejeitos. Neste sentido, o planejamento prévio das atividades a serem realizadas na área sujeita à radiação torna-se fundamental para que os limites seguros de dose recebida sejam respeitados.

Uma das formas possíveis de realizar o planejamento prévio dessas atividades é por meio do uso de simuladores computacionais. Treinamentos por meio dessas simulações trazem algumas vantagens, entre elas: (i) permite estimar as doses de radiação absorvidas pelos trabalhadores; (ii) não expõem os trabalhadores a nenhum nível de radiação para a realização de simulações e treinamentos, desta forma não apresentando nenhum risco para a saúde dos mesmos; (iii) contribui para um melhor planejamento das atividades nestas áreas, medindo as doses recebidas e consequentemente avaliando os riscos para a saúde; (iv) permite simulações de instalações já projetadas, mas ainda não construídas, de composição complexa, ou que podem ser de difícil acesso, devido a restrições, inviabilidade, inconveniências, (v) permitem um maior controle visto que o ambiente computacional reproduz fielmente o ambiente real e (vi) demonstram à sociedade a preocupação quanto à segurança de materiais radioativos pelo fato de buscar de novas tecnologias que melhorem o controle e treinamento no gerenciamento destes resíduos. A Realidade Virtual é considerada uma tecnologia com grande potencial e aplicabilidade em diversas áreas da engenharia para visualização, treinamento, estudos ergonômicos, simulações e experimentações virtuais e a cada dia são descobertos novos empregos desta tecnologia.

Um importante campo de pesquisa são as simulações baseadas em núcleos de jogos, este é chamado de *Serious Games*. O conceito dessa área é a utilização de núcleos de jogos, para aplicações não comerciais, na construção de simuladores que utilizem ambientes virtuais. Diferentes trabalhos mostram a aplicabilidade dos núcleos de jogos (Chatam, R.E., 2007; Jacobson, J. et al, 2005; Jain, S. et al., 2005). Muitos casos são direcionados ao treinamento de situações de emergência (Badler, N.I., 2002; Hajek, B., et. al., 2004; Iguchi, Y., et. al., 2004; Mól, A.C.A. et. al., 2009). Na área nuclear a realidade virtual tem sido usada principalmente na simulação de operações em instalações com níveis de radiação acima dos padrões naturais,

segundo Freitas et al (2011), os ambientes virtuais proporcionam o treinamento de procedimentos operacionais sem a necessidade de os usuários estarem expostos às taxas de radiação ionizante. Outros trabalhos também mostram a contribuição da RV na área nuclear.

1.1 Trabalhos relacionados

Ao longo dos últimos anos diversos trabalhos utilizaram novas tecnologias na área nuclear, entre elas está a realidade virtual. Alguns trabalhos relacionados, em ordem cronológica, podem ser vistos a seguir.

- O Trabalho de Rindahl et al. (2006), figura 1, desenvolve um simulador para treinamento em realidade virtual da máquina de recarga da central nuclear de Leningrado (LNPP), desenvolvido em cooperação com o Instituto de Pesquisa Kurchatov Centro Russo (RRC KI) também teve o objetivo de ser usado em conexão com o descomissionamento de três reatores em Chernobyl , na Ucrânia. Neste artigo foram descritas experiências no uso da RV em processos de descomissionamento, bem como os resultados de trazer a tecnologia para instalações planejadas ou produtivas.

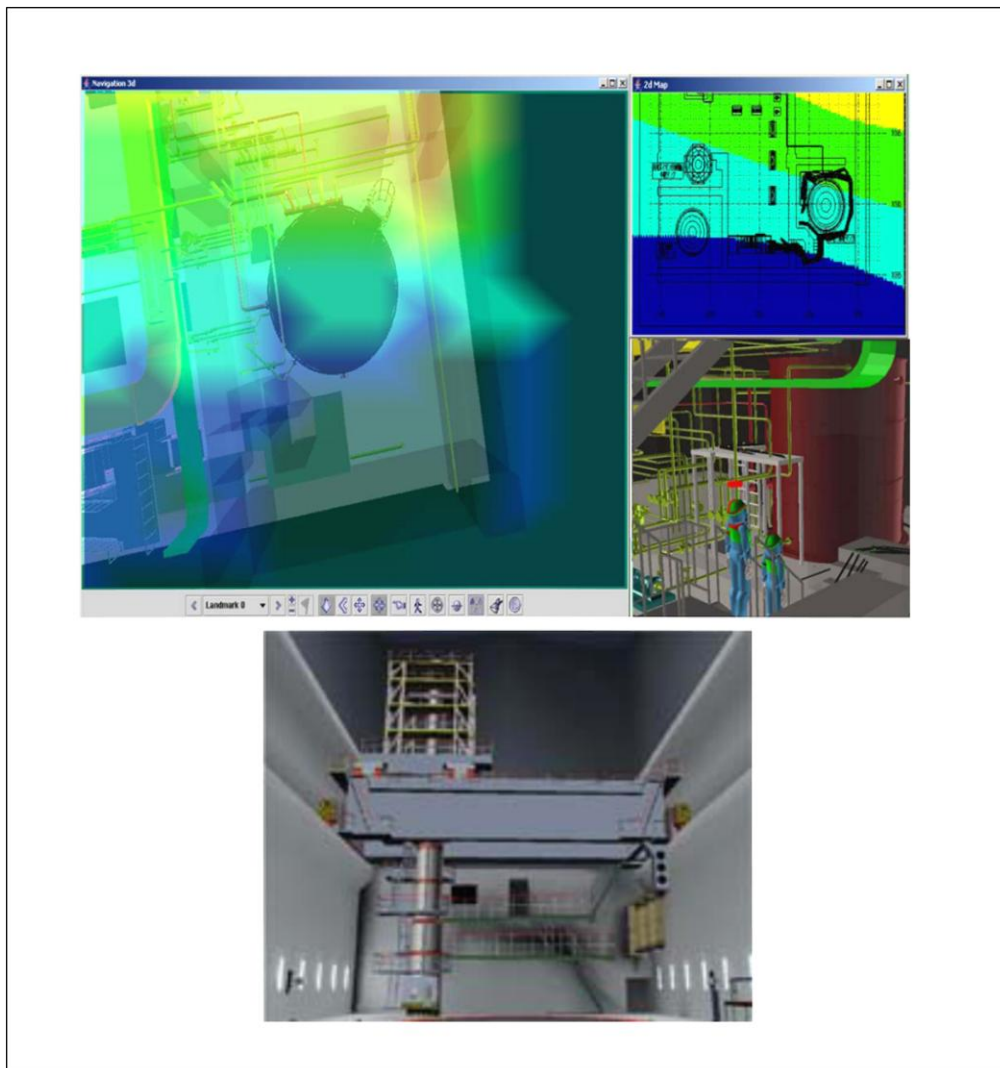


Figura 1 - Ambientes vituais para treinamento de descomissionamento

- O Vrdose, figuras 2 e 3, (Halden Virtual Reality Centre, 2008), - desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre é uma ferramenta capaz de exibir a distribuição da taxa de dose e fornecer estimativa de doses ocupacionais para cenários de trabalho em instalações nucleares. Pode ser utilizado para melhorar a percepção dos operadores sobre a radiação na instalação e fazer previsões calculadas a partir de levantamentos dosimétricos previamente realizados na instalação.

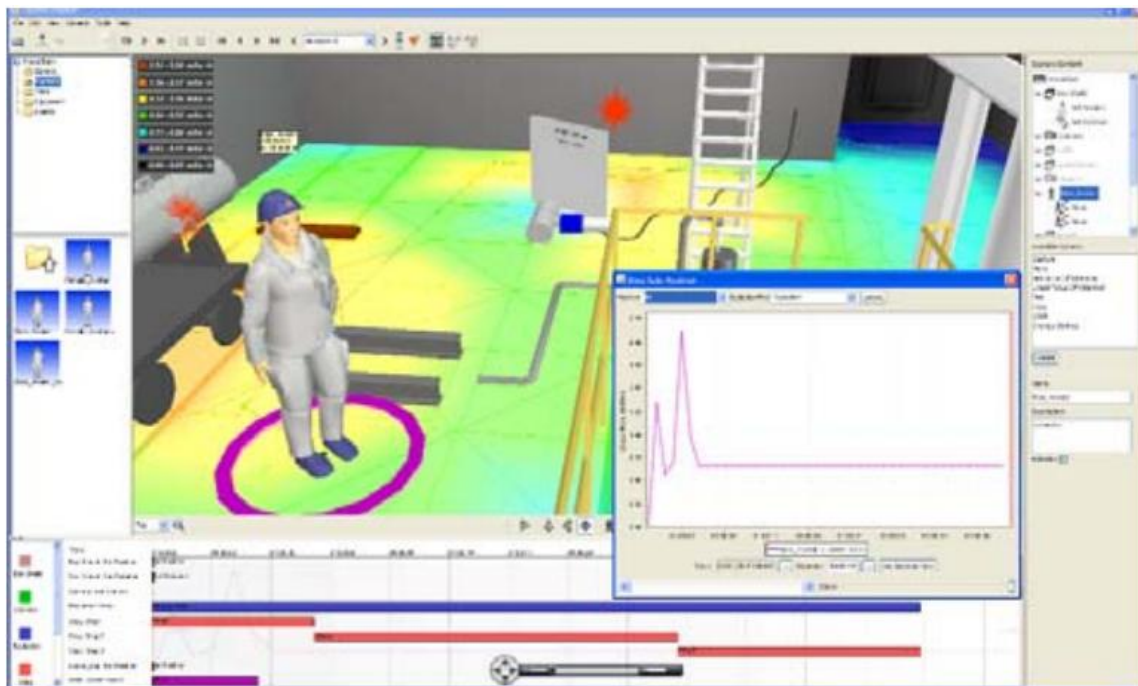


Figura 2 - O VrDose, desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre

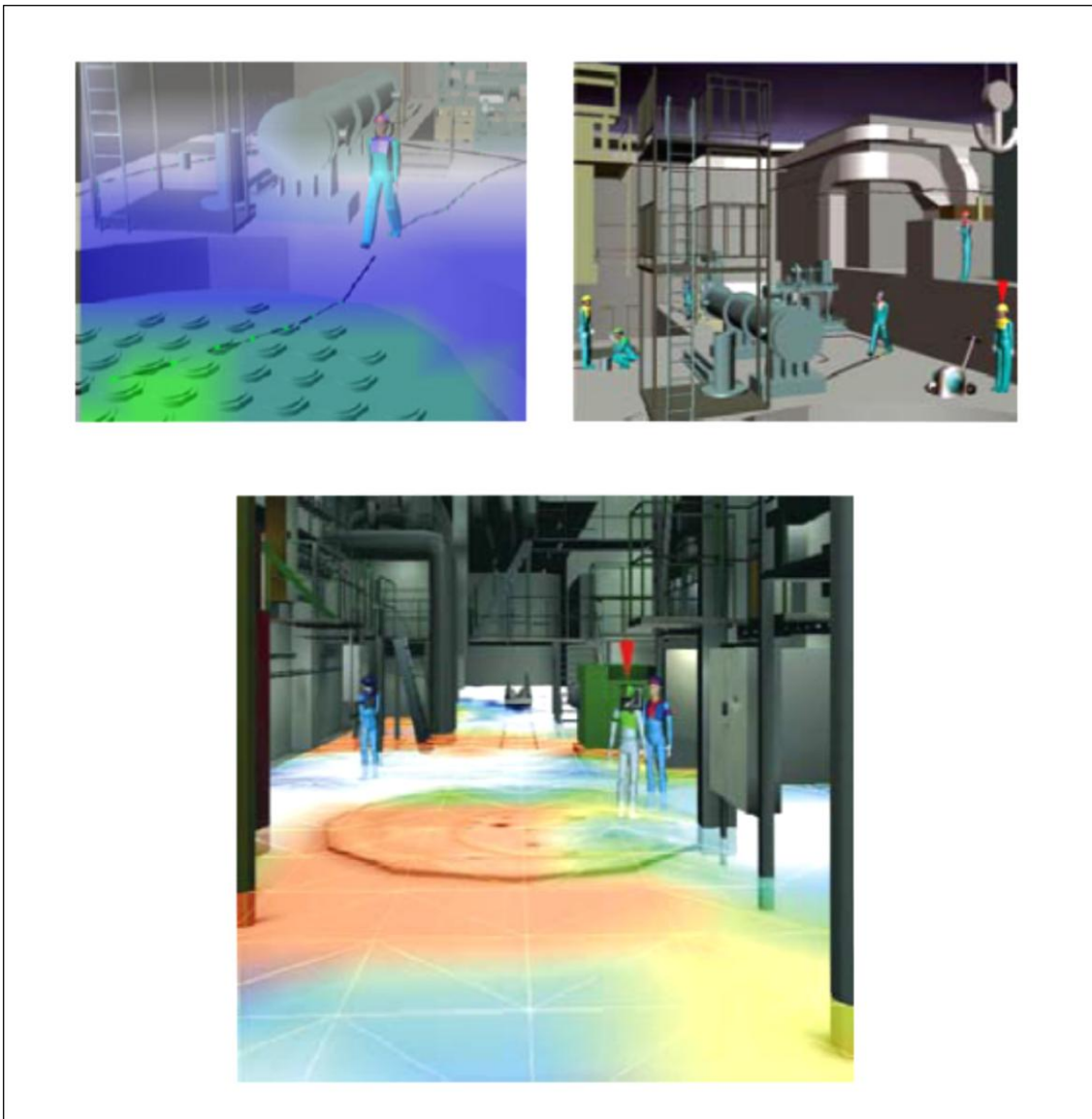


Figura 3 - Vrdoose, desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre

- O Sistema Virtual para Treinamento de Evacuação (MÓL, *et. al.*, 2008a), figura 4, desenvolvido pelo LabRV do IEN - simula virtualmente a evacuação de um ambiente real, com cronometragem de tempo, permitindo que diversos cenários de condição de fuga possam ser avaliados (rotas diferentes, saídas obstruídas, etc.). Para isto, um núcleo de jogo foi reprogramado, destacam-se: (i) modelagem virtual do ambiente respeitando as dimensões

físicas do sítio real; (ii) inclusão de um medidor de tempo decorrido na evacuação; (iii) propriedades do personagem virtuais (avatar) alteradas para tornar sua simulação mais realista (velocidade e área de colisão do personagem ajustados de modo a reproduzir fielmente o movimento humano); (iv) simulação utilizando a rede local para a participação simultânea, no mesmo cenário, dos avatares de outros usuários (permitindo que os avatares de diferentes usuários interajam entre si e realizem tarefas em equipe durante a simulação).



Figura 4 - Sistema virtual para treinamento de evacuação

- O Simulador Virtual On-Line do Reator Argonauta (FREITAS, *et al.*, 2009), figura 5, este sistema permite simular virtualmente a circulação em área sujeita à radiação, informando tanto a dose acumulada como a taxa de dose instantânea de maneira on-line utilizando medidores de radiação de área instalados no ambiente real. A partir dos medidores é possível interpolar e assim estimar a taxa de radiação ao longo do ambiente utilizando técnicas de inteligência artificial no cálculo da taxa de dose.



Figura 5 - O Simulador Virtual On-Line do Reator Argonauta

VABØ, R et al (2010) calcula os valores teóricos de decaimento e atenuação de diferentes radioisótopos e os apresenta em ambientes tridimensionais modelados, segundo o trabalho, desta forma, a visualização e o entendimento são mais eficientes durante uma previsão de operação em instalações nucleares, visto que a compreensão do recebimento de dose é um processo mentalmente complexo de se entender. Na figura 6 pode-se ver uma imagem da apresentação dos efeitos das radiações no ambiente virtual, todavia este ambiente não permite uma dinâmica de operação.

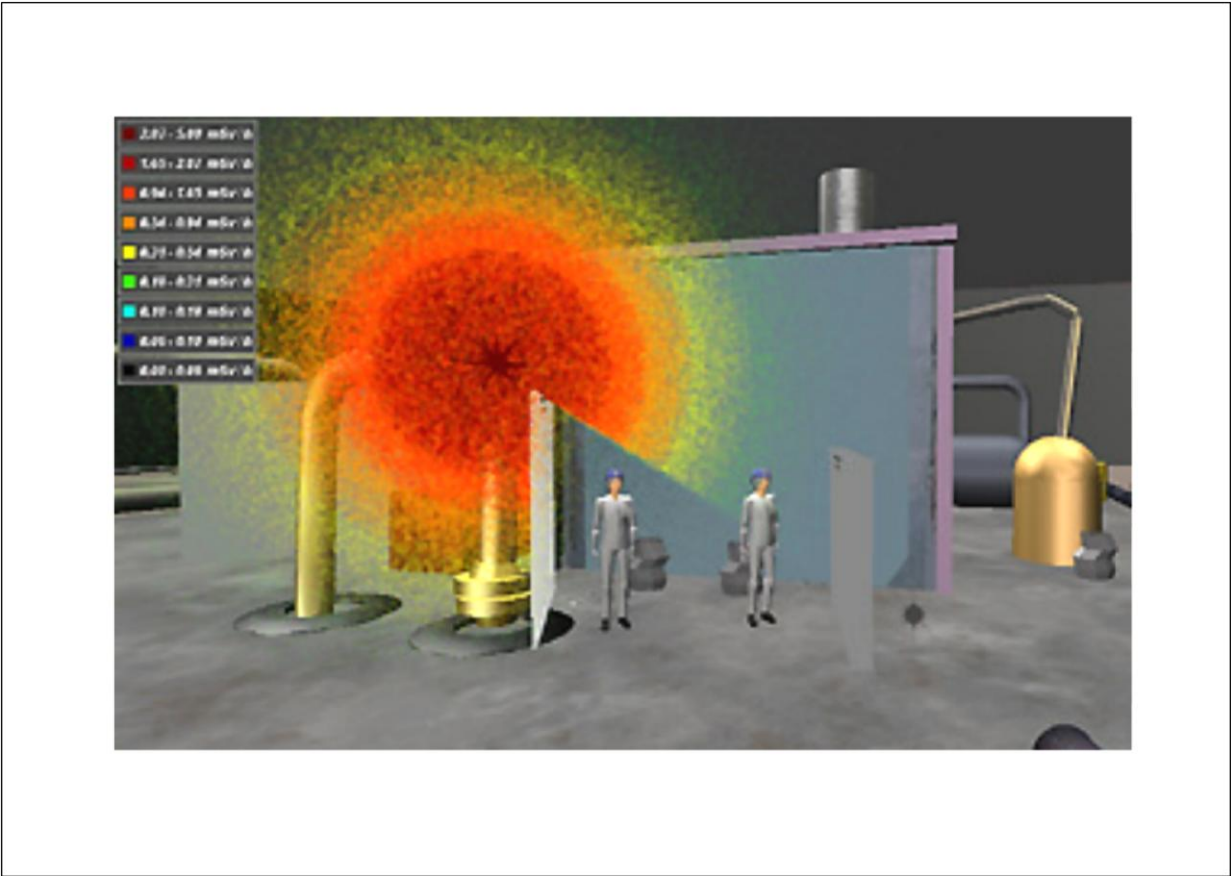


Figura 6 - Decaimento e blindagem da radiação calculados teoricamente e apresentados virtualmente

- Louka et al (2014) desenvolve um mapa virtual de distribuição do risco associado a operações em instalações nucleares, ainda segundo o autor com a malha é possível uma breve avaliação conservativa do risco associado a um determinado equipamento ou procedimento. A figura 7 ilustra a malha desenvolvida no trabalho deste autor.

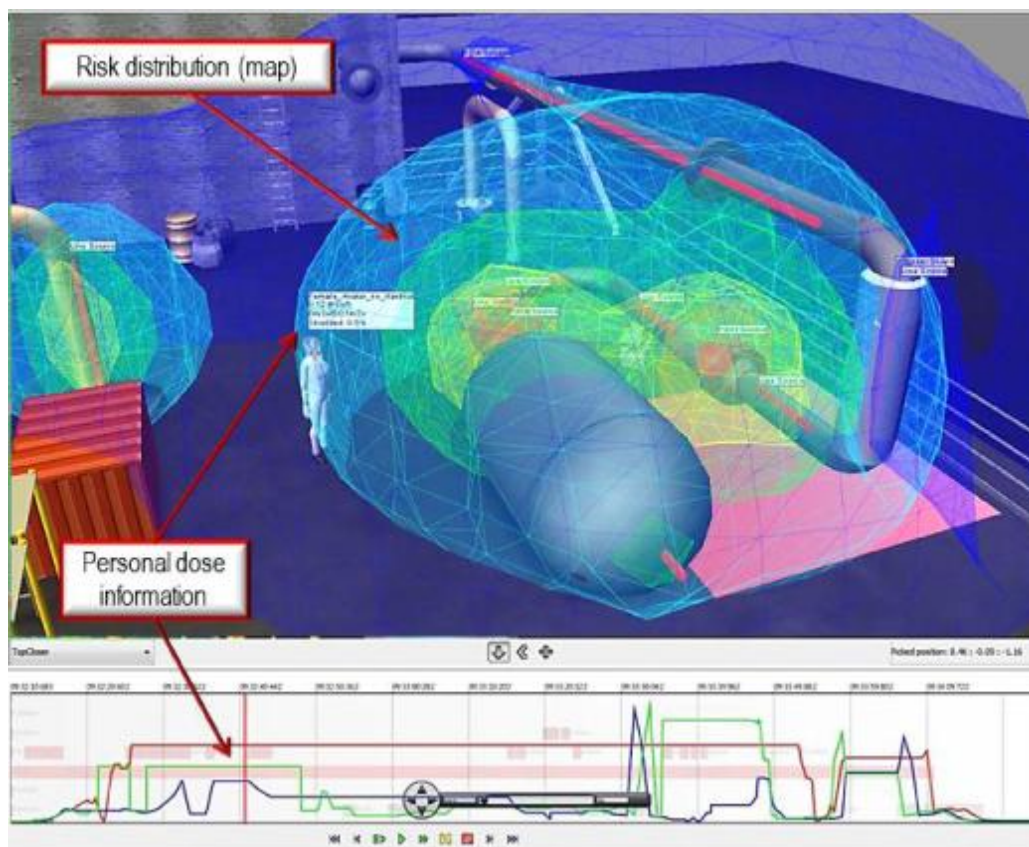


Figura 7 - Mapa de distribuição de risco associado a uma operação em plantas nucleares

- O trabalho de Szöke (2105) apresenta um sistema baseado em realidade virtual para o treinamento e visualização de práticas para o descomissionamento de plantas nucleares, ainda segundo o autor as atuais tecnologias podem ser aplicadas para melhorar a estratégia de descomissionamento internacional, com especial incidência na simulação tridimensional, realidade virtual, interfaces de usuário avançadas, móveis e dispositivos portáteis e sistemas de informação geográfica. Os resultados demonstram que as tecnologias emergentes têm grande potencial para apoiar a adoção de novos instrumentos, melhorar a visualização dos dados e gestão do conhecimento, otimizando os planos de projeto, operadores de briefing, campo de treinamento, a comunicação, vigilância e educação em geral. Nas figuras 8 e 9 podem ser vistas ilustrações dos sistemas e dispositivos.



Figura 8 - Tecnologias de visualização de ambientes virtuais em dispositivos portáteis



Figura 9 - Formas de apresentação de ambientes virtuais.

Entretanto, nenhum desses trabalhos considerou a mudança do perfil da distribuição, com visualização dinâmica, da radiação no ambiente em função da dinâmica da operação utilizando valores reais de dose validados no ambiente real, a junção de todas estas novas inovações constrói o objetivo deste trabalho.

1.2 Objetivo

Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de depósitos virtuais. Esta metodologia baseia-se na construção de um cenário virtual e uma programação, em núcleo de jogos, para que seja possível a modelagem de radiações e a apresentação dinâmica, em tempo real, dos valores de taxa de dose gama presentes no ambiente real. Por meio de simulações em ambiente virtual, sendo uma réplica do real, é possível à estimativa de dose de radiação gama recebida por um indivíduo no ambiente virtual e, desta forma, pode-se ter uma relação direta com a radiação que o indivíduo receberá no ambiente real.

Os depósitos virtuais de rejeitos radioativos devem permitir as principais operações executadas no ambiente real. A principal operação é a realocação frequente dos barris que contém materiais radioativos. No depósito virtual apresentado neste trabalho será possível a realocação e o cálculo do recebimento de radiação em tempo real de realocação, também foi feita uma apresentação do perfil de radiação na forma de malha colorida por espectro de intensidade da radiação em tempo de realocação esta tem o objetivo de apresentar o valor de radiação de forma qualitativa em todo o ambiente. Todas essas funcionalidades, aliadas ao um

bom grau de realismo, melhoram os resultados do treinamento e entendimento da operação como um todo.

2 Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno natural ou artificial, pelo qual algumas substâncias ou elementos químicos, chamados radioativos, são capazes de emitir radiações, as quais têm a propriedade de ionizar gases, produzir fluorescência, atravessar corpos opacos etc. As radiações emitidas pelas substâncias radioativas são principalmente partículas alfa, partículas beta e raios gama. A radioatividade é uma forma de energia nuclear e consiste no fato de alguns átomos como os do urânio, rádio e tório serem “instáveis”, perdendo constantemente partículas alfa, beta e gama (raios-X), afim de passarem de um estado energético mais alto a um estado mais estável energeticamente. O urânio, por exemplo, tem 92 prótons, porém através dos séculos vai perdendo-os na forma de radiações, até terminar em chumbo, com 82 prótons estáveis.

2.1 Radiação Ionizante

As radiações são chamadas de ionizantes pela capacidade da geração de íons, ou seja, a radiação tem energia suficiente para ionizar átomos, transformando-os em partículas carregadas eletricamente e instáveis. Os tipos de radiação mais comuns são, radiação alfa, radiação beta e radiação gama. A radiação alfa são fluxos de partículas carregadas positivamente, compostas por 2 nêutrons e 2 prótons (núcleo de hélio). São desviadas por campos elétricos e magnéticos. São muito ionizantes porém pouco penetrantes. Quando um radioisótopo, que possui núcleo instável, emite uma partícula alfa, seu número de massa (A) diminui 4 unidades e o seu n° atômico diminui 2 unidades. A radiação beta são fluxos de

partículas originárias do núcleo, fato este que as distingue dos elétrons. Estas partículas tem a mesma natureza dos elétrons orbitais, e são resultantes da desintegração de nêutrons do. É desviada por campos elétricos e magnéticos por serem carregadas negativamente. É mais penetrante porém menos ionizante que a radiação alfa. Quando um radioisótopo emite uma partícula beta, o valor de sua massa não muda, e seu nº atômico aumenta em 1 unidade. A radiação gama são ondas eletromagnéticas. É o tipo mais penetrante de radiação. Não apresenta carga elétrica e não é afetada pelos campos elétricos e magnéticos. É uma radiação muito perigosa aos organismos vivos. Com o recebimento da Radiação Gama, pode-se alterar o material genético da pessoa e esse tipo de radiação um dos principais focos de estudo do trabalho aqui apresentado.

2.2 Interação da radiação com a matéria

As radiações são processos de transferência de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas e, ao interagir com a matéria, resulta na transferência de energia para os átomos e moléculas que estejam em sua trajetória. Sob ponto de vista da física, as radiações, ao interagirem com um meio material, podem provocar ionização, excitação, ativação do núcleo ou emissão de radiação de frenamento.

- Ionização: processo de formação de átomos eletricamente carregados, ou seja, íons, pela remoção ou acréscimo de um ou mais elétrons.

- Excitação: adição de energia a um átomo, elevando-o do estado fundamental de energia ao estado de excitação. Os elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente sob a forma de radiação (luz ou raios-X característicos).

- Ativação do Núcleo: interação de radiações com energia superior à energia de ligação dos núcleons e que provoca reações nucleares, resultando num núcleo residual e na emissão de radiação.

- Radiação de Frenamento: radiação, em particular raios-X, emitida em decorrência da perda de energia cinética de elétrons que interagem com o campo elétrico de núcleos de átomos-alvo, átomos estes com elevado número atômico, ou mesmo que interagem com a eletrosfera.

Em decorrência das diferenças existentes entre as partículas e radiações, em suas cargas e suas massas, cada um deles interage de modo diferente com a matéria. O conhecimento das propriedades das radiações e de seus efeitos sobre a matéria são de grande importância, destacando-se: a detecção de substâncias radioativas, uma vez que se baseia, sempre, em alguns dos efeitos produzidos pela radiação na parte sensível do equipamento de medida; a maior facilidade na interpretação das diversas aplicações dos materiais radioativos; e a adoção das medidas preventivas mais apropriadas, de modo a proteger o corpo humano dos efeitos nocivos da radiação. Quando as partículas carregadas ou a radiação eletromagnética atravessam a matéria, o mecanismo que mais contribui para a perda de energia é a interação com os elétrons. Isto se justifica pelo fato do raio do núcleo ser da ordem de dez mil vezes menor que o raio do átomo. Assim, é de se esperar que o número de interações com elétrons seja muito maior que com núcleos, uma vez que o número de interações é proporcional à área projetada. Para o caso específico de partículas carregadas, este fenômeno é facilmente evidenciado a partir da dispersão que elas experimentam ao interagir com a matéria. As partículas mais pesadas são pouco desviadas de sua direção original quando interagem, perdendo energia. As partículas beta, por serem menos pesadas, são desviadas com ângulos muito maiores ao interagirem com o meio. As perdas de energia resultante de colisões com núcleos resultam ser várias ordens de grandeza menores que na interação com elétrons. Na

figura 10 podemos observar um esquema da capacidade de penetração dos principais tipos de radiação.

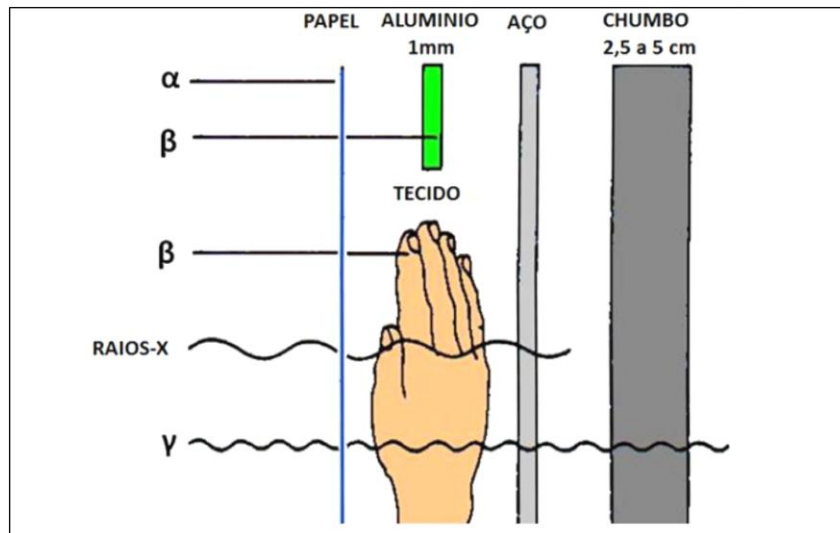


Figura 10 - Capacidade de penetração da radiação

2.3 Radioproteção

Devido à radiação ser um fenômeno imperceptível aos sentidos e possuir efeitos nocivos para o meio ambiente e os seres vivos, é necessária a adoção de um conjunto de medidas para a proteção destes, especialmente para os indivíduos ocupacionalmente expostos à radiação. Estas medidas incluem a utilização de monitores de dose de radiação e de roupas protetoras, e a observância de regras e de procedimentos de operação que visam evitar acidentes com radiação e diminuir a exposição dos trabalhadores à radiação. A radioproteção ou proteção radiológica (PASTURA, 2003) visa proteger a saúde do ser humano dos efeitos nocivos da exposição à radiação, e permitir a indivíduos ocupacionalmente expostos às radiações

ionizantes a execução segura de suas atividades. Os efeitos nocivos podem manifestar-se em curto prazo em caso de exposições a doses muito altas de radiação, mesmo que a duração da exposição seja curta, e em longo prazo em caso de exposições frequentes e/ou de longa duração, mesmo que a dose de radiação seja baixa. Para evitar e/ou minimizar a incidência destes efeitos nocivos, a radioproteção busca reduzir a exposição do ser humano às radiações ionizantes ao mínimo, tanto em nível de duração de exposição como de intensidade de dose. A radioproteção também é responsável pela descontaminação de locais onde ocorreu vazamento de material radioativo, visando minimizar os efeitos nocivos para a saúde do ser humano e o meio ambiente.

2.4 Modelo de fontes pontuais

O aumento da distância entre uma fonte de radiação ionizante e um indivíduo é um modo simples para minimizar a exposição, e, conseqüentemente, o acúmulo de dose. No caso de fontes puntiformes, é válida a Lei do Inverso do Quadrado da Distância, qual seja:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (1)$$

Onde I_1 e I_2 são as intensidades das Taxas de Dose nas distâncias d_1 e d_2 da fonte, respectivamente como ilustra a figura 11.

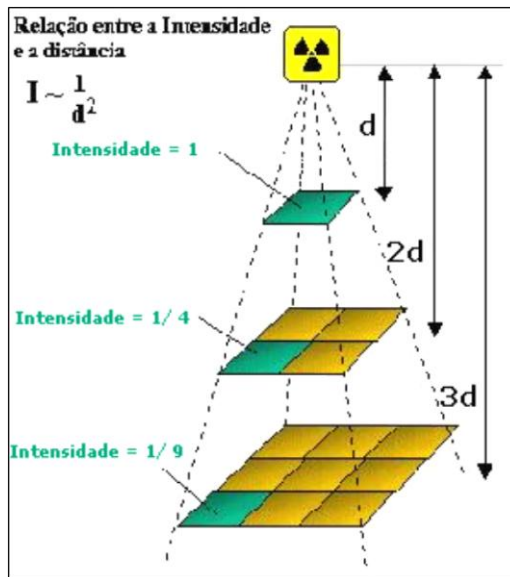


Figura 11 - Dispersão da taxa de radiação com a distância

Por exemplo, quando a distância de um indivíduo à fonte dobra, a taxa de dose é reduzida a um quarto do seu valor inicial. Este modelo foi usado para o cálculo de toda a radiação dentro do ambiente virtual.

2.5 Cálculo de Blindagem para Radiação Gama

Quando um feixe de radiação γ atravessa um determinado material, podem ocorrer interações através dos três processos citados acima. Após uma interação qualquer, um raio γ é removido do feixe (ou é absorvido completamente, ou é desviado da direção inicial do feixe). Quanto maior for a distância atravessada pelo feixe dentro do material, maior será o número de raios γ perdidos e menor será a intensidade do feixe. O parâmetro que permite quantificar a quantidade de fótons que interagem em um dado material por unidade de comprimento deste material é o coeficiente de atenuação linear, μ . Este coeficiente, que depende da energia, $h\nu$,

do fóton incidente e do número atômico do material atenuador, pode ser descrito como a probabilidade, por unidade de comprimento, que o fóton sofra uma interação no absorvedor, ou seja,

Quando um feixe de raios gama monoenergéticos colimados passam através de um material absorvedor de espessura variável, observa-se uma atenuação exponencial desses raios. Cada um dos processos de interação com a matéria remove fótons do feixe, ou por absorção ou por espalhamento, e pode ser caracterizado por uma probabilidade fixa de ocorrência por unidade de comprimento (espessura) do material absorvedor. A soma das probabilidades de ocorrência desses processos é simplesmente a probabilidade, por unidade de comprimento, de que o fóton seja removido do feixe e é chamado coeficiente linear de atenuação total, μ . O número de fótons transmitidos (I) é, então, dado em termos do número de fótons sem a presença do absorvedor, I_0 , por :

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \quad (2)$$

O emprego do coeficiente linear de atenuação apresenta a desvantagem de este variar com a densidade do meio absorvedor. Assim, o coeficiente de atenuação mássico, μ/ρ , onde ρ representa a densidade do meio, é mais amplamente empregado para expressar a lei da atenuação exponencial.

$$I = I_0 \cdot \exp \left[\left(\frac{-\mu}{\rho} \right) \cdot \rho \cdot x \right] \quad (3)$$

O produto $\rho \cdot x$, conhecido por espessura mássica do absorvedor ou da blindagem, é o parâmetro que determina o grau de atenuação expresso em mg/cm^2 .

A lei de atenuação exponencial para o feixe incidente supõe que os fótons espalhados pelo efeito Compton são totalmente desviados do feixe transmitido na direção de detecção. Ou seja, sua característica essencial é que somente raios gama da fonte que não interagem com o meio podem ser detectados. No entanto, isso somente ocorre no caso de feixe colimado e espessura fina de blindagem, requisitos conhecidos como boa geometria.

Na realidade, no entanto, o detector pode registrar tanto os raios gama diretamente incidentes como aqueles que foram espalhados, mas retornam à direção de detecção ou, mesmo, outros tipos de radiação secundária. Assim, o sinal detectado será maior do que aquele que seria, sob condições de boa geometria. Essa situação é normalmente contornada pela introdução de um fator de correção, conhecido por fator de *Build-up*, que depende da energia da radiação incidente, E_γ , bem como da espessura e do coeficiente de atenuação do meio absorvedor.

$$I = I_0 \cdot B(x_1 E_\gamma) \exp \left[\left(\frac{-\mu}{p} \right) \cdot p \cdot x \right] \quad (4)$$

Para fontes pontuais, uma boa aproximação para o cálculo da taxa de dose pode ser feita por meio da utilização da constante específica de radiação gama, Γ , bem como uma energia média para a determinação do fator de build-up. No caso de ser desprezível o fator de build-up, a taxa de exposição é dada por:

$$X = \Gamma \frac{A}{d^2} \left(\frac{R}{h} \right) \quad (5)$$

e, conforme visto anteriormente, está relacionada à taxa de dose no ar por:

$$D = 0,86 \cdot X \quad (6)$$

Valores da constante específica da radiação gama, também conhecida como “gamão”.

Desta forma para calcular estes valores e chegar à medida de atenuação de cada objeto as propriedades do material são essenciais, neste trabalho a medida de atenuação foi tirada diretamente do ambiente real utilizando detectores e arranjos entre objetos atenuadores e fontes. Independente da aproximação de boa geometria citada se chegou a um grau atenuador para cada tipo de objeto e, desta forma, foi possível programar estas atenuações no ambiente virtual e com isso chegar a uma medida de radiação com ótima aproximação.

3 Gerência de rejeitos radioativos

A gerência de rejeitos radioativos tem por objetivo maior a proteção dos seres humanos e a preservação do meio ambiente, limitando possíveis impactos radiológicos para as gerações futuras. Esta abrange um conjunto de atividades administrativas e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e eliminação ou depósito final de rejeitos radioativos.

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2002a), a gerência responsável de rejeitos radioativos está fundamentada em nove princípios:

- Princípio 1: Proteger a saúde humana;
 - Princípio 2: Proteger o meio ambiente;
 - Princípio 3: Proteger além das fronteiras do País;
 - Princípio 4: Proteger as gerações futuras;
 - Princípio 5: Não transferir ônus indevidos às gerações futuras;
 - Princípio 6: Estabelecer, no País, um sistema legal apropriado;
 - Princípio 7: Minimizar a Geração de Rejeitos;
 - Princípio 8: Levar em consideração a interdependência entre geração e gerência de rejeitos;
- e
- Princípio 9: Garantir a segurança de instalações de gerenciamento de rejeitos.

Para assegurar a adoção desses princípios fundamentais, a autoridade competente de cada país deve, entre outras medidas, estabelecer limites para eliminação direta de rejeitos radioativos no ambiente. Para tanto, são levados em consideração tanto os limites de doses

individuais, estes baseados na presença de uma Instalação Nuclear ou Radiativa em determinado local como, também, nas existências futuras de instalações vizinhas. Assim sendo, um valor correspondente a apenas uma fração do limite de dose individual para o público é normalmente adotado pela autoridade competente como limite autorizado para descarte de um determinado material radioativo por uma instalação Nuclear ou Radiativa.

3.1 Rejeitos radioativos

Resíduos ou rejeitos radioativos são todos materiais que tiveram contato de maneira direta ou indiretamente com fontes radioativas e de alguma forma foram contaminados e estão emitindo radiação. Também são considerados rejeitos radioativos os produtos de fissão provenientes de reatores nucleares. Todavia a grande maioria os rejeitos são de materiais descartáveis, por exemplo, luvas, óculos, botas, roupas, etc., estes que são utilizados no cotidiano e que são provenientes da produção de eletricidade, radiofármacos e outros que utilizam fontes em seus processos, como por exemplo, detectores de fumaça e para raios, Estes são os resíduos que representam cerca de 90% de todo resíduo gerado em atividades nuclear. Os produtos de fissão de reatores são tratados pela própria usina nuclear e, pelo seu nível de atividade, são tratados de outra maneira.

3.2 Segregação

Com relação à segregação de materiais radioativos, segundo a AIEA (AIEA, 1999a), algumas regras gerais e específicas devem ser seguidas:

Regras Gerais:

- Não misturar rejeitos sólidos com líquidos
- Não misturar rejeitos orgânicos com inorgânicos
- Não misturar Rejeitos biológicos com não biológicos

Regras Específicas:

- Rejeitos contaminados com Tc-99m devem ser segregados dos demais rejeitos radioativos, posto que sua meia-vida curta permite que após um mês de armazenamento (equivalente a um fator de decaimento da ordem de 10^{-36}), eles possam ser descartados com segurança através do sistema de coleta de lixo urbano (sólidos) ou pela rede de esgoto sanitário (líquidos);

- Rejeitos contendo C-14 também devem ser segregados dos demais rejeitos, uma vez que seu armazenamento para decaimento não surte efeito. Neste caso, face à meia-vida elevada deste radionuclídeo, os rejeitos devem ser recolhidos à CNEN.

- Rejeitos contendo H-3 que, além de possuir meia-vida longa, são de difícil detecção, também devem ser segregados dos demais rejeitos e recolhidos à CNEN.

- Rejeitos contendo Na-24 também devem ser segregados dos demais rejeitos e isolados, face aos elevados riscos de dose externa. Entretanto, o armazenamento para posterior decaimento é bastante eficiente neste caso, posto que sua meia-vida de 15 horas permite que, após dois meses de armazenamento (correspondendo a um fator de decaimento de 10^{-29}) eles sejam eliminados através do sistema de coleta de lixo urbano ou pela rede de esgoto.

- Rejeitos contendo Sr-90e Ca-45 também devem ser segregados dos demais rejeitos, visto que o armazenamento para posterior decaimento não surte efeito com estes radionuclídeos. Cuidados devem ser observados durante o manuseio do Sr-90, devido aos

riscos de irradiação externa e, principalmente, aos riscos relacionados com as doses provenientes de contaminação de pele.

- Rejeitos contendo I-131, I-125, Cr-51 e P-32 podem ser armazenados para decaimento e posteriormente eliminação através do sistema de coleta de lixo urbano ou pela rede de esgoto sanitário.

3.3 Coleta, Acondicionamento, e Armazenamento

Para a coleta de rejeitos sólidos, são utilizados normalmente recipientes metálicos, forrados internamente com saco plástico reforçado, preferencialmente em cor viva, ostentando claramente o símbolo de radiação e portando a indicação da categoria de rejeitos para qual foi destinado. Os rejeitos líquidos devem ser coletados em frascos pequenos, normalmente de até dois litros, com tampa rosqueada vedante. O material do recipiente deve ser escolhido de modo a não interagir com o líquido armazenado, especialmente no caso de líquidos orgânicos. Sempre que possível deve ser utilizado material plástico. Os recipientes não devem apresentar contaminação superficial externa em níveis superiores aos estabelecidos na tabela 1 Os níveis de contaminação são obtidos pela média de medições realizadas numa área de 300 cm², em todas as faces da superfície externa do recipiente.

Tabela 1 - Níveis máximos de contaminação radioativa permitidos em recipientes

Tipo de Emissão	Nível Máximo Permissível	
	<i>Bq/cm²</i>	<i>μCi/cm²</i>
Emissores β e γ e emissores α de baixa toxicidade	4	10 ⁻⁴
Todos os outros emissores α	0,4	10 ⁻⁵

Os depósitos de superfície condicionam todo este material, os padrões e práticas da gestão destes resíduos precisam ser constantemente treinados. A realocação destes barris dentro dos depósitos é uma das atividades mais importante, visto que os próprios objetos são usados como blindagem no processo de alocação.

4 Realidade virtual

Pode-se dizer, de uma maneira simplificada, que Realidade Virtual (RV) é a forma mais avançada de interface do usuário com o computador até agora disponível (Burdea, G. C. P, 2003). Trata-se de uma interface que simula um ambiente real e permite aos participantes interagirem com o mesmo (Latta, 1994), permitindo às pessoas visualizarem, manipularem e interagirem com representações complexas (Aukstakalnis, 1992). Ela é um paradigma pelo qual usa-se um computador para interagir com algo que não é real, mas que pode ser considerado real enquanto está sendo usado (Hand, 1994). Outra definição é o uso de computadores e interfaces com o usuário para criar o efeito de mundos tridimensionais que incluem objetos interativos com uma forte sensação de presença tridimensional (Bryson, 1996). Além disso, a RV engloba um conjunto de técnicas e ferramentas gráficas 3D que permite aos usuários interagir com um ambiente gerado por computador, em tempo real, com uma pequena ou nenhuma consciência de que está usando uma interface usuário-computador (Leston, 1996).

O objetivo dessa tecnologia é recriar ao máximo a sensação de realidade para um indivíduo, levando-o a adotar essa interação como uma de suas realidades temporais. Para isso, essa interação é realizada em tempo real, com o uso de técnicas e de equipamentos computacionais que ajudem na ampliação do sentimento de presença do usuário. Além da compreensão da RV como simulação da realidade através da tecnologia, a RV também se estende a uma apreensão de um universo não real, um universo de ícones e símbolos, mas permeando em um processo de significação o espectador desse falso universo o fornece créditos de um universo real . A Realidade Virtual também pode ser caracterizada pela coexistência integrada de três ideias básicas: imersão, interatividade e envolvimento. A imersão está ligada com o sentimento de

estar dentro do ambiente, a interação é a capacidade de o ambiente responder as ações do usuário em tempo real, e o envolvimento determina o grau de motivação do usuário com a atividade.

4.1 RV passiva, exploratória ou interativa

Um aplicativo de RV pode proporcionar uma sessão sob três formas diferentes: Passiva, Exploratória ou Interativa (Adams, 1994). Uma sessão de RV passiva proporciona ao usuário uma exploração do ambiente automática e sem interferência. A rota e os pontos de observação são explícitos e controlados exclusivamente pelo software. O usuário não tem controle algum, exceto talvez, para sair da sessão. Uma sessão de RV exploratória proporciona uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário. O participante pode escolher a rota e os pontos de observação, mas não pode interagir de outra forma com entidades contidas na cena.

Uma sessão de RV interativa proporciona uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário e, além disso, as entidades virtuais do ambiente respondem e reagem às ações do participante. Por exemplo, se o usuário move o ponto de observação em direção à porta, esta pode parecer abrir-se, permitindo ao participante passar por ela. A navegação em ambientes virtuais é controlada pelo posicionamento do observador no mundo virtual, o chamado ponto de observação (*viewpoint*). A navegação é, provavelmente, a forma mais simples de interação encontrada em muitas aplicações de RV. Virtualmente, toda técnica de navegação pode ser deduzida a partir de um único modelo, que assume uma câmera montada em um personagem virtual que, às vezes, é referenciado como “*Flying Carpet model*”. Algumas das técnicas de navegação mais usuais são:

· *Point-and-fly*: o usuário move o personagem virtual apontando em uma determinada direção com os dispositivos de navegação (por exemplo, uma luva), e faz certo gesto ou aperta determinado botão. Se a luva estiver sendo usada, a velocidade de movimentação pode ser controlada. Se o rastreador de cabeça estiver ativo, o mesmo controlará a câmera virtual. Essa técnica é uma das mais usadas e sugere um modo mais sofisticado: o usuário aponta para um objeto desejado e o sistema computa o desvio que posicionará o usuário em frente ao objeto; aqui também a velocidade pode ser controlada. Algumas vezes, é desejável restringir o personagem a certa altura, por exemplo, ao nível dos olhos, e o usuário pode então se mover ao redor da cena, nessa altura fixa;

· *Eyeball-in-hand*: esse paradigma é implementado pela realimentação do sistema de rastreamento (por exemplo, a posição de um sensor eletromagnético), diretamente para o ponto e a direção de observação, enquanto o ponto de observação permanece fixo. Essa técnica é muito apropriada para a análise de um único objeto a partir de diferentes pontos de observação, por exemplo, no projeto de interiores. Em resumo, todas as ações são carregadas/atualizadas a partir do ponto de observação do usuário (Turunem, 2002).

· *Scene-in-hand*: este paradigma é oposto ao anterior (Turunem, 2002). A técnica mapeia os movimentos dos dispositivos de entrada 3D dentro de um mundo virtual, mantendo o ponto de observação do usuário e movendo o mundo em volta. Um mecanismo de “ação das mãos” (*clutch*) (pegar, soltar, etc.) é, normalmente, incluído para ampliar o alcance dos movimentos (Hand, 1997). Algumas vezes é necessário controlar o ponto de observação sem o uso das mãos. Nesse caso, o reconhecimento de voz pode ser empregado para mover o personagem virtual, proferindo comandos simples como: à esquerda, pare, etc.

Para aumentar a flexibilidade é altamente desejável que diferentes modos de navegação sejam mapeados para diferentes configurações de dispositivos de entrada, já que certas combinações

de modos de navegação e configurações de dispositivos de entrada tendem a ser usadas com mais frequência do que outras. Existem muitos parâmetros que afetam a representação do usuário e a navegação, como velocidade de navegação, tamanho da mão, escala dos movimentos da cabeça e separação dos olhos.

4.2 Ambientes virtuais

Ambientes virtuais são cenários reproduzidos em Realidade Virtual onde, através de um personagem virtual, também chamado de avatar, é possível deslocar-se, interagir com objetos e elementos, e interagir com outros avatares. No ambiente virtual que é executada a simulação da realidade, são também nos ambientes virtuais que são construídos os cenários representativos.

Uma descrição simples dos procedimentos executados pelo sistema de simulação de um ambiente virtual é a seguinte:

- O software carrega na memória do computador modelos tridimensionais de cenários, objetos e avatares, e as posições, orientações e proporções destes dentro de um espaço tridimensional virtual, criando na memória do computador um “mundo virtual”;
- O software exibe o ambiente virtual em uma tela de visualização, geralmente uma tela de grandes dimensões ou óculos com pequenas telas de exibição no lugar de lentes, criando uma “porta” ou “janela” para que o usuário possa visualizar o ambiente virtual e se conscientizar

das mudanças provocadas por sua interação, geralmente utilizando para a visualização a perspectiva em primeira pessoa em relação ao avatar;

- O software, por vezes em conjunto com um dispositivo homem-máquina especial, como luvas de realidade virtual, permite que o jogador possa navegar neste ambiente virtual e interagir com objetos presentes nesse novo mundo, tudo isso através do controle dos movimentos e ações do avatar dentro do ambiente virtual;
- O software controla as ações dos objetos presentes no mundo virtual que não são controlados pelo jogador,
- O software simula para os objetos e o avatar algumas leis da física, como colisão entre sólidos e gravidade.

4.3 Dispositivos de Entrada

O participante da experiência de RV pode “entrar” no mundo virtual por intermédio dos dispositivos de saída de dados. Os dispositivos de entrada, por outro lado, permitem a movimentação do usuário e sua interação com o mundo virtual. Sem um dispositivo de entrada de dados adequado o usuário participa da experiência de RV de forma passiva.

Pimentel (1995), divide os dispositivos de entrada em duas categorias: dispositivos de interação e dispositivos de trajetória. Os dispositivos de interação permitem ao usuário a movimentação e manipulação de objetos no mundo virtual. Os dispositivos de trajetória, por

sua vez, monitoram partes do corpo do usuário, detectando seus movimentos e criando a sensação de presença no mundo virtual.

Existem diferentes dispositivos de interação com diferentes finalidades: é importante escolher o mais adequado para a aplicação de RV em questão. Essa escolha deve considerar a finalidade do sistema e também o software utilizado, pois a eficiência do sistema vai depender da sua capacidade de aproveitar as características do dispositivo.

Muitos dispositivos de interação estão disponíveis atualmente, variando desde luvas de dados até os chamados sensores biológicos.

A luva de dados ("*datagloves*") permite ao sistema de RV reconhecer os movimentos da mão do usuário que veste a luva (Sturman e Zeltzer, 1994). Para determinar os movimentos dos dedos são utilizados, na maioria dos projetos, sensores mecânicos ou de fibra ótica. O esquema básico desse tipo de luva é apresentado na Figura 12. Na figura 13 temos uma imagem de luva de dados e seus periféricos.

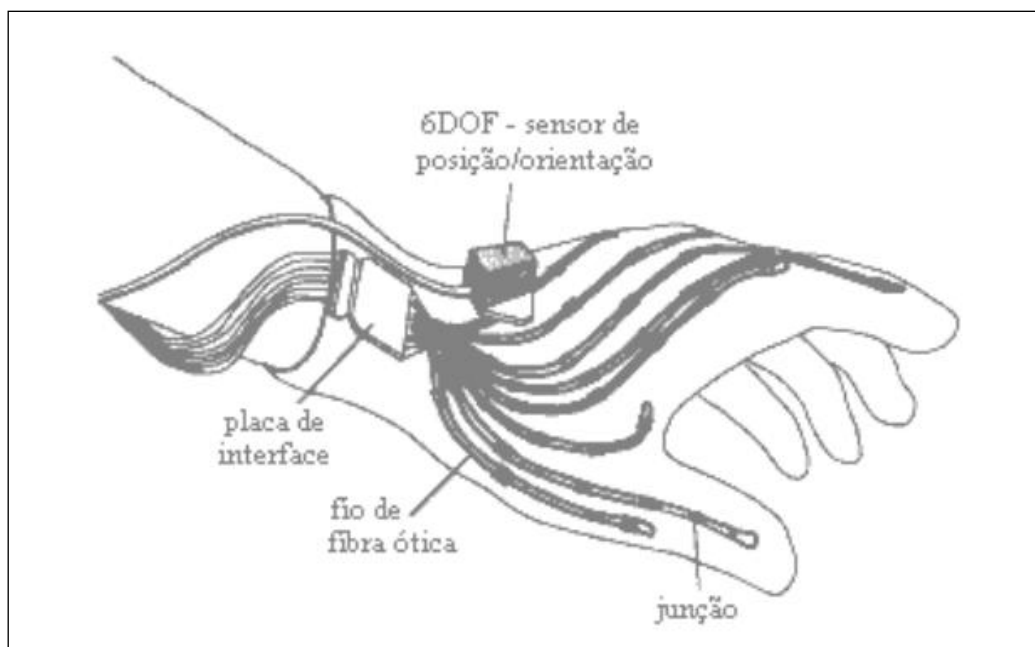


Figura 12 - Esquema de uma luva de dados baseada em fibra ótica



Figura 13 - Dispositivo completo uma luva de dados baseada em fibra ótica

Hoje em dia com o surgimento de novos dispositivos, principalmente impulsionados pela indústria de jogos, o conceito em interação tem mudado. Um dos principais dispositivos utilizados no momento é um leitor chamado Kinects, figura 14, este foi originalmente desenvolvido para a utilização junto ao console Xbox, todavia já ganhou o mercado dos computadores e da pesquisa em realidade virtual. Este novo leitor funciona basicamente com a interpretação via softwares da captura e processamento de imagens de câmeras e sensor infravermelho.



Figura 14 - Hardware kinect desenvolvido para o console Xbox.

4.4 Dispositivos de Saída

A maioria das aplicações de RV é baseada no isolamento dos sentidos. O hardware de RV estimula principalmente a visão e a audição, e o sentido do tato está começando a ser explorado. Os dispositivos visuais e a qualidade de imagem gerada influenciam fortemente a percepção do nível de imersão de um sistema de RV. Alguns autores chegam a dividir ou classificar as pesquisas sobre RV de acordo com os dispositivos de visualização empregados (Cruz-Neira, 1992). Os sistemas de RV podem ser monoscópicos ou estereoscópicos: no primeiro caso, uma única imagem é “renderizada” e exibida para os dois olhos; no segundo cada olho observa uma imagem ligeiramente diferente, cada qual “renderizada” separadamente (Pimentel, 1995). Um fator importante no resultado visual é o número de quadros por segundo que podem ser exibidos, ou seja, a velocidade da simulação. Filmes

projetados para o cinema apresentam aproximadamente 24 quadros por segundo, enquanto que os projetados para TV apresentam aproximadamente 30 quadros por segundo (Foley, 1990). Em RV, buscam-se entre 15 e 22 quadros por segundo (Jacobson, 1994).

Um hardware muito utilizado é o HMD ou chamado também de vídeo-capacete (Head-Mounted Display, HMD) é um dos dispositivos de interface para RV mais populares, por tratar-se do dispositivo de saída de dados que mais isola o usuário do mundo real. Ele é constituído basicamente de duas minúsculas telas de TV e um conjunto de lentes especiais. As lentes ajudam a focalizar imagens que estão a alguns milímetros dos olhos do usuário, ajudando também a ampliar o campo de visão do vídeo. O vídeo-capacete funciona também como um dispositivo de entrada de dados, porque em alguns casos contém sensores de rastreamento que medem a posição e orientação da cabeça, transmitindo esses dados para o computador. Consequentemente, o computador gera uma sequência de imagens por quadro correspondente às ações e perspectivas do usuário (Gradeski, 1994; Delaney, 1996). O mais atual (abril de 2015) e de melhor qualidade é o oculus rift dk2, figura 15, este capacete proporciona uma imersão de alta qualidade e acompanha câmera para interpretação do movimento da cabeça (head tracking). Este capacete é a segunda versão de desenvolvimento da mesma empresa, esta versão possui integração inclusive com o sistema no qual o ambiente virtual desta tese foi desenvolvido.



Figura 15 - Oculus rift DK2, um tipo de HMD mais atual.

Com a pressão, de entusiastas por games, por hardwares mais acessíveis, a sociedade tem conhecido uma nova possibilidade de visualização estéreo de baixo custos, os chamados *CardBoarders*. Estes são sistemas de visualização dotados de lentes e uma casca protetora para adaptação ao Smartphone. Algumas soluções são menos custosas como o da empresa google, como mostra figura 16, e outros um pouco mais elaborados, visto na figura 17, como o Beenoculus. Este segundo oferece excelente qualidade e custa aproximadamente R\$ 125,00 (maio de 2015) . Estes dispositivos utilizam os sensores do celular para navegação pelo ambiente virtual. Por exemplo, para movimentar a visão dentro do ambiente os celulares utilizam o giroscópio, de forma que quando o celular está dentro do cardboard a cabeça movimentará a visão sobre o ambiente (headtracking).

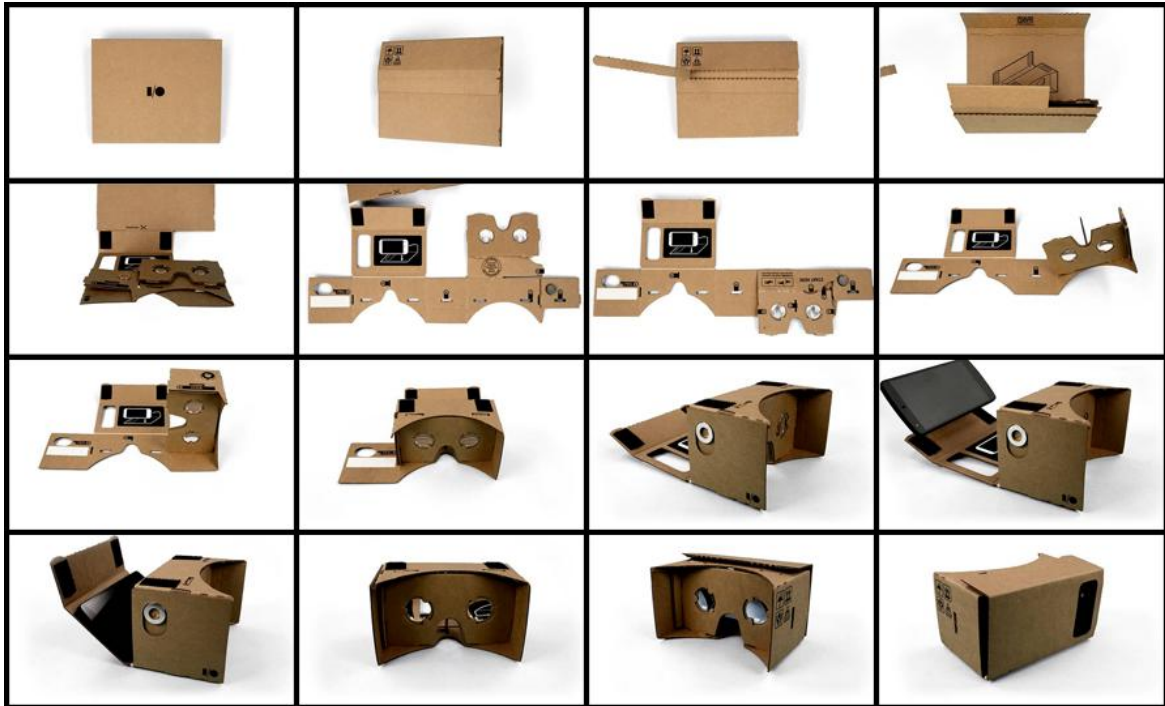


Figura 16 - CardBoard da Google.



Figura 17 - HMD da empresa Beenoculus

Nos sistemas de RV baseados em monitores ou sistemas de projeção o usuário precisa estar constantemente olhando para o monitor ou tela, e utilizar algum dispositivo de entrada para controlar sua movimentação pelo mundo virtual. Isso não significa, entretanto, que as imagens não possam ser vistas em estéreo. Uma técnica básica utiliza óculos obturadores para filtrar as duplas de imagens geradas pelo computador como o óculos da nvidia mostrado na figura 18. Ou seja, o computador ou televisor exibe alternadamente as imagens direita e esquerda sincronizadas com óculos que bloqueiam cada um dos olhos, permitindo que o usuário visualize uma imagem que “sai” da tela estas imagens também chamadas 3D. Sistemas de televisores atuais possuem o sincronizador integrado bastando, assim, o uso de óculos ativos. Ainda existem sistemas passivos mais simples e de pior qualidade que funcionam por filtros polarizados (estes são os largamente usados, alguns exemplos são os televisores residenciais e cinemas 3D).



Figura 18 - Exemplo de óculos ativo que pode ser sincronizado com TV ou computador para visualização em estéreo.

Os dispositivos tanto de entrada quanto de saída são inúmeros, todavia todos eles têm o mesmo objetivo, proporcionar mais sensibilização ao usuário. Esta sensibilização que é a principal justificativa para a utilização de sistemas de realidade virtual.

4.5 A ferramenta de modelagem SketchUp

Google SketchUp é uma ferramenta para criação de modelos em 3D. Foi desenvolvida pela At Least Software, uma empresa americana, localizada em Boulder, no Colorado a qual foi adquirida pela Google como foi anunciado em 14 de Março de 2006, mais tarde a ferramenta foi vendida para então proprietária Trimble. O SketchUp pode ser baixado gratuitamente, Pode ser usado por qualquer atividade profissional que precise desenvolver rascunhos de produtos em 3 dimensões. Esse software é muito utilizado por arquitetos, designer de móveis, desenhistas técnicos, game designers e várias outras profissões relacionadas aos trabalhos que necessitem de visualizações em 3D. O nome surgiu pela fácil criação de esboços de modelos ou maquetes em 3D, por isso ser chamado de Sketch que significa "esboço" em inglês. O modelo gerado por essa ferramenta pode ser importado em outras ferramentas as extensões mais comuns são as .fbx e .dae, estas extensões permitem a importação destes modelos em outros aplicativos como o Unity. A ferramenta também possui uma página na web que é a 3D Warehouse, onde vários usuários de todo o mundo publicam suas criações tornando-as acessíveis gratuitamente a qualquer pessoa. Ela funciona como uma espécie de depósito de modelos em 3D, com uma interface muito simples e intuitiva facilita o rápido esboço de projetos. O programa também apresenta uma variedade de opções de renderização, incluindo texturas de bitmap, sombreamento, e o modo de raio-X, bem como as tradicionais modos de

renderização, como a linha em preto-e-branco desenhos, ou um estilo "esboçado" áspera que imita um desenhado a mão do projeto arquitetônico. Na figura 19 pode-se ver a interface do aplicativo.

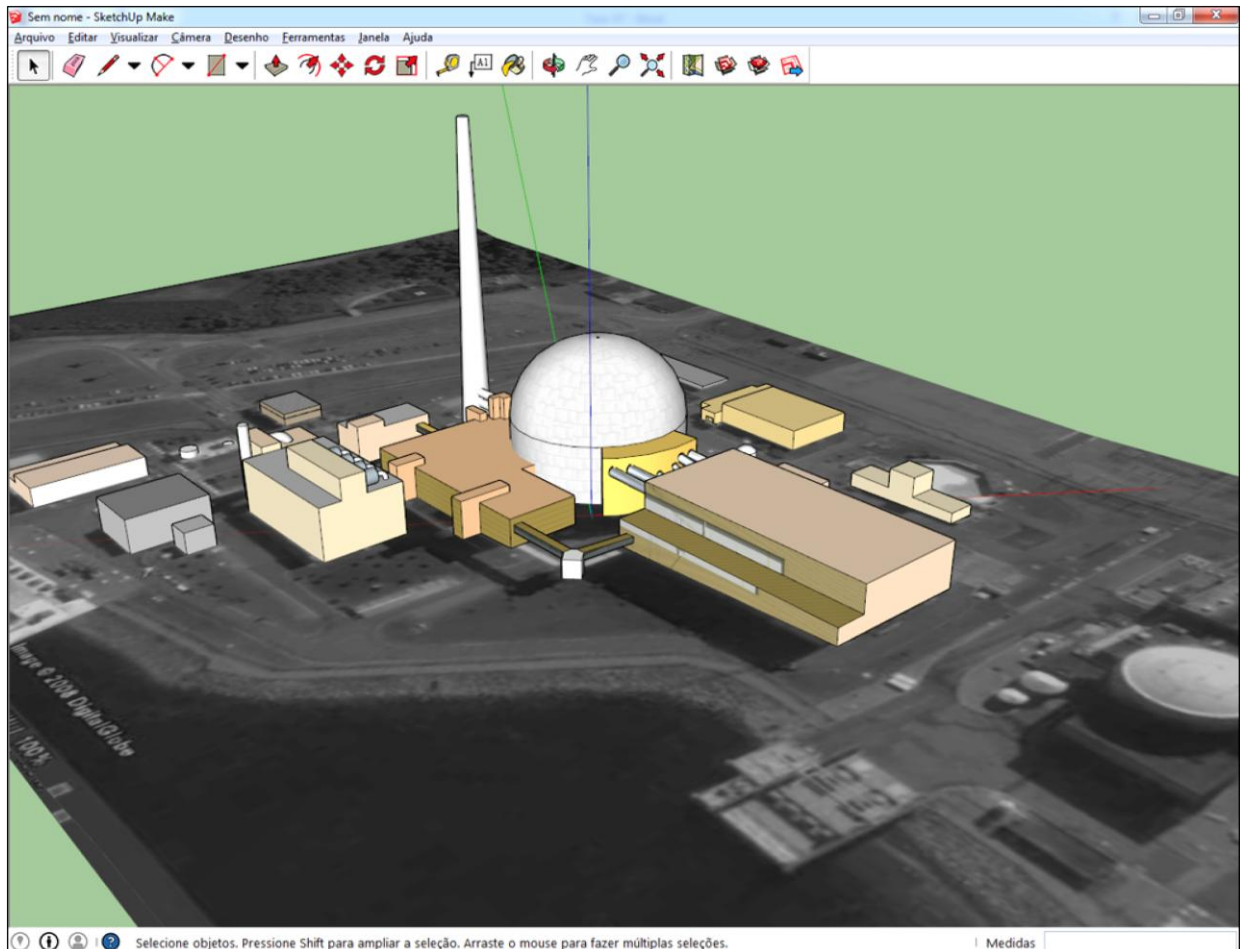


Figura 19 - Imagem da interface do SketchUp

4.6 Núcleo de jogos

Núcleo de jogo ou game engine é o componente central do software que compõe jogos eletrônicos, podendo também ser adaptado e utilizado, caso o núcleo seja sofisticado o

bastante, para outras aplicações que necessitem de gráficos gerados em tempo real. Ele tipicamente fornece os recursos mais necessários para a criação de um jogo, principalmente um núcleo de renderização de gráficos em tempo real, acompanhado de funções de detecção de colisão e/ou um núcleo de física, podendo também fornecer diversos recursos adicionais. Para auxiliar o desenvolvimento, os núcleos modernos são acompanhados de ferramentas integradas de criação e edição de conteúdo, como editores de cenários e interpretadores de scripts para a programação de funções para novos jogos e aplicações. A Figura 20 mostra a estrutura global de uma game engine.

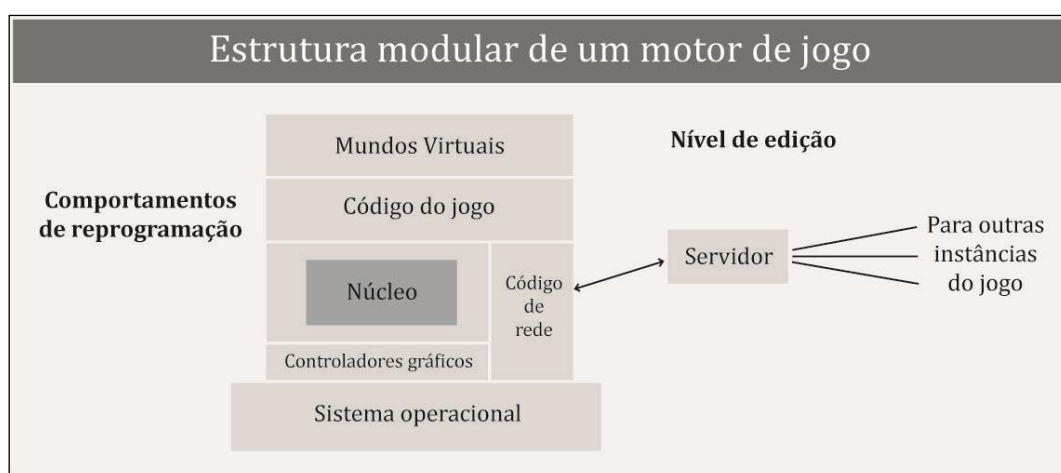


Figura 20 - Estrutura de um motor de jogo

4.7 Avatares

Avatar é a entidade dentro do ambiente virtual que interage diretamente com o ambiente e representa a pessoa que o controla no mundo real, avatar é a representação gráfica de um utilizador em realidade virtual (Figura 21).



Figura 21 - Exemplo de avatar (personagem virtual) utilizado no núcleo Unreal

De acordo com a tecnologia, pode variar desde um sofisticado modelo 3D até uma simples imagem. São normalmente pequenos, aproximadamente 100 px de altura por 100 px de largura, para que não ocupem demasiado espaço na interface, deixando espaço livre para a função principal da simulação, programa ou jogo que se está a usar. Um avatar pode possuir qualquer forma. Porém, por questão de bom senso, geralmente possui a forma de um ser humano com aparência relacionada ao cenário onde ele está presente. Para exemplificar, um ambiente virtual que reproduz uma instalação industrial geralmente possui um avatar com a aparência de um homem ou mulher adultos com traje típico da pessoa daquela instalação. Na figura 22 podemos ver a diferença de três personagens virtuais das diferentes versões do núcleo de jogo Unreal. Estes personagens foram usados para o desenvolvimento do jogo,

através das imagens é possível perceber o aumento de curvas e com isso o aumento do número de nós entre as malhas.



Figura 22 - Ilustra a diferença de malhas em 3 versões do Unreal

Em softwares de realidade virtual, para tornar mais simples a detecção de colisão entre o avatar e outros objetos no cenário, o avatar é sobreposto por um paralelepípedo ou cilindro invisível, que envolve totalmente o modelo 3D do avatar, e que se desloca juntamente com ele. A detecção de colisão entre o avatar e o cenário e seus objetos é realizada com este paralelepípedo ou cilindro, um objeto muito mais simples geometricamente que o modelo 3D do avatar. Em jogos, ambientes virtuais e avatares geralmente reproduzem cenários e personagens típicos de obras de ficção e fantasia, pois são voltados para o entretenimento. Em sistemas de realidade virtual orientado para aplicações científicas e industriais, geralmente

reproduzem cenários e personagens baseados no mundo real, como uma instalação industrial e trabalhadores típicos de tal instalação.

4.8 O núcleo de jogo Unreal Engine

Em primeiro momento o núcleo de jogo Unreal Engine foi escolhido para o desenvolvimento deste projeto, a escolha deste núcleo de jogo deve-se a diversos fatores:

- É gratuito, no caso da versão utilizada nesta tese, devendo-se apenas obedecer às condições descritas na licença, como não utilizá-lo para criar jogos.
- Possui um núcleo 3D de boa qualidade e desempenho, produzindo ambientes virtuais com qualidade visual e realismo o suficiente, as grandezas físicas são representadas com boa aproximação, por exemplo, gravidade.
- Vem acompanhado do UnrealEd (figura 23), o programa de modelagem de cenários para o núcleo. O UnrealEd, aplicativo responsável pelo desenvolvimento dos ambientes do Unreal, possui algumas características positivas, como uma interface intuitiva, um aprendizado rápido, e a pré-visualização de cenários durante a etapa de modelagem. O UnrealEd permite, através de primitivas geométricas como cubos, cilindros e esferas, a criação tanto de cenários (como o interior de uma sala de estar) como de objetos que povoam estes cenários (como mesas e sofás presentes em uma sala de estar). O UnrealEd também permite a utilização de modelos gerados em outras ferramentas de modelagem 3D.

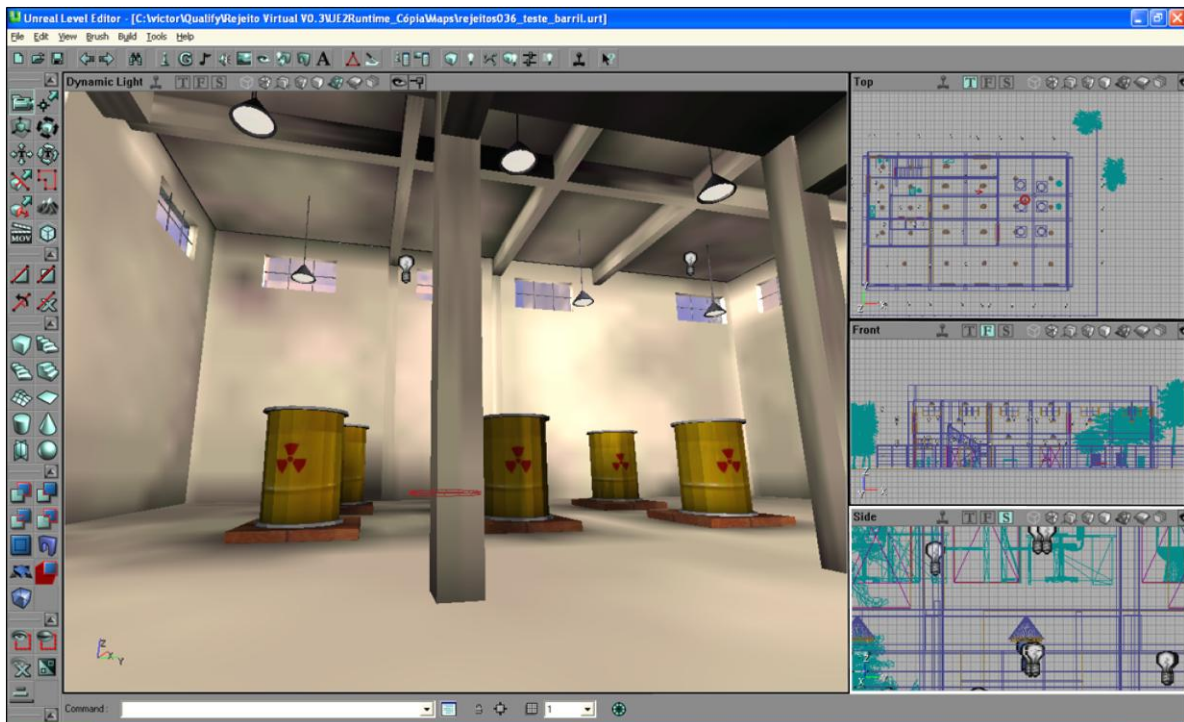


Figura 23 - Interface da ferramenta de edição de cenários do unreal, o UnrealEd

- Utiliza avatares para representar os usuários no ambiente virtual, e permite a utilização de avatares criados pelos usuários, embora a criação de avatares dependa de outros softwares além do Unreal e do UnrealEd.
- Possui um interpretador de uma linguagem de script própria chamada UnrealScript, que é orientada a objeto e similar a Java. Códigos escritos em UnrealScript compõe grande parte do núcleo e são acessíveis ao usuário. Graças a isto, o núcleo possui um alto nível de customização, sendo possível modificar funções, ajustar propriedades, e até mesmo acrescentar novas funções. Pode-se adicionar novos scripts ao núcleo para complementar a simulação, ajustar características da simulação do avatar, alterar a interface gráfica do Unreal, entre outras possibilidades.
- É popular, o que torna mais fácil a obtenção do esclarecimento de dúvidas sobre o software através da internet e de outras fontes de informação.

Outro fator decisivo foi a relação custo/benefício. O Unreal Engine é um núcleo de jogo bem completo, possuindo muitas das características dos sistemas de realidade virtual profissionais, cujas licenças possuem valores elevadíssimos, porém pode ser usado livre de custos em aplicações sem fins comerciais. Por este e outros motivos citados anteriormente, o Unreal Engine é uma opção interessante para o treinamento, o desenvolvimento simuladores acadêmicos e/ou sem fins lucrativos. Um dos recursos mais importantes do Unreal Engine é o UnrealScript, uma linguagem de scripts similar a Java que segue o padrão de orientação a objeto, utilizando classes, objetos, atributos, métodos, herança, etc.

O Unreal Engine, a nível de software que compõe o núcleo, pode ser dividido em duas partes:

- O código programado em C++, adaptado e compilado para uma plataforma e sistema operacional específico. Realiza as tarefas de baixo nível, como renderizar os gráficos, alocar memória e acessar arquivos, e interpretar e executar os scripts escritos em UnrealScript, podendo neste aspecto ser comparado a uma máquina virtual. Esta parte programada em C++ não é modificável em nível de código pelo usuário, podendo ser apenas configurada através de seus arquivos de configuração, o que permite a flexibilidade de determinados aspectos do núcleo.
- Os scripts programados em UnrealScript, uma linguagem exclusiva do núcleo, de alto nível, orientada a objeto e semelhante a Java. Compõe grande parte do código necessário para a criação dos jogos neste núcleo. Nesta linguagem são programadas as regras, os eventos, todo o funcionamento do jogo. Utilizando o compilador UCC, que também acompanha o núcleo, o usuário pode compilar os scripts em UnrealScript na forma de *bytecode*, para serem interpretados e executados pelo núcleo. Mesmo na forma de *bytecode*, os scripts em UnrealScript podem ser revertidos para sua forma anterior, para que o usuário possa estudá-

los. Graças a isto, o usuário pode programar novos scripts e modificar e excluir scripts já existentes, modificando e adaptando o funcionamento do núcleo para novos fins. Esta possibilidade é até mesmo encorajada pela Epic Games, à desenvolvedora do Unreal Engine, pois permite que entusiastas aprendam como funcionam diversas características do jogo e possam modificá-lo, ou criar novo conteúdo para uso com o núcleo, o que preserva o interesse do usuário em utilizar o software. Um importante ponto de venda para softwares, especialmente jogos, é estes manterem em seus usuários interesse em utilizá-los pelo maior tempo possível. O núcleo já vem acompanhado por uma série de classes necessárias para a construção de jogos, sendo que o Unreal Engine 2 Runtime vem acompanhado de um conjunto mais básico, enquanto que jogos comerciais vêm acompanhados de diversas classes a mais, necessárias pelos jogos. Graças à divisão entre código nativo de plataforma e UnrealScript, o Unreal Engine está disponível em várias plataformas: Windows, Mac OS X, Linux e consoles de videogame. Todavia com o passar do tempo novos núcleos de jogos foram surgindo, estes novos se mostraram melhores e continham maior documentação.

4.9 O Núcleo de Jogos Unity 3D

Ao longo da pesquisa um novo núcleo de jogo começou a ganhar mais notoriedade na área, este novo núcleo começou a oferecer maior documentação e novas implementações, por estes e outros aspectos todo o projeto começou a migrar e ser desenvolvido no Unity 3D.

O Unity 3D consiste em um robusto núcleo de jogo tridimensional, complementado por diversas funções necessárias ao desenvolvimento de jogos, como bibliotecas destinadas a inserção de física aos ambientes, iluminação e áudio interativo. Devido à alta qualidade da sua

interface e documentação, aliado a uma rápida curva de aprendizagem, esta ferramenta foi escolhida para ser testada no desenvolvimento do rejeito virtual. Algumas de suas principais características são:

- O núcleo de jogo Unity 3D possui uma interface simples e intuitiva, figura 24, objetivando facilitar o desenvolvimento de jogos e simulações. Sua área de trabalho engloba janelas, onde cada uma possui uma função específica.

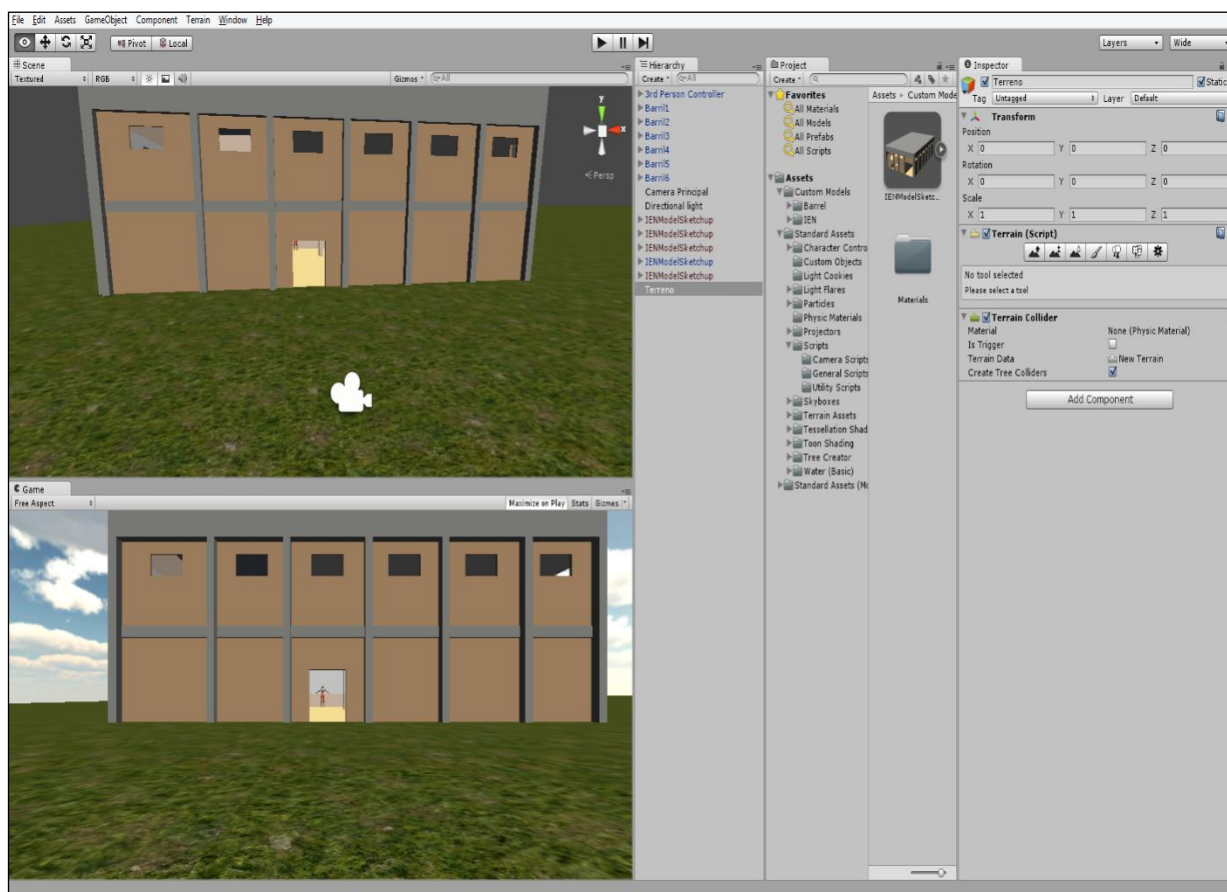


Figura 24 - Interface do Unity 3D

- A programação é uma ferramenta importantes em todos os projetos desenvolvidos com a Unity. Mesmo os mais simples utilizam scripts para responder a entrada do usuário e reproduzir eventos durante sua execução. Além disso, os scripts podem ser usados para controlar o comportamento físico dos objetos e ambiente como um todo. No Unity, os scripts podem ser implementados em qualquer uma de três linguagens *JavaScript*, *C#* ou *Boo*, sendo possível usar mais de uma delas em um mesmo projeto. Esses scripts são acoplados como componentes de objetos, ganhando assim flexibilidade na sua reutilização.
- A *Asset Store*, também conhecida como Loja de Recursos, é uma biblioteca crescente de *assets* gratuitos e comerciais, criados tanto pela equipe do Unity quanto por membros da comunidade (GASPAR,, 2010). Uma ampla variedade de *assets* são disponibilizados, contendo desde texturas, modelos e animações até exemplos de projetos completos e tutoriais. Esses recursos são acessados de uma interface simples presente no editor e são baixados e importados diretamente para seu projeto.
- Os desenvolvedores podem utilizar o Unity 3D sob duas formas de licenciamento, na versão gratuita, utilizada neste projeto, denominada apenas como Unity, e na versão proprietária, conhecida como Unity Pro, com um custo aproximado de \$ 1.500,00 (mil e quinhentos dólares - abril de 2015). A versão proprietária tem como diferencial a disponibilização de recursos e funcionalidades adicionais, destinadas principalmente ao desenvolvimento de jogos profissionais, como filtros de áudio, streaming de vídeos, recursos adicionais de animação, suporte a textura 3D, etc.

5 Metodologia

Para desenvolvimento deste projeto foram testadas duas plataformas, o unreal engine 2 e a Unity 3D, as duas ferramentas são gratuitas para fins não-comercial, estas foram comparadas em questões quanto ao realismo e possibilidades de implementação das funcionalidades propostas, o Unity 3D superou em muito a ferramenta Unreal Engine 2, todavia a dissertação a cerca dos procedimentos de desenvolvimento e métodos em unreal engine serão preservadas neste texto a título de comparação.

O projeto de desenvolvimento do rejeito virtual pode ser separado em três grandes etapas:

- A modelagem da estrutura física do rejeito, nesta etapa conceitos como iluminação e texturização foram fundamentais para um maior realismo e imersão do usuário, esta etapa, normalmente, requer ferramentas mais específicas de modelagem, entre elas podem-se destacar o Studio Max, Maya, SketchUp, SolidWorks;
- A implementação das funcionalidades propostas, entre elas estão os valores de radiação, efeitos de blindagem e movimentação dos barris do depósito de rejeitos, estas funcionalidades se dão a nível de programação, nas duas ferramentas estas requerem uma validação dos modelos utilizados no ambiente virtual, de forma que este represente bem o ambiente real, e, por fim;
- A apresentação, em tempo real, dos valores de taxa de dose gama calculados de forma dinâmica, assim como o recebimento pelo avatar destes mesmos valores.

Para a validação dos modelos este trabalho comparou os valores encontrados no ambiente real em relação aos calculados no ambiente virtual. Os valores de radiação programados no ambiente virtual seguiram o modelo de fontes pontuais e para efeitos de blindagem foi usado o modelo de absorção da radiação ajustado com constantes medidas no ambiente virtual.

5.1 A modelagem da estrutura virtual do depósito e suas funcionalidades

5.1.1 A modelagem da estrutura do depósito

A modelagem do ambiente virtual deve seguir a estrutura real encontrada em planta baixa do projeto de engenharia/arquitetura construído. A escala é um importante fator, pois é o que trará um maior realismo ao ambiente. A escala do ambiente virtual é construída a partir do tamanho do personagem virtual. Por exemplo, no Unreal o avatar possui 39 u.u (unidades de Unreal) o que deve representar uma pessoa com cerca de 1,70 metros, logo a partir desta representação qualquer dimensão virtual pode ser calculada. O mesmo princípio foi utilizado no Unity. Utilizando a proporção mencionada tem-se que um metro consiste de aproximadamente 23 unidades no unreal (u.u.). Um importante conceito a ser trabalhado é a noção de grandezas métricas, visto que um ambiente virtual é um mundo modelado com escalas próprias. Desta forma não existe um valor absoluto e sim relações com o mundo real. Outras funcionalidades são de grande importância para a imersão do usuário, o som dá maior sensação de imersão, desta forma foi implementado em Unity o som da empilhadeira quando o avatar começa a simulação com esta máquina. As grandezas físicas são representadas com boa proximidade pelos núcleos de jogos, todavia especificações como taxas de radiação e coeficientes de atenuação dos objetos não se encontravam modeladas em nenhum dos núcleos trabalhados. No unreal foram estendidas classes de objetos para que isso fosse possível. A

maior diferença entre as ferramentas é a possibilidade de se importar malhas prontas de outras ferramentas, como AutoCAD, Studio Max, etc. No Unity esta possibilidade foi essencial para que se tivesse um ambiente mais próximo do real. Um fator relevante na inserção destas malhas é o custo computacional, visto que todos os cálculos físicos são feitos pra cada nó da malha. Em malhas mais simples o sistema virtual fica mais leve, com diversas malhas mais complexas o custo computacional aumenta significativamente. Grandezas como iluminação e textura estão relacionadas diretamente com as superfícies descritas pela malha, quanto maior o número de micro superfícies mais cálculos em relação as estas grandezas terão que ser feitos. Economizar computação em pontos não importantes ao sistema permite que esse custo possa ser aumentado em recursos considerados mais importantes, como no caso deste trabalho, o aumento da malha virtual que apresenta, de forma dinâmica, os resultados da radiação que o avatar receberá em cada ponto do ambiente virtual.

Para o desenvolvimento da aplicação buscou-se um avatar diferente dos utilizados em jogos e que não fosse tão pesado, visto que a qualidade da malha do próprio personagem influencia no sistema. Nas figuras 25 observam-se as malhas usadas em unreal e unity.



Figura 25 - O avatar (personagem virtual) utilizado no sistema em Unreal



Figura 26 - O avatar (personagem virtual) do sistema em Unity

Para a modelagem do depósito virtual em unity, figura 27, foi possível a utilização da versão gratuita do software SketchUp, diferentemente da Unreal. O SketchUp é uma ferramenta de modelagem 3D criada pela At Least Software e atualmente comprada pela Trimble Navigation (GASPAR, 2010). Foi utilizada como base, para a modelagem virtual, a planta baixa do depósito do IEN. Após a modelagem completa da estrutura o rejeito virtual foi importado em um terreno vazio na unity. Na ferramenta unity que são inseridos efeitos de iluminação e objetos adicionais, como exemplo, mesas, barris, veículos, etc. Estes objetos podem ser tirados de um depósito de modelos tridimensionais encontrado no SketchUp.



Figura 27 - Modelagem básica feita na ferramenta SketchUp.

Diversos outros objetos foram possíveis de serem inseridos através da ferramenta de importação do unity, na figuras 28, 29, 30 pode-se ver alguns desses modelos. Os modelos

foram importados do depósito de modelos 3D do sketchup, através deste processo foi possível dar mais realismo ao sistema.

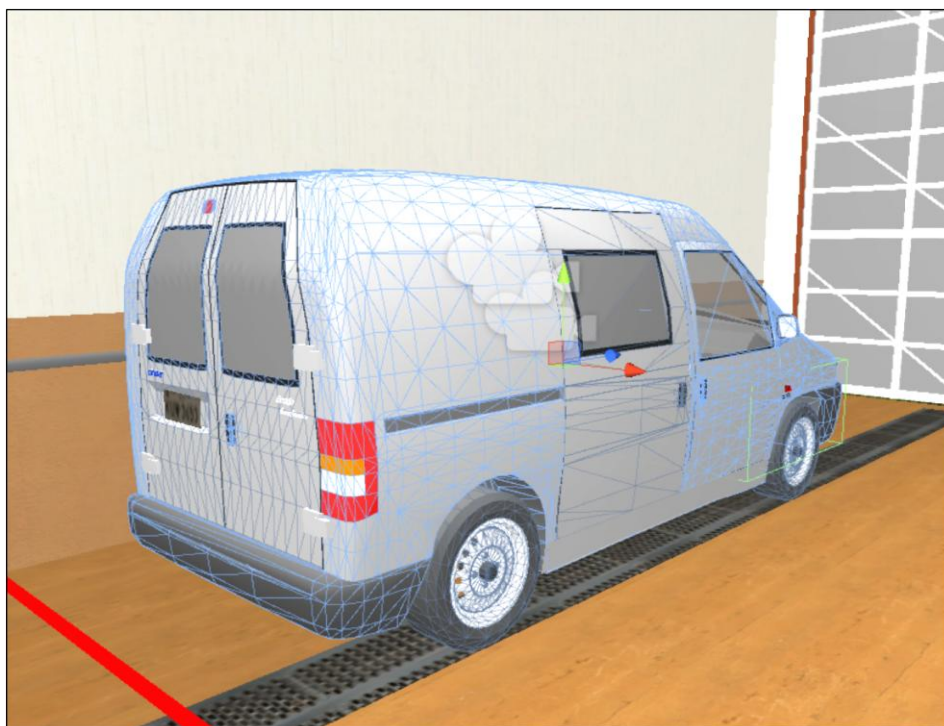


Figura 28 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity

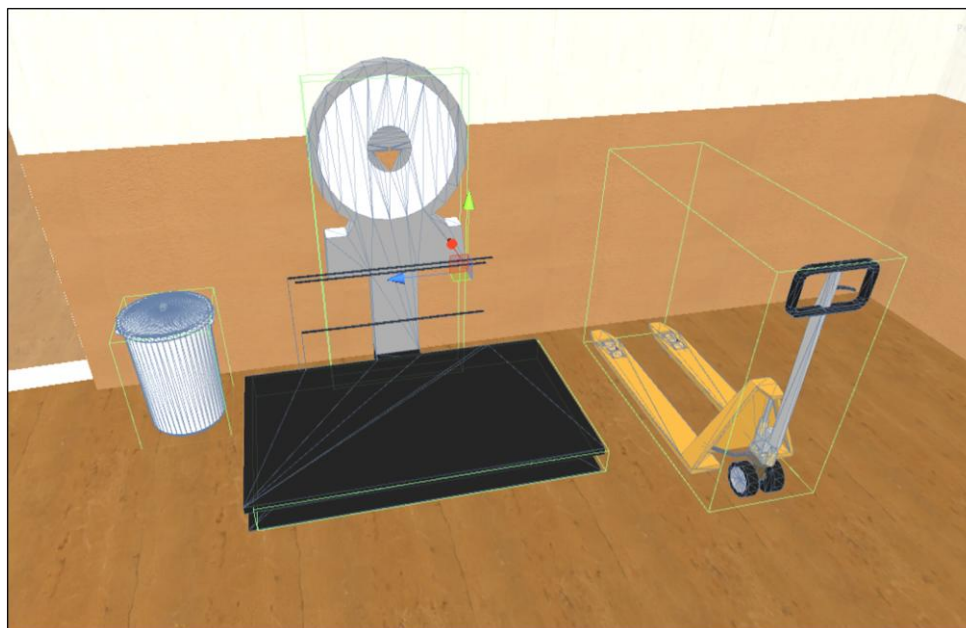


Figura 29 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity



Figura 30 - Modelo inserido no simulador desenvolvido em unity

Na ferramenta unreal a importação é bem complexa o que dificulta o processo de modelagem poucos objetos foram inseridos deixando o ambiente menos realístico como mostra a figura 31.



Figura 31 - Poucos objetos inseridos na ferramenta unreal

Um outro fator importante é a iluminação, através dela que é possível dar mais realismo ao ambiente, o unity permite trabalhar com uma grande massa de luz externa, este segue um caminho como o sol de forma que estas luzes permeiem as janelas do depósito de rejeito gerando sobras dinâmicas muito próximas ao real. Modelar uma iluminação próxima a que existe no ambiente real também interfere no processo de simulação, pois a visualização dos objetos pode ser interferida pela falta de luz por exemplo, na figura 32 pode-se ver em detalhe as malhas e os pontos de luz inseridos exatamente onde existem luminárias no ambiente real.



Figura 32 - Detalhes dos pontos de luz do simulador desenvolvido em unity

5.1.2 A realocação de objetos no ambiente virtual

Uma das mais importantes operações em depósitos de rejeitos radioativos de médio e baixos níveis de emissão de radiação é a realocação destes objetos no ambiente. A operação consiste em realocar um conjunto de 4 barris com materiais contaminados nas diversas aplicações em energia nuclear. Estes barris são postos sobre um *pallet* de madeira e com uma empilhadeira esses barris são transferidos de local periodicamente. O objetivo principal desta operação é

encontrar e construir uma distribuição de tal forma que os próprios barris blindem a radiação proveniente de outros barris, assim como, o de manter os barris que serão mais frequentemente manuseados na frente de dos que serão manuseados com menos frequência. Na figura 33 podemos ver o *pallet* e uma distribuição padrão.



Figura 33 - Distribuição de barris dentro de um depósito de rejeitos

Para que fosse possível simular a realocação desses rejeitos no ambiente virtual foi necessário desenvolver duas metodologias diferentes, primeiramente no caso da ferramenta Unreal e no segundo momento um novo método em Unity. No Unreal foi feita uma programação de forma que, quando o avatar estivesse em um cilindro invisível criado em torno do barril, fosse possível utilizar uma tecla do teclado para que se destruísse este objeto e se criasse um avatar carregando o barril, desta forma seria possível que o avatar deixasse o barril em qualquer local do espaço virtual pelo procedimento inverso. Este método apesar de funcionar bem teria um problema, pois existe um certo tempo que o operador necessita para acoplar o *pallet* na

empilhadeira no ambiente real, desta forma a simulação virtual seria bem mais rápida que a real, com isso o tempo de imersão dentro de nível de radiação seria diferente da real. Com o uso da nova ferramenta Unity foi possível simular o trabalho de empilhadeiras e os procedimentos de locomoção do garfo separados da máquina, como mostra a figura 34a, 34b, 34c e 34d, diferentes malhas para o garfo e para o elevador. Esta realocação utiliza conceito de colisões de forma que com o encaixe preciso será possível o suporte do barril por parte dos garfos da empilhadeira. Com as partes da empilhadeira separadas foi possível adicionar uma locomoção para cada parte ao acionar uma tecla no teclado do computador, desta forma a empilhadeira move cada objeto de acordo com a operação do usuário do sistema virtual e força o encaixe preciso nos *pallets*, que sustentam os barris, para que a realocação seja possível.

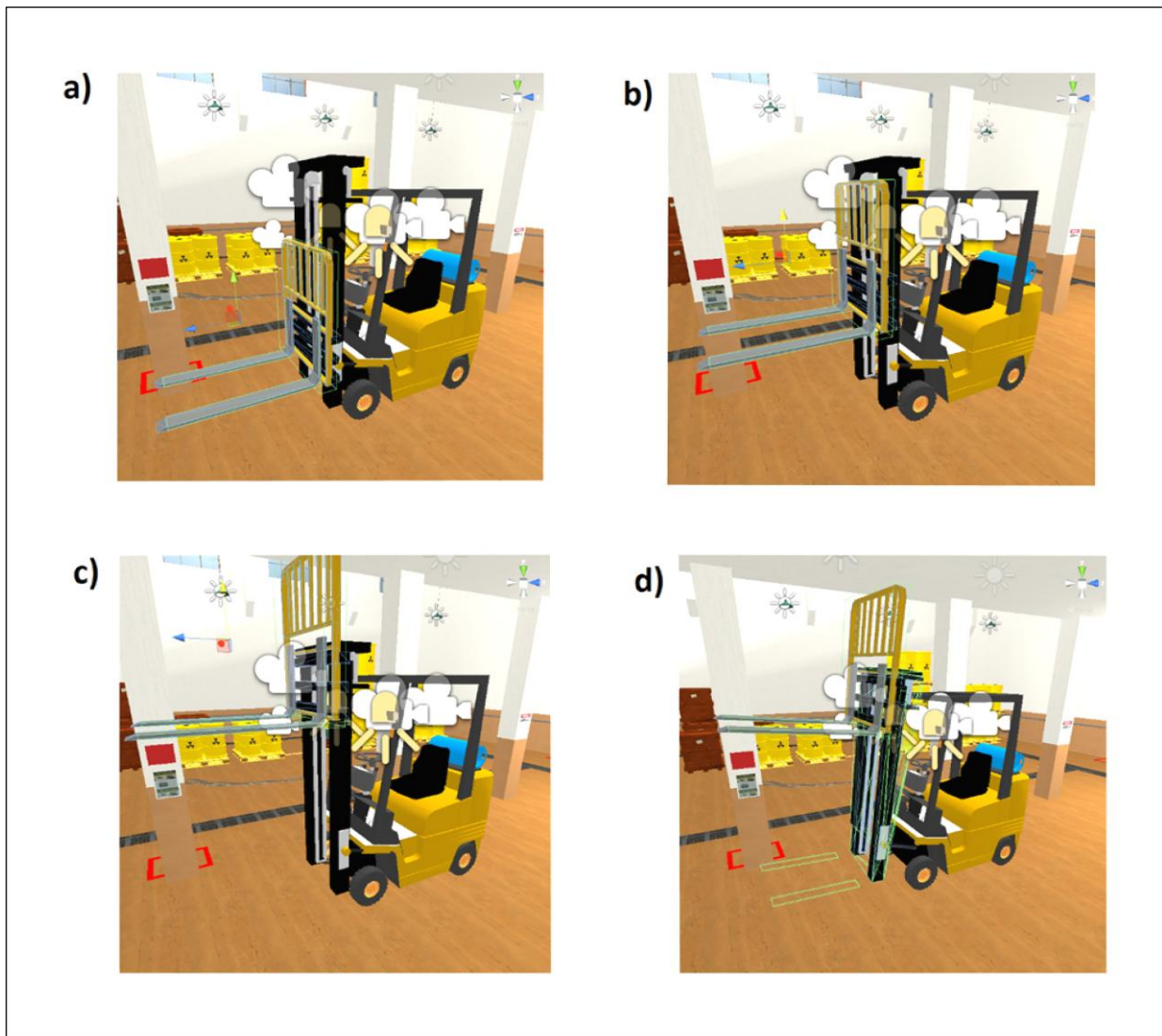


Figura 34 - Diferenças na posição do garfo e torre da empilhadeira em unity.

5.2 A modelagem computacional das radiações no ambiente virtual

A modelagem computacional das radiações do ambiente virtual seguiu os mesmos princípios metodológicos em unreal e unity, esta pode se dividir em basicamente duas partes, a primeira foi a programação dos valores de taxa de dose gama emitidos por todos os barris do ambiente

estes valores teriam que decair com a distância entre o avatar e o barril de forma que representasse a física das radiações, num segundo momento deveria ser implementado os efeitos de blindagem que esta radiação sofre ao atravessar os outros objetos. O modelo utilizado para atender a primeira parte foi o de fontes pontuais para e para que fosse possível a inserção da blindagem foi usado o modelo de atenuação da radiação conforme seção 2.5, porém com medidas experimentais para estimativa da fração de atenuação de cada objeto.

Foram descritos dois procedimentos operacionais, o primeiro chamado PROC01-IEN2015 para que fosse validado o modelo de fontes pontuais e o segundo chamado PROC02-IEN2015 onde seriam coletados dados de rejeito, taxas de radiações dos barris e a medida de atenuação de cada objeto. Através destes testes foi possível programar a dose de radiação recebida pelo avatar em relação a cada um dos barris já atenuada pelos objetos em seu caminho e com o efeito da dispersão volumétrica da radiação. A dose recebida pelo personagem virtual é o somatório dessas taxas recebidas como mostra equação 7. Quando esta taxa é muito alta, acima de $100\mu\text{sv/h}$, foi introduzido um alarme sonoro e luminoso no sistema unity. Também foi aberta uma variável para calcular o acúmulo de dose ao longo do tempo, este também dispara um alarme quando maior que um dado valor.

$$\sum_{i=1}^{i=n} Tx_i, \text{ onde } n = n^{\circ} \text{ de objetos} \quad (7)$$

5.2.1 O levantamento dosimétrico para modelagem virtual

Foi descrito um procedimento para todo o trabalho de levantamento dosimétrico e validação de modelos no ambiente real, estes procedimentos precisam seguir regras rígidas quanto a segurança física dos envolvidos nas medições, é necessária a utilização de monitores pessoais de radiação. São necessárias fontes calibradas de média atividade gama e detectores calibrados.

O procedimento de validação do modelo de fontes pontuais chamado PROC01-IEN2015 segue.

Procedimento PROC01-IEN2015:

- 1 – Posicionar uma fonte calibrada de média atividade, protegida por recipiente, em um ambiente controlado livre de objetos. Este ambiente deve ser cercado e protegido de paredes para que esta radiação gama não afete o meio ambiente.
- 2 – Posicionar em 0,15 metros, de distância da fonte, um detector de radiação gama calibrado. Este detector deve permitir a leitura da radiação a distâncias mais seguras. Este detector pode enviar para celulares estes valores.
- 3 – Retirar a proteção da fonte e se afastar esperando, 30 segundos, que o detector estabilize.
- 4 – Leia esta taxa e organize em uma tabela.
- 5 – Repita o procedimento para as distâncias de 0,30m, 0,45m, 0,6m como mostra a figura 35.
- 6 – Organize estes dados em uma tabela, retire destes valores a radiação de fundo. Esta deve ser medida no mesmo ambiente sem nenhum objeto.

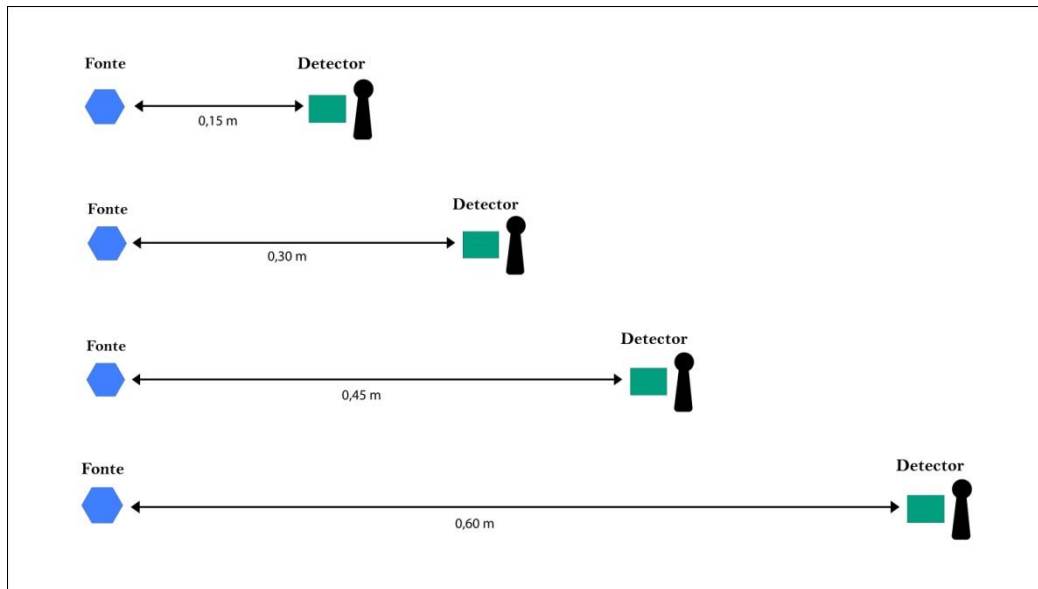


Figura 35 - Procedimento de validação do modelo de fontes pontuais

As distâncias usadas podem ser maiores, todavia esta exigirá fontes com atividades maiores para que seja possível uma leitura significativa. É importante que sejam múltiplos inteiros do primeiro valor medido para que facilite a validação.

Para que sejam coletadas as medidas de cada barril deve-se seguir o procedimento estabelecido a seguir, este procedimento tem como objetivo a coleta de dados para que sejam programados no ambiente virtual. Este procedimento, chamado PROC02-IEN2015, utilizará um detector calibrado e deve ser feito um ambiente controlado e confinado.

Procedimento para coleta de dados dos barris (PROC02-IEN2015) segue:

Procedimento PROC02-IEN2015

1 - Primeiramente deve-se coletar uma referência de indexação do barril a ser estudado, exemplo um número que o referencie.

- 2 – Deve-se colocar o barril em uma posição no espaço e medir, a 0,15m de distância do barril, a taxa de radiação emitida. Esta medida deve ser feita a uma altura igual a metade do barril e esta será a taxa absoluta (T_i) deste objeto.
- 3 – Depois mede-se a radiação a 0,30m de distância e organiza estes dados uma planilha.
- 4 – Em um próximo momento coloque uma fonte calibrada e conhecida pelo procedimento PROC01-IEN2015 no espaço e coloque um detector a 0,65m da fonte colete a medida sem o barril.
- 5 – Insira o barril entre a fonte e o detector como mostra a figura 36 e colete o novo valor de taxa.
- 6 – A diferença entre o valor da taxa de radiação sem o barril e com o barril reflete a medida de atenuação deste barril
- 7 – Calcule qual fração foi atenuada e insira este valor (μ_i) na tabela. Onde μ é o coeficiente atenuador deste objeto (em porcentagem), i é o indexador do barril.
- 8 – Anote nesta planilha o conteúdo (C_i) deste barril.

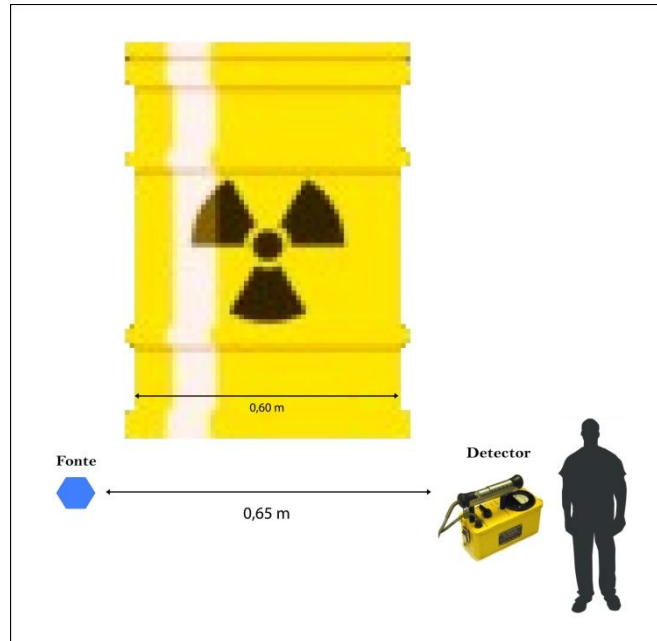


Figura 36 - Situação para cálculo do coeficiente atenuador

Espera-se que se tenha os seguintes valores na tabela final: i , T_i , C_i , μ_i . Onde i é o indexador de cada barril, T_i é a taxa absoluta daquele barril, C_i é o conteúdo do barril e μ_i é o fator atenuador.

5.2.2 Os efeitos de blindagem da radiação

Para que fosse possível representar a física da atenuação foi programado no ambiente virtual o modelo descrito na seção 2.5 com parâmetros experimentais. O modelo teórico leva em consideração aproximações, como a aproximação de boa geometria, que não foram necessárias neste trabalho, visto a medição e representação real dos valores. Para virtualização deste modelo foi traçada uma reta virtual entre cada barril e o avatar na figura 37 pode-se ver uma ilustração deste método que foi implementado tanto em unreal como em unity, desta

forma cada objeto que tangenciasse esta linha atenuaria a radiação emitida por aquele barril com uma fração referente a este objeto, como mostra a figura 38.

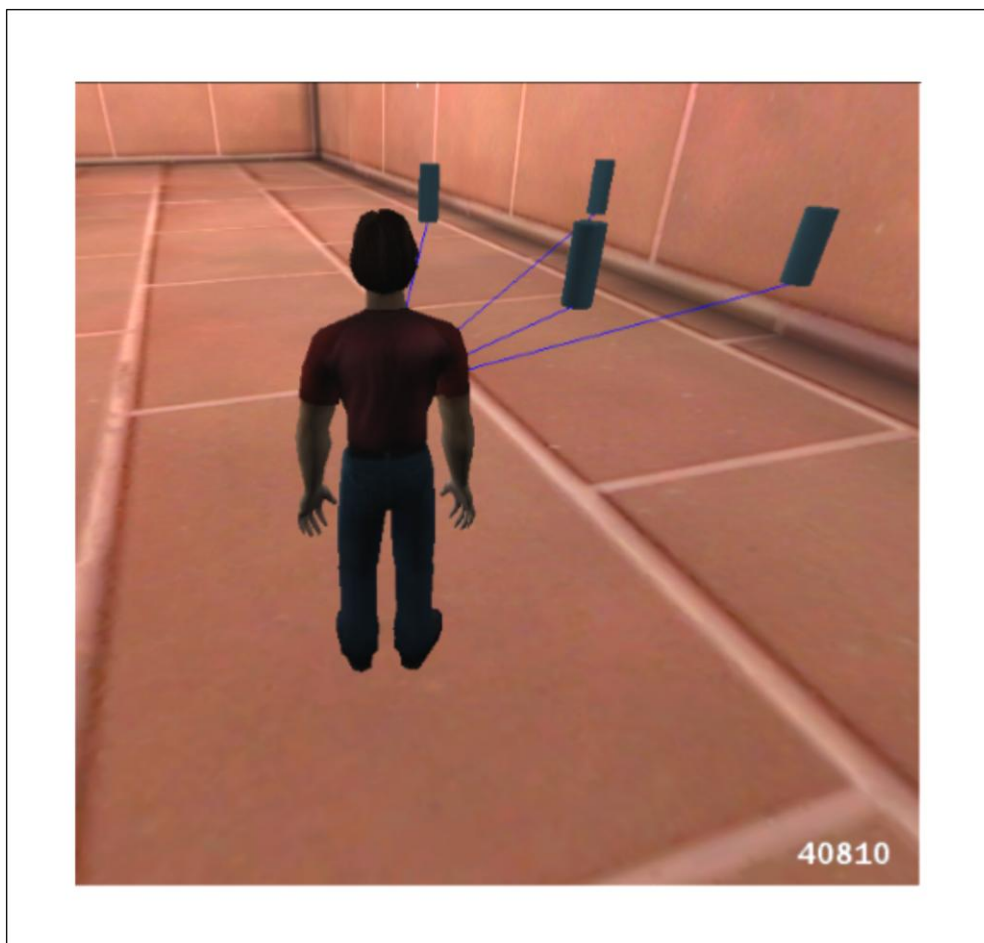


Figura 37 - Visualização das retas referentes a radiação proveniente de cada barril.



Figura 38 - Blindagem de parte dos barris pela estrutura do ambiente

As medidas de atenuação foram tiradas diretamente do ambiente real como descreveu a seção 5.2.1. Foram feitos testes utilizando três barris pra que se estimasse o somatório dos valores e foram usadas fontes calibradas para estimar a atenuação de cada barril.

5.3 Visualização de dados de radiação

A apresentação dos valores de radiação pode se dar de duas formas, a primeira é a apresentação do valor que o avatar está recebendo no ponto em que se encontra, este valor é apresentado em forma de texto. Outra forma seria os valores que o avatar receberia, caso se localizasse em um determinado ponto da área controlada de forma mais qualitativa. Uma

importante metodologia que foi capaz de se introduzida no simulador desenvolvido com o unity foi a possibilidade de apresentação dos dados de radiação que o avatar receberia em cada ponto em forma de malha radioativa. Anteriormente com o unreal era apresentado apenas um valor numérico em tela, todavia a apresentação em forma de malha dinâmica retorna, ao usuário, uma avaliação qualitativa muito melhor (Louka, et al 2014), este trabalho utiliza a criação espacial de microesferas separadas a uma distância fixa no plano XY no ambiente virtual, cada microesfera é uma função com atributos de cor e posição, todavia estes atributos estão diretamente relacionados com a radiação no mesmo ponto XY em que se encontra cada esfera. A partir desta malha busca-se a apresentação de estimativas da taxa de dose no ambiente. Os principais atributos são as cores (variáveis referentes ao RGB do objeto) e a altura Z que sinalizam a magnitude da taxa de radiação. Desta forma foi atribuído que quanto maior o valor da radiação o atributo RGB se encaminharia para o espectro da faixa do vermelho e o atributo Z aumentaria, quanto menor o valor da radiação o espectro seria direcionado para o azul e o Z diminuiria, após ajustes quanto as bordas este método resultou em uma nova forma de avaliar rapidamente a taxa de radiação. Na figura 39 pode-se ver um fluxograma de funcionamento para que seja apresentado o valor de radiação que o avatar recebe ao usuário, este valor é apresentado no canto esquerdo superior da tela. O valor é apresentado em microsievert por hora ($\mu\text{Sv/h}$). Já na figura 40, têm-se o fluxograma para apresentação da radiação, no ambiente virtual, em forma de malha.

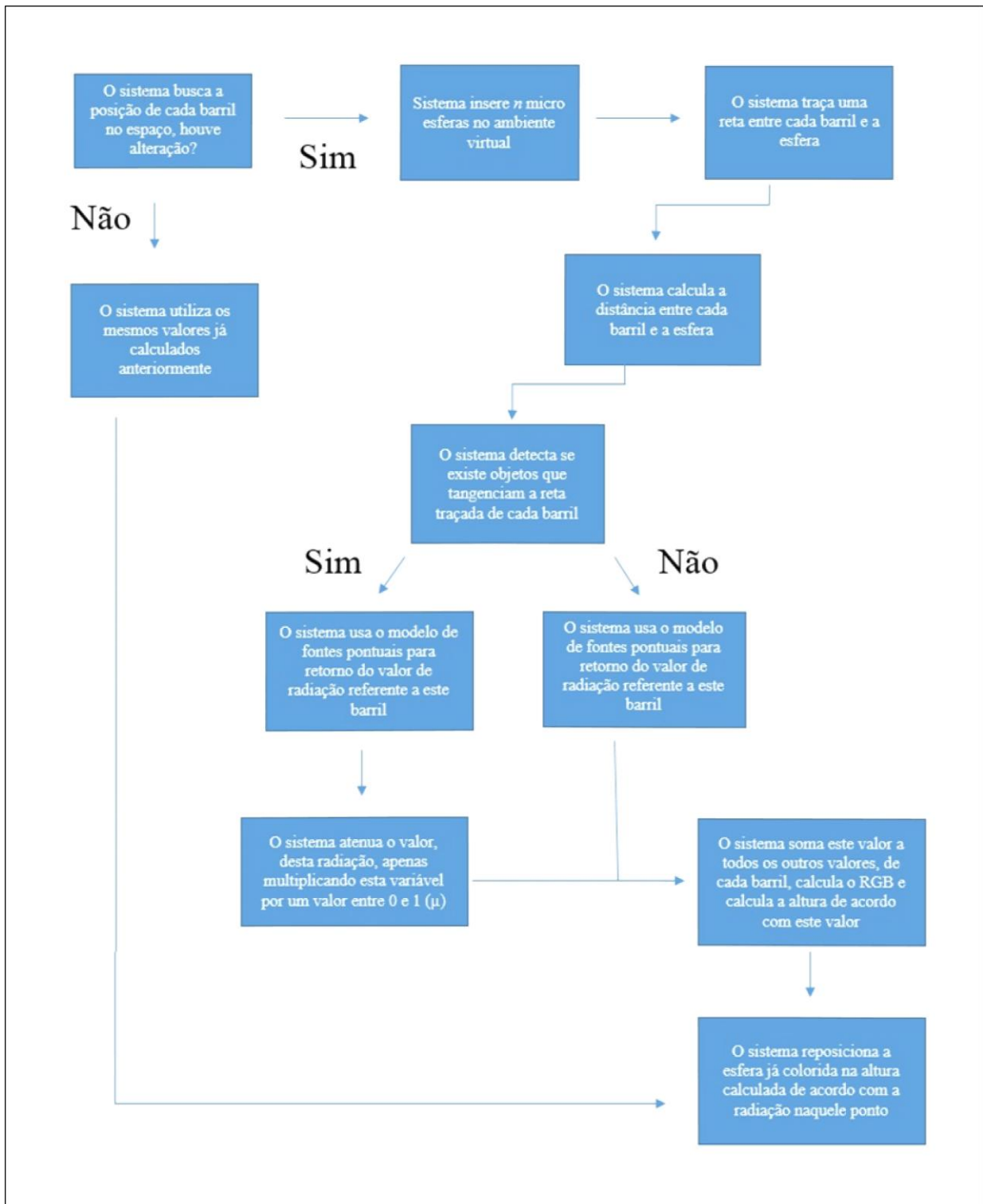


Figura 39 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da radiação sobre o avatar

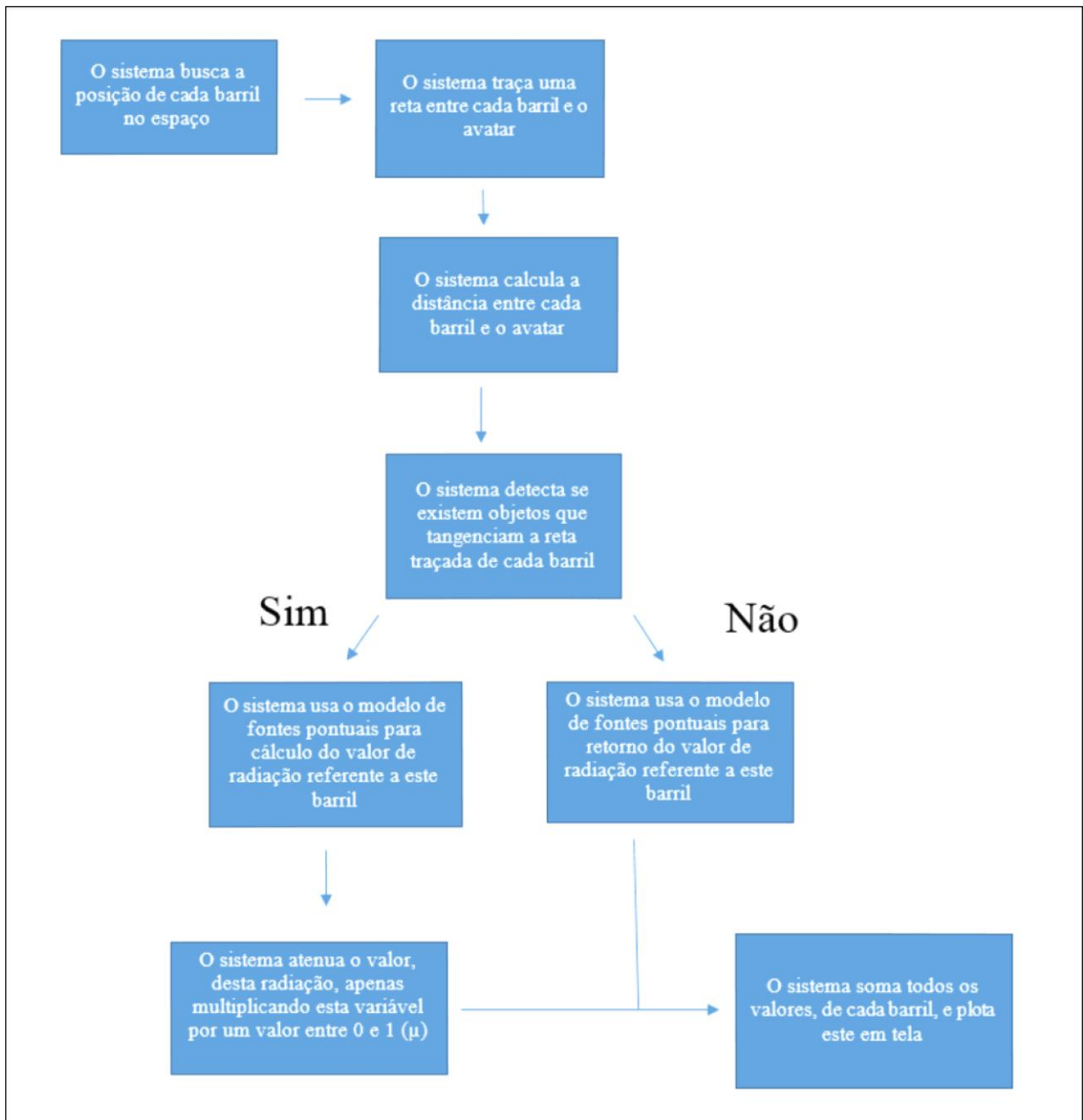


Figura 40 - Fluxograma de funcionamento do cálculo da malha radioativa

6 Estudo de Caso: O depósito de rejeitos do Instituto de Engenharia Nuclear

O Instituto de Engenharia Nuclear, figura 41, se mostrou receptivo e abriu as portas e procedimentos do seu depósito de rejeitos radioativos para que as metodologias descritas neste texto fossem testadas e validadas.

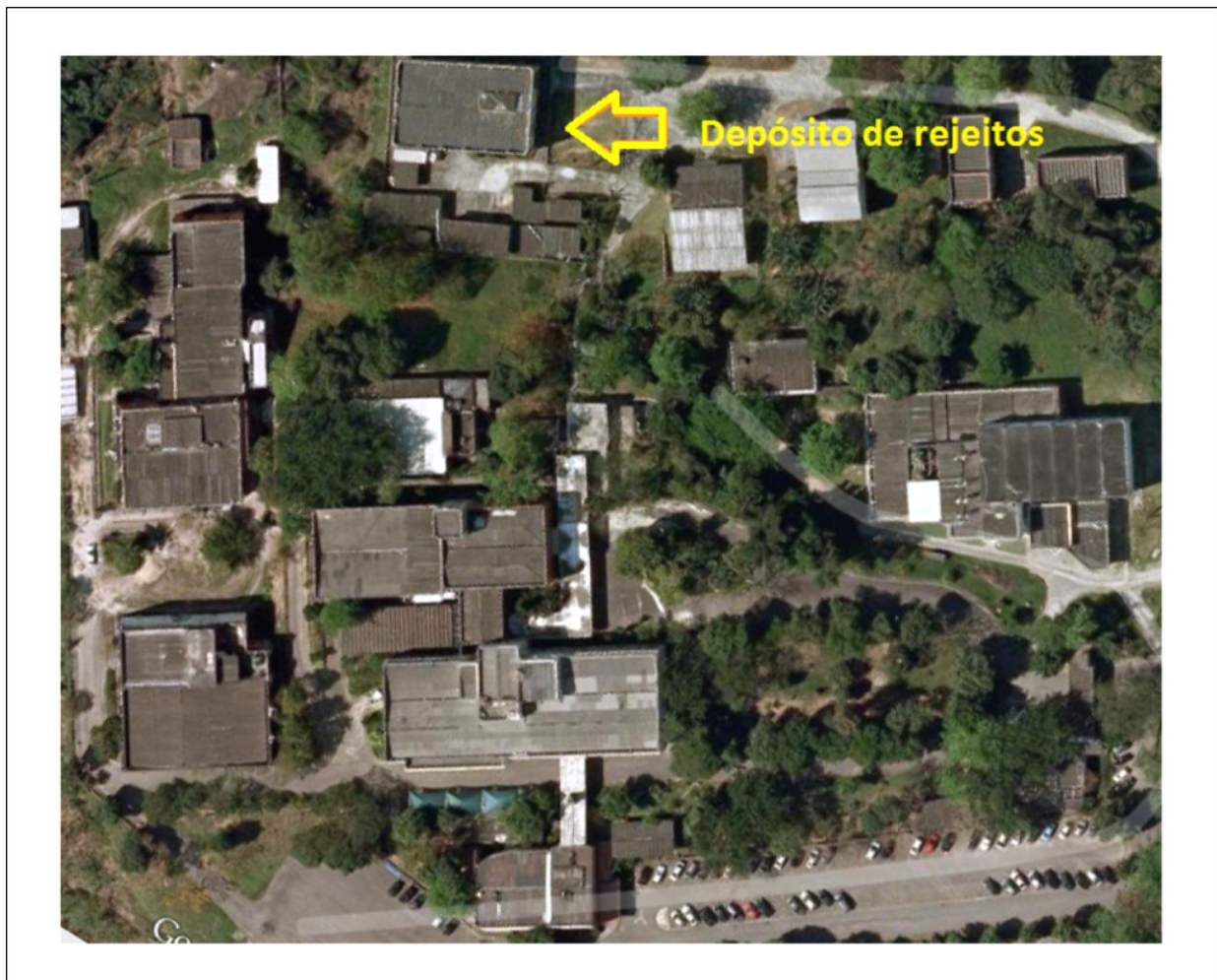


Figura 41 - Vista aérea do IEN/CNEN, com destaque no depósito de rejeitos radioativos.

6.1 O depósito de rejeitos radioativos do IEN/CNEN

Localizado na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) é a principal empresa responsável pelo gerenciamento de rejeitos do estado.

O principal galpão, responsável pelos rejeitos do IEN, recebe materiais nucleares de diferentes tempos de meia-vida . Na figura 42 encontra-se a planta baixa simplificada do repositório, as imagens 43 e 44 são imagens de dentro do galpão. O depósito de rejeitos do IEN pode ser considerado um ambiente hostil devido aos valores de taxas de radiações acima do usual, quando comparados com outros ambientes da área nuclear. O perfil de radiação é frequentemente monitorado por equipes especializadas e este perfil varia de acordo com a realocação dos barris, o depósito ainda se encontra parcialmente ocupado e cada barril contém um número que se refere ao material no seu interior, assim é possível saber características desta fonte. O depósito é considerado de superfície e recebe rejeitos de baixa e média atividade.

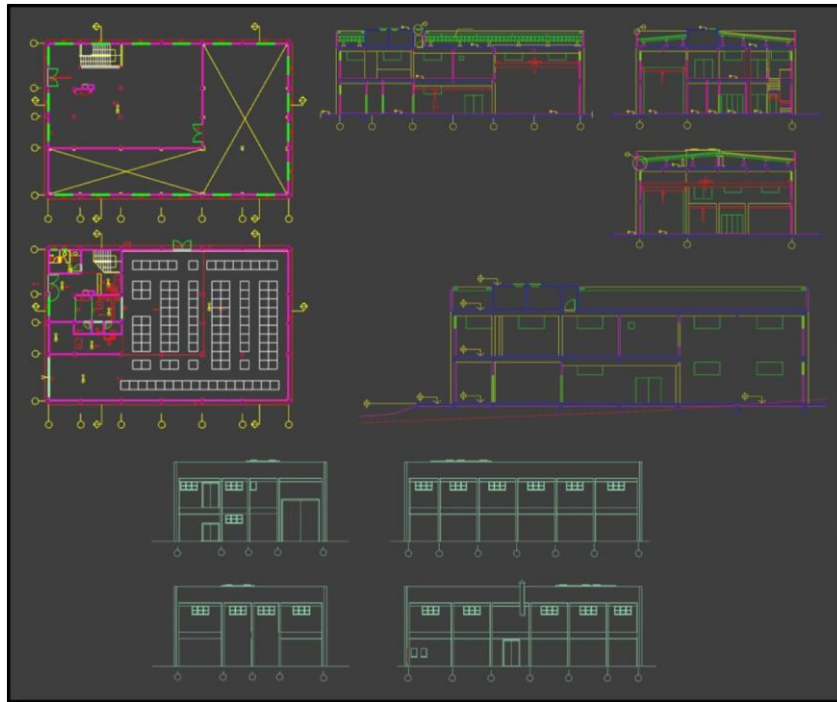


Figura 42 - Planta baixa utilizada na construção do depósito de rejeitos do IEN



Figura 43 - Imagem do depósito de rejeitos radioativos



Figura 44 - Imagem com a disposição de alguns rejeitos no depósito estudado.

Dentro do depósito de rejeitos os pallets que sustentam os barris são colocados a aproximadamente um metro de distância uns dos outros. Dentro dos barris encontram-se rejeitos que vão desde materiais utilizados no cotidiano de indústrias nucleares, como por exemplo, luvas, óculos de proteção e botas descartáveis até fontes de cézio, cobalto, detectores de fumaça, etc..

6.2 Resultados

Neste capítulo serão mostrados resultados do projeto desenvolvido em Unreal e Unity, será possível observar resultados quanto às metodologias. i) Quanto à Modelagem do depósito

de rejeito do IEN, ii) Quanto ao Modelo de radiação utilizado, iii) Quanto ao Modelo de blindagem, iv) Quanto a visualização do perfil de radiação em tempo real.

Os resultados do modelo de radiação e de blindagem foram validados junto ao ambiente real. Na ferramenta Unity foi possível inserir uma empilhadeira para realocação dos barris e a malha radioativa para apresentação dos resultados de dose recebidos pelo avatar.

6.2.1 Quanto à Modelagem do ambiente virtual

A modelagem do ambiente virtual, em ambas as ferramentas, seguiu a planta do depósito de rejeitos do IEN como mostra a figura 45.

O ambiente virtual desenvolvido no Unreal Ed pode ser visto na perspectiva de cima como mostra a figura 46. A figura 47 mostra o lado externo do depósito real. A figura 48 que mostra o lado externo virtual. A figura 49 mostra uma visão interna do depósito real. A figura 50 mostra o ambiente interno virtual. Os resultados quanto a modelagem do ambiente para unity podem ser vistos nas figuras 51, 52 e 53. Para o simulador, a partir da ferramenta unity, não foi modelada a parte externa do depósito, visto a preocupação apenas com as operações internas do depósito de rejeitos.

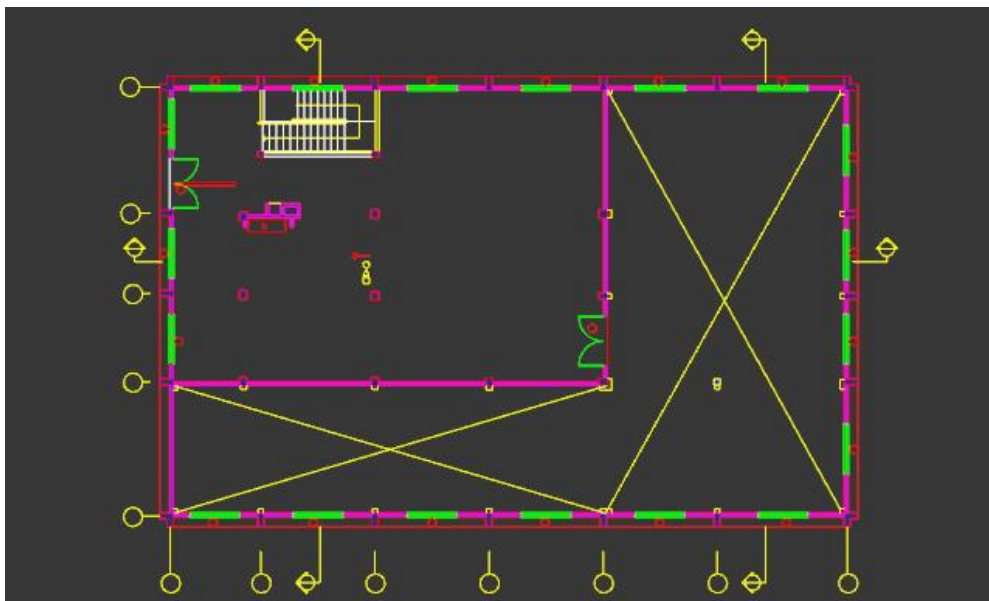


Figura 45 - Planta retirada do modelo AutoCAD sobre a qual o projeto foi executado

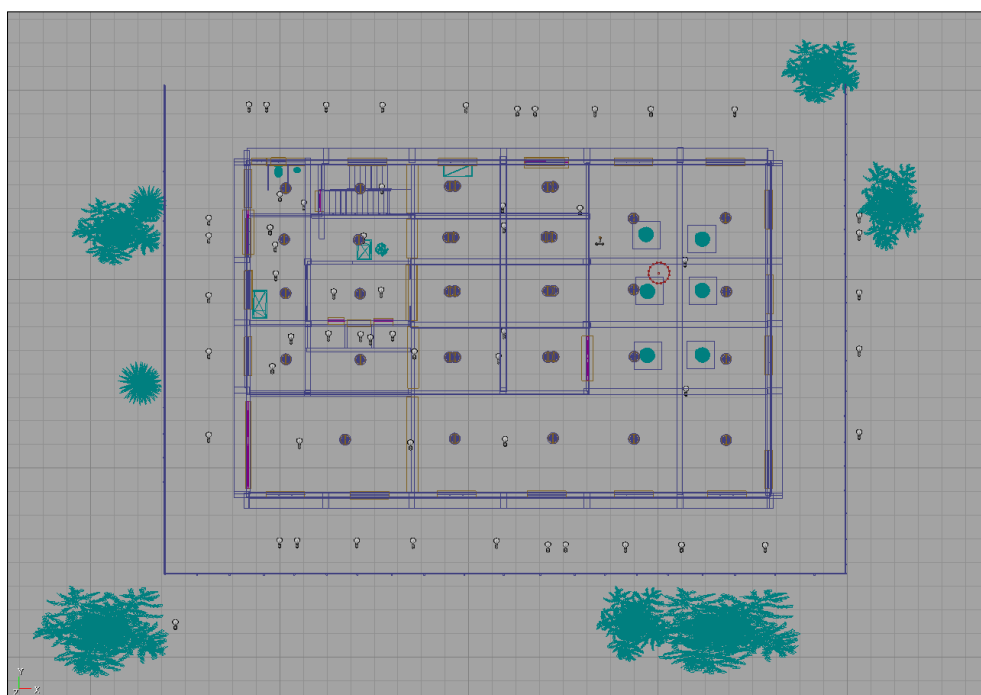


Figura 46 - Planta, na visão de cima, desenvolvida no Unreal Ed para construção do ambiente virtual.



Figura 47 - Lado externo do ambiente real



Figura 48 - Lado externo do ambiente virtual em unreal



Figura 49 - Interior do depósito real



Figura 50 - Interior do depósito virtual através do Unreal



Figura 51 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D



Figura 52 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D



Figura 53 - Interior do depósito virtual através da Unity 3D

Na figura 54 pode-se ver uma imagem que, o personagem virtual, visualiza de dentro deste veículo, a empilhadeira possui movimentos de acordo com o real, entre eles estão o deslocamento em todas direções do plano XY, a colisão com os objetos e, como principal movimento, o deslocamento individual dos garfos da empilhadeira.



Figura 54 - Imagem que, o personagem virtual, visualiza de dentro da empilhadeira

Para que fosse possível a realocação dos barris, na figuras 55a, 55b, 55c e 55d pode-se ver quatro posições diferentes dos barris sendo içado com a empilhadeira, as principais variações estão na altura e inclinação do pallet, esta operação se aproxima bastante com uma operação real com a empilhadeira no depósito de rejeitos do IEN.

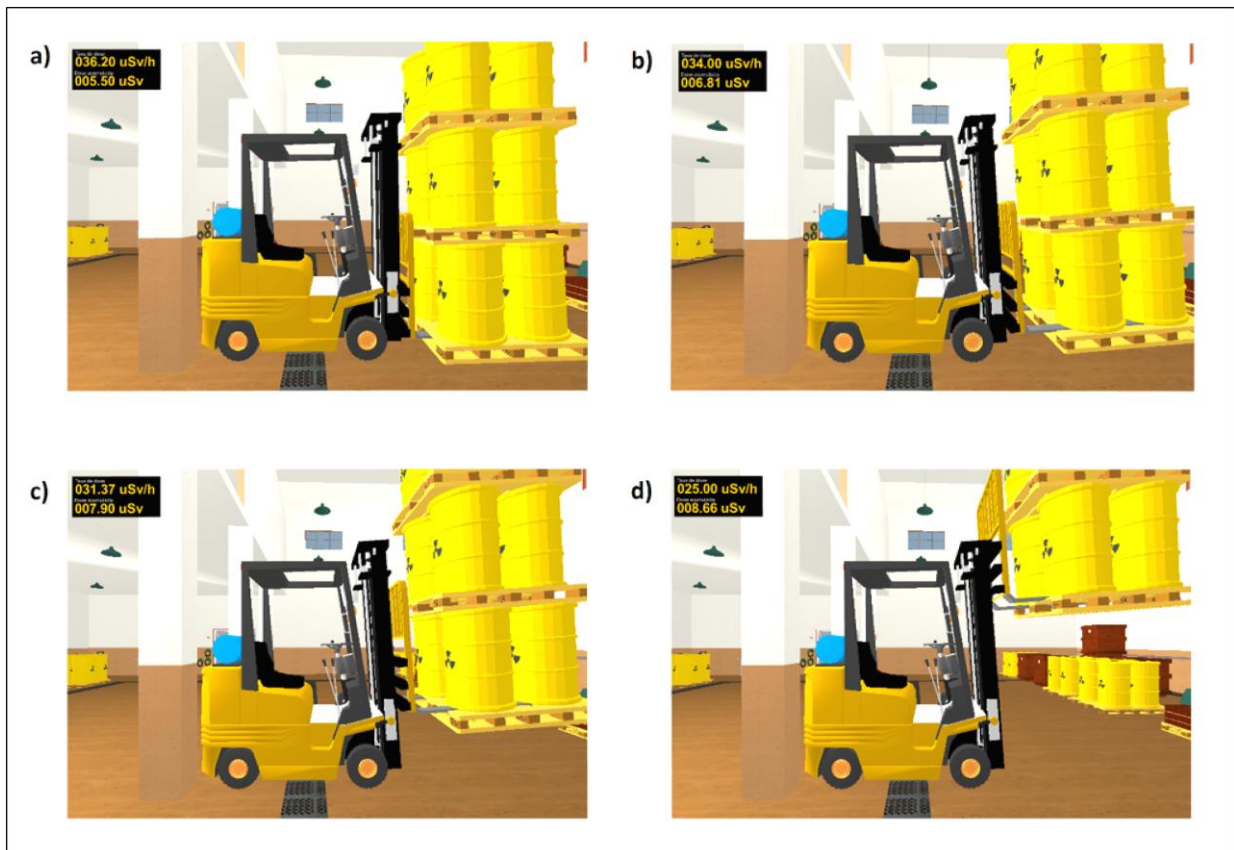


Figura 55 - Içamento do conjunto de barris utilizando a empilhadeira.

Na ferramenta Unity foi possível introduzir uma física mais próxima ao real, uma das grandezas possíveis foi a queda dos barris durante uma operação mal sucedida, este possível incidente pode ocorrer devido a vários fatores e mesmo com o acidente é possível se estimar as taxas de dose recebidas. Na figura 56 pode-se ver os barris espalhados no chão devido ao incidente simulado. Para que seja possível retomar a simulação após um incidente é necessário que se recomece do início.

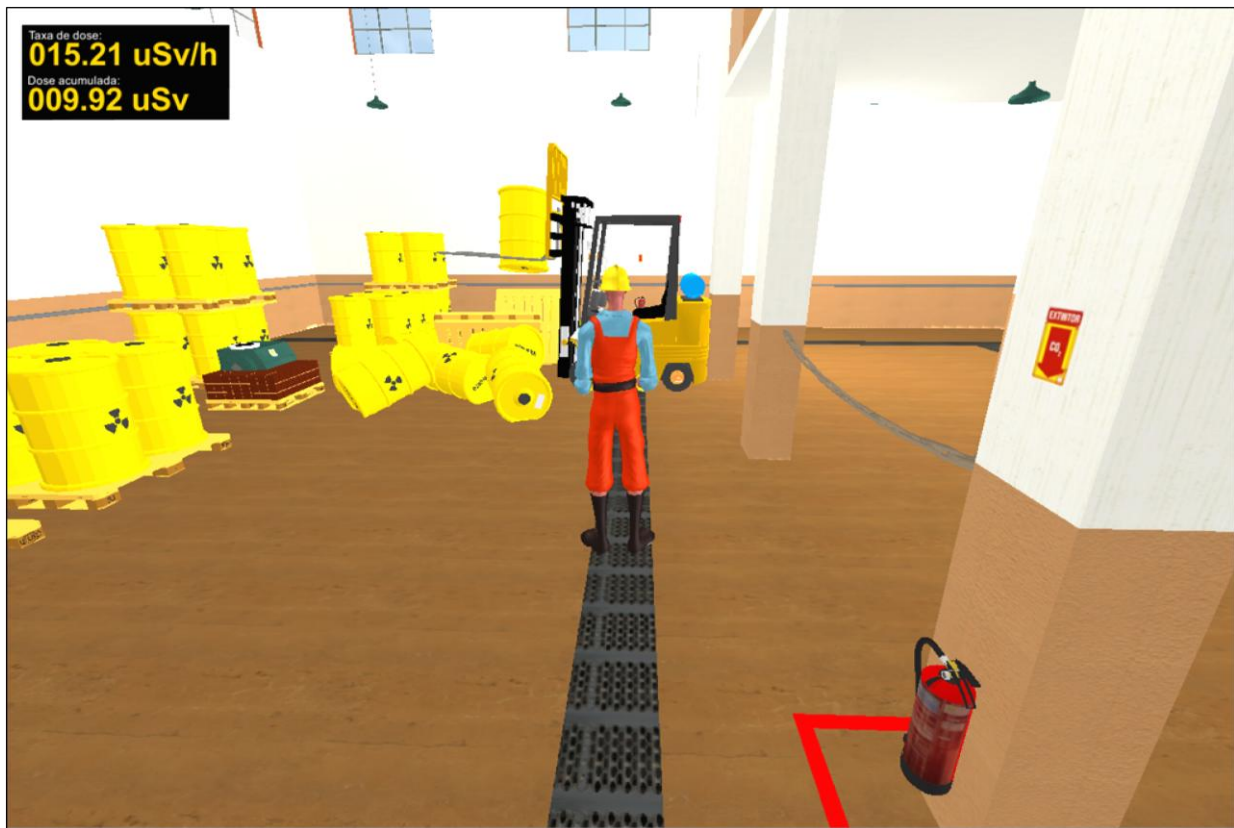


Figura 56 - Barris espalhados após simulação de incidente

6.2.2 Quanto à modelagem computacional das radiações no ambiente virtual

Para validação do modelo de radiação foram testadas as mesmas situações em ambientes real e virtual. O teste quanto ao ambiente virtual foi referenciado apenas como ambiente virtual, foi desprezada a diferença da ferramenta de modelagem, visto que para cálculos numéricos simples, como este, não existe diferença sobre os valores de radiação recebidos pelo avatar.

Os valores de radiação são implementados em ambiente virtual devido aos conceitos teóricos associados a medidas experimentais, já os valores de radiação do ambiente real sofrem interferências do ambiente real e erros experimentais, levando assim, a pequenas diferenças nos valores de medição como são vistos a seguir. Situações para se medir estas variações, entre valores reais e virtuais, foram elaboradas. A seguir estão descritas as situações testadas.

Situação 1: Foi colocada uma fonte de césio calibrada (de atividade conhecida) em um ponto do depósito de rejeitos com background de 1,77 uSv/h e os valores de taxa foram medidos em diferentes distâncias da fonte. A figura 57 ilustra a situação 1, junto aos valores de distâncias da fonte.

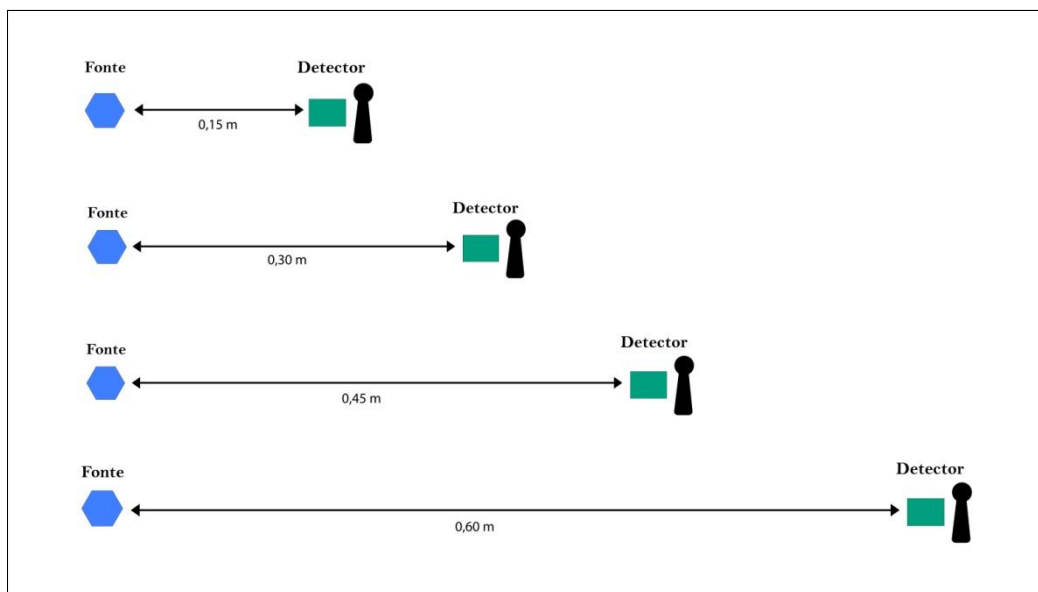


Figura 57 - Representação da situação 1 testada no ambiente real.

Na Tabela 2 estão os valores experimentais encontrados no ambiente real e no ambiente virtual. O valor de referência foi de 302 uSv/h, este foi o valor que a fonte usada emitia a distância de 15 cm, na primeira linha da tabela estão os valores teóricos da taxa de dose para a

referência. Na segunda linha encontram-se os valores medidos no ambiente virtual para a referência.

Tabela 2 - Valores de taxa de dose gama encontrados no ambiente real e no ambiente virtual para situação 1.

Distância entre o detector e fonte	0,15 m	0,30 m	0,45 m	0,60 m
Ambiente Virtual (uSv/h)	302	75,5	33,55	18,87
Ambiente Real (uSv/h)	302	75,1	32,9	20,1
Erro (%)	Referência	0,52	1,93	6,51

Situação 2: Foram colocados dois barris em diferentes posições para que fosse validado o modelo de somatório das taxas provenientes de cada barril. A figura 58 ilustra a situação 2 .

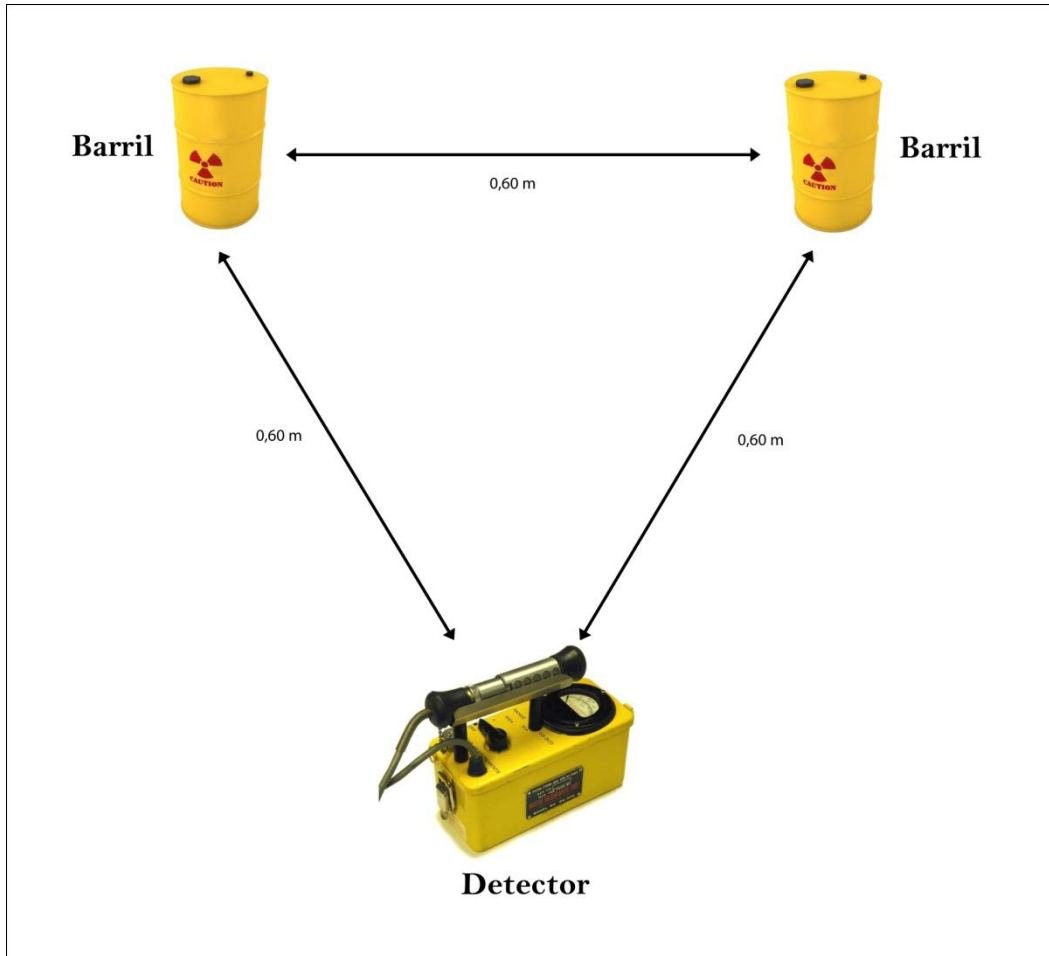


Figura 58 - Ilustração da situação 2 testada no ambiente real

Na tabela 3 estão os valores encontrados no ambiente real e virtual referentes a situação 2.

Tabela 3 - Valores encontrados no ambiente real referente à situação 2

	Taxa de B1 (0,6 m) uSv/h	Taxa de B2 (0,6 m) uSv/h	Taxa total (B1 + B2) uSv/h
Ambiente Real	36,1	22,4	52,6
Ambiente Virtual	37,2	23,7	58,0
Erro (%)	3,05	5,80	10,3

Situação 3 - Os mesmos barris foram usados para uma nova situação de teste, porém com uma configuração diferente. A nova disposição espacial pode ser vista da figura 59.

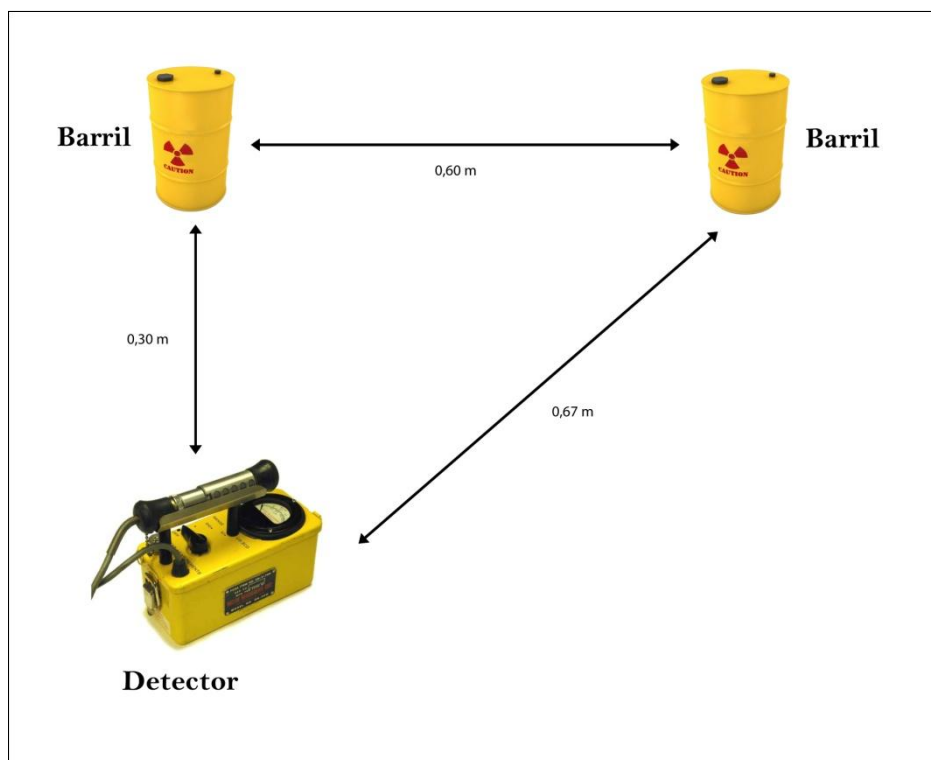


Figura 59 - Ilustração da situação 3 testada no ambiente real

Na tabela 4 estão os valores encontrados no ambiente real e virtual referentes à situação 3.

Tabela 4 - Valores encontrados no ambiente real e no ambiente virtual para situação 3

	Taxa de B1 (0,67 m)	Taxa de B2 (0,3 m)	Taxa total (B1 + B2)
	uSv/h	uSv/h	uSv/h
Ambiente Real	22,0	72,5	101
Ambiente Virtual	23,2	74,4	106,2
Erro (%)	5,45	2,35	5,2

6.2.3 Quanto ao Modelo de blindagem

Foram elaboradas as situações 4 e 5 para que o modelo de blindagem fosse validado, estas situações utilizaram um barril e uma fonte calibrada. O barril serviu como estrutura de blindagem. As situações 4 e 5 montadas no ambiente real estão ilustradas de acordo com as figuras 60 e 61 respectivamente, estas compreendem uma distância entre fonte e detector com o barril entre eles, as distâncias foram de 65 centímetros para situação 4 e de 90 centímetros para situação 5, as mesmas situações de distâncias foram feitas sem o barril entre a fonte e detector.

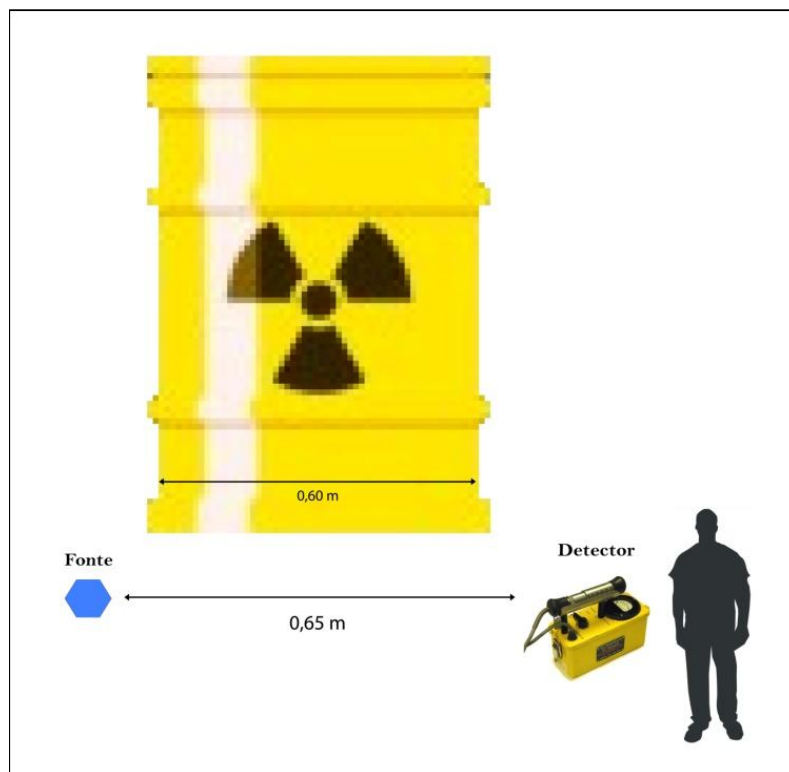


Figura 60 - Ilustração da situação 4 testada no ambiente real

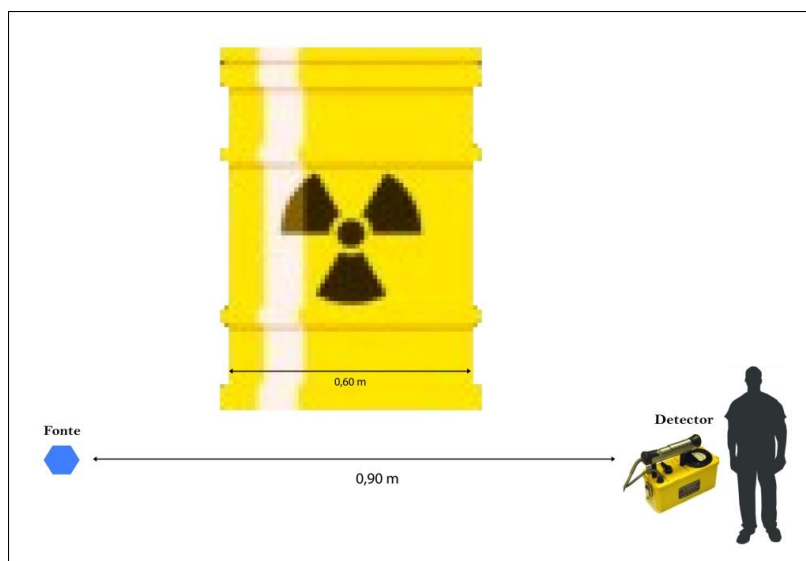


Figura 61 - Ilustração da situação 5 testada no ambiente real.

Na tabela 5 e 6 estão os valores encontrados no ambiente real e virtual, respectivamente, referentes aos testes de blindagem, foram medidas as taxas com o barril entre fonte e detector e sem o barril.

Tabela 5 - Teste da atenuação de radiação gama para barril padrão no ambiente real.

	Taxa (Com barril) uSv/h	Taxa (Sem barril) uSv/h
Situação 4	17,1	18,8
Situação 5	8,4	10,3

Tabela 6 - Teste da atenuação de radiação gama para barril padrão no ambiente Virtual.

	Taxa (Com barril) uSv/h	Taxa (Sem barril) uSv/h
Situação 4	16,4	18,2
Situação 5	7,9	10,8

A atenuação média para o barril, do ambiente real, testado foi de 13,7 % da radiação gama incidente. Este valor foi programado no ambiente virtual, porém pelo caráter não determinístico da emissão os valores flutuam tanto na medição real quanto na virtual. Os valores de erro se encontram na tabela 7.

Tabela 7 - Valores de erro para medidas de atenuação entre ambiente real e virtual.

Situação 4		
	Taxa (Com barril) uSv/h	Taxa (Sem barril) uSv/h
Ambiente Real	17,1	18,8
Ambiente Virtual	16,4	18,2
Erro(%)	4,1	3,3
Situação 5		
	Taxa (Com barril) uSv/h	Taxa (Sem barril) uSv/h
Ambiente Real	8,4	10,3
Ambiente Virtual	7,9	10,8
Erro(%)	6,3	4,9

6.2.4 Quanto a visualização do perfil de radiação em tempo real

Os resultados quanto a visualização da radiação serão mais detalhados a seguir. É uma importante funcionalidade saber taxa e dose de radiação que o avatar está recebendo em tempo real, poder visualizar valores precisos e uma estimativa do perfil de valores pode inferir nos próximos passos de procedimento da operação. Também um importante conceito está no fato de poder realocar os barril de maneira que se tenha taxas de doses mais baixas em áreas de grande acesso do depósito de rejeitos radioativos. A apresentação exata que o avatar recebe pode se ver no canto superior esquerdo da figura 62, nesta interface dois valores são mostrados, a taxa instantânea da radiação recebida e o valor acumulado ao longo da operação.



Figura 62 - Destaque da legenda de valores de taxa e dose de radiação recebidos pelo avatar

Outro importante fator se deve ao fato de se ter uma estimativa do perfil da radiação no ambiente em tempo real e de forma dinâmica. Esta avaliação qualitativa pode ser feita através da metodologia de visualização em forma de malha. Esta malha tem seu valor ajustado em tempo real, a cada realocação de objeto no espaço é possível apenas apertar uma tecla e visualizar o perfil, na figura 63 pode ser vista a malha com a legenda na visão do avatar e na figura 64 pode ser vista a malha de dentro da empilhadeira.



Figura 63 - Ambiente virtual com a malha radioativa e a legenda de valores da radiação.

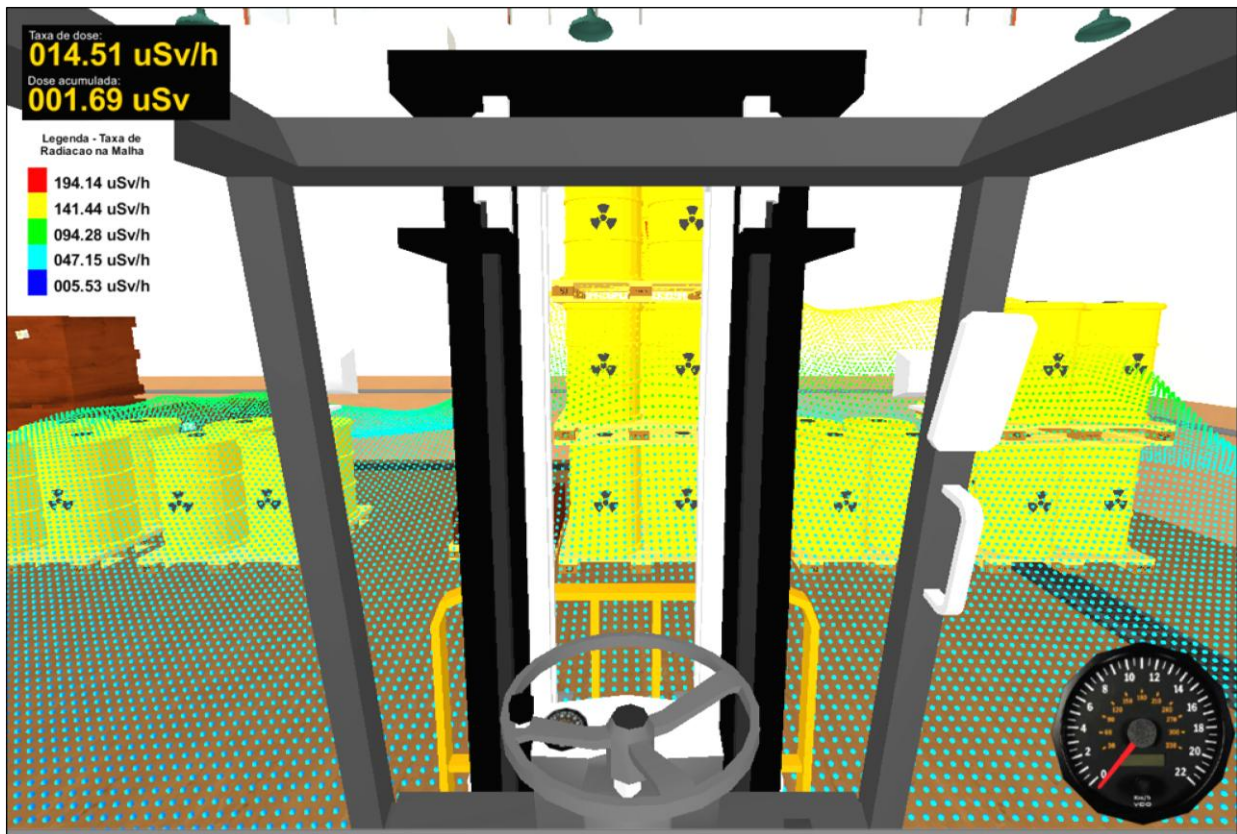


Figura 64 - Vista do ambiente virtual com a malha radioativa de dentro da empilhadeira

Diferentes posições dos objetos geram diferentes malhas, na figura 65a pode-se ver o perfil em forma de malha para uma determinada alocação, já na figura 65b tem-se outra malha com a realocação dos barris, uma condição dosimétrica importante de se observar é que como os barris foram mais espalhados a radiação máxima no ambiente caiu, como pode ser observado na legenda da figura 65b.

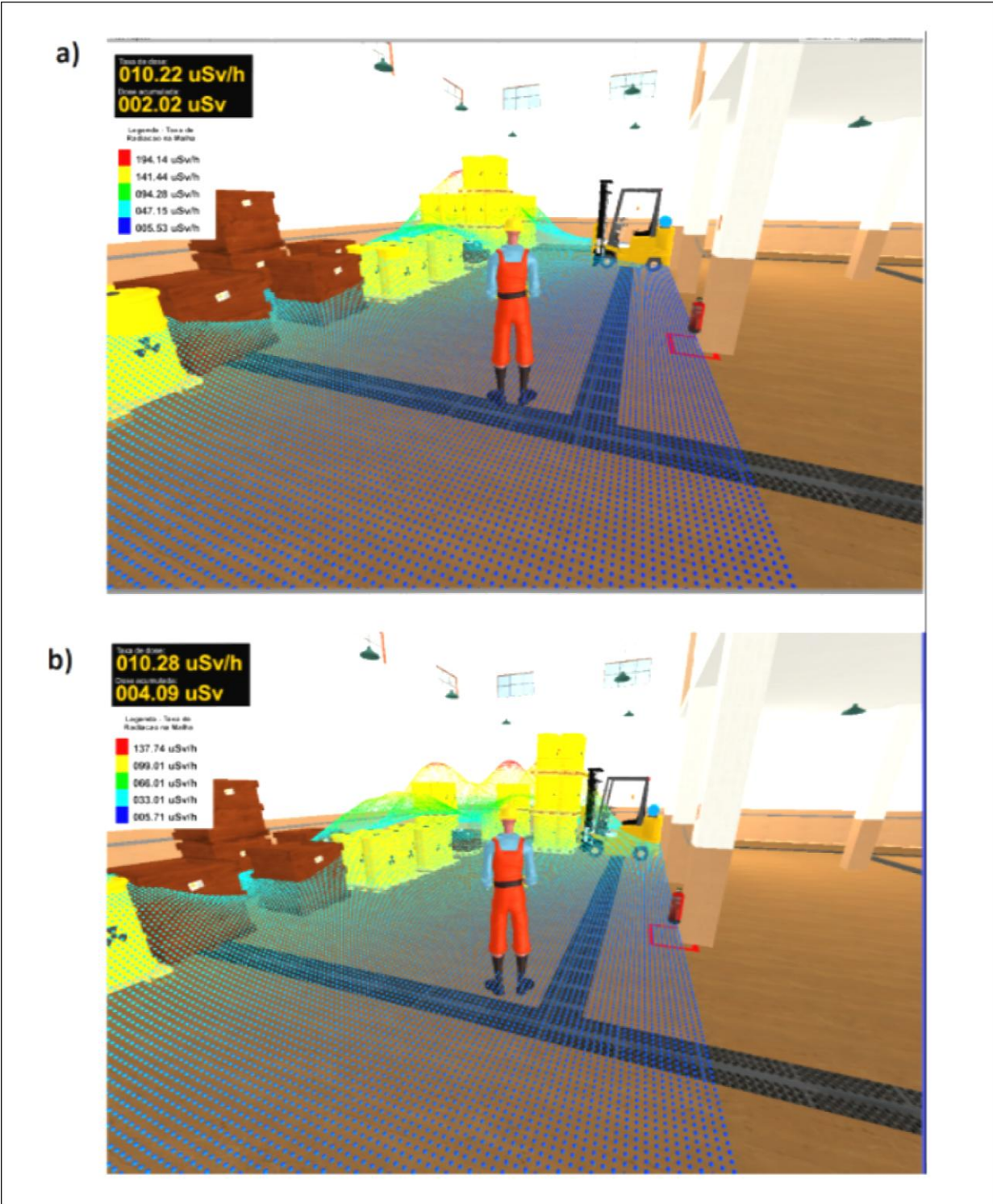


Figura 65 - Diferentes posições de alocação com a malha gerada

Com a possibilidade de incidente ainda é possível visualizar a malha radioativa de acordo com a posição dos barris. Na figura 66 pode-se ver a malha gerada após a simulação de queda da pilha de barris.



Figura 66 - Malha gerada com a simulação de incidente na operação de realocação

Sempre que ocorre um incidente ou falha no procedimento de treinamento é necessário recomençar a simulação de alocação do zero, este funciona como uma espécie de punição, fazendo com que o operador tenha mais atenção com determinado procedimento.

7 Conclusão

Os resultados, quanto à modelagem do ambiente virtual, se mostraram satisfatórios, visto a boa representatividade e grau de realismo atingidos, o modelo de fontes pontuais se mostrou eficiente para valores de radiação mais significativos e foi percebido que a diferença entre os valores teóricos e experimentais decresce com o aumento da taxa de dose medida no ambiente real. Os valores mais hostis ao ser humano podem ser bem representados através do modelo adotado. O modelo de blindagem segue valores reais, descartando assim as necessidades das aproximações teóricas, que, desta forma, representaram bem a interação da radiação com a matéria no ambiente virtual. O núcleo de jogo Unreal se mostrou uma boa ferramenta quanto a possibilidade de implementação dos cálculos de dosimetria, todavia deixou muito a desejar quanto a modelagem virtual dos objetos, de maneira mais realística. A ferramenta Unity 3D se mostrou muito eficiente em todos aspectos, a capacidade de importação de objetos tridimensionais, o fácil acesso a uma documentação sempre atualizada e a constante correção de *bugs* fez desta a ferramenta ideal para a continuidade deste trabalho.

8 Trabalhos Futuros

A realidade Virtual tem evoluído a cada dia, dispositivos de imersão tem surgido de forma a deixar o usuário cada vez mais envolvido com a simulação computacional. Um outro aspecto importante é o avanço das placas gráficas, este possibilita níveis de cálculo e realismo como não existiam no passado. Neste contexto as possibilidades de trabalhos futuras são inúmeras, entre as principais podem-se destacar:

- A Implementação da simulação para o novo HMD chamado oculus Rift
- A Otimização de recursos gráficos para execução em dispositivos portáteis como smartphones.
- A Visualização da dispersão radioativa (pluma radioativa) caso ocorra vazamento de algum barril.
- A Sincronização das posições reais dos barris com seu posicionamento virtual de forma sistemática e automática
- A Inserção de monitores de área e envio dos níveis de radiação para a plataforma virtual de forma a utiliza-la no cálculo da superfície de radiação.
- O cálculo de valores da radiação usando métodos estatísticos.

Alguns destes trabalhos só são possíveis com servidores de alto desempenho e novos dispositivos de realidade virtual, outros dependem de cálculos da dinâmica de fluidos e sistemas de comunicação por redes. Todavia seriam grandes contribuições tecnológicas principalmente pelo fato de juntar a realidade virtual com métodos consagrados das diferentes áreas da engenharia.

9 Referencias

Adams, L. *Visualização e realidade virtual*, Ed. Makron Books, pp. 255-259, São Paulo, 1994.

Aukstakalnis, S. & Blatner, D. *Silicon mirage: the art and science of virtual reality*, Berkeley, CA, 1992.

Badler, N.I., 2002a. LiveActor: A virtual training environment with reactive embodied agents. Workshop on Intelligent Human Augmentation and Virtual Environments, University of North Carolina at Chapel Hill, October;

Berkhout, F. (1991) *Radioactive Waste. Politics and Technology*. Routledge, p. 4.

Bell, J.; Fogler, H. S. (1995) "The Investigation and Application of Virtual Reality as an Educational Tool" Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference, Anaheim, CA..

Blowers, A., Lowry, D., Solomon, B. D., 1991. *The International Politics of Nuclear Waste*. London: Croom Helm

Byrne, C. (1996) "Water on Tap: The Use of Virtual Reality as an Educational Tool". Washington, Tese de Doutorado - University of Washington

Bryson, S. Virtual reality in scientific visualization, *Communications of the ACM*, pp. 62-71, vol. 39, n. 5, May, 1996.

Burdea, G., Coiffet, P. (2003) "Virtual Reality Technology", John Wiley & Sons.

Chatam, R.E., 2007. Games for training. *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM)* 50 (7), 36-43.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Gerencia de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas, CNEN-NE-6.05, CNEN, Rio de Janeiro, 1985.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Segurança de Sistemas de Barragem de Rejeitos Contendo Radionuclídeos, CNEN-NE-1.10, CNEN, Rio de Janeiro, 1980.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, CNEN-NE-6.09, CNEN, Rio de Janeiro, 2002.

EPA, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, Federal Guidance Report No.13, EPA 402-R-99-001, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, September 1999

FLYNN, J. Nuclear stigma. In Pidgeon N Kasperson RE and Slovic P (eds) *The Social Amplification of Risk*. Cambridge: Cambridge University Press, 326-352, 2003

Freitas, V.G.G, Mól, A.C.A., Pereira, C.M.N.A., 2009b. Real time determination of dose radiation through artificial intelligence and virtual reality. 2009 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2009, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 27th – October 02.

GASPAR, João Alberto da Motta. *Google SketchUp Pro 8 passo a passo (em português)*. São Paulo: (s.n.), 2010. [ISBN 978856145305-3](#)

GAMSON, W.A.; MODIGLIANI, A. Media discourse and public opinion on nuclear power: A constructionist approach. *American Journal of Sociology* v. 95, n.1, p. 1–37, 1989.

Gulick, Charles (1987). *Runway U.S.A.*. Microsoft Press. ISBN 978-1556150029. Retrieved 2009-02-05

Hancock, D. Viewpoint: virtual reality in search of middle ground, *IEEE Spectrum*, 32(1):68, January, 1995.

Hand, C. Other faces of virtual reality, First International Conference MHVR'94 -Lecture Notes in Computer Science n.1077, pp. 107-116, Ed. Springer, Moscow, Russia, September, 1994.

Hand, C. *A Survey of 3D Interaction Techniques*.

Hajek, B., Kang, K., Lee, Y., Shin, Y.J., 2004. Internet virtual reality environment for simulating, predicting, and minimizing worker radiation exposure. American Nuclear Society's 4th International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Instrumentation and Human Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT 2004), Columbus, Ohio, September 19–22.

HOBMAN, E.; ASWORTH, P. Public support for energy sources and related technologies: the impact of simple information provision. *Energy Policy*, v. 63, p. 862-869, 2013.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Near surface disposal of radioactive waste, Safety Standards Series No. WS-R-1, IAEA, Vienna, 1999a.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste, Safety Guide No. WS-G-1.1, IAEA, Vienna, 1999b.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and technical basis for the near surface disposal of low and intermediate level waste, Technical Reports Series No. 412, IAEA, Vienna, 2002a.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 1983b. Conditioning of Low and Intermediate Level Radioactive Waste, Vienna, Technical Report Series No. 222, p. 14.

Iguchi, Y., Louka, M.N., & Johnsen, T., 2004. VRdose: An exposure dose evaluation system based on virtual reality technology – current status and future possibilities. Proceedings of 2004 Enlarged Halden Programme Group Meeting, Halden, Norway.

Jacobson, J., Lewis, M., 2005. Game engine virtual reality with CaveUT. Computer 38 (4), 79–82.

Jacobson, J., Hwang, Z., 2002. Unreal tournament for immersive interactive theater. Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on Game Engines in Scientific Research 45 (1), 39–42.

Jain, S., McLean, C., 2005. Integrated simulation and gaming architecture for incident management training. In: Kuhl, M.E., Steiger, N.M., Armstrong, F.B., Joines, J.A., (Eds.), Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, December 4–7, pp. 904–913; available online at: www.informs-sim.org/wsc05papers/106.pdf.

Kaminka, G.A., Veloso, M.M., Schaffer, S., Sollitto, C., Adobbati, R., Marshall, A.N., Scholer, A., Tejada, S., 2002. GameBots: a flexible test bed for multiagent team research. Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on Game Engines in Scientific Research 45 (1), 43–45.

Lake R, Disch L, 1992. “Structural constraints and pluralist contradictions in hazardous waste regulation”, Environment and Planning A 24: 663–681.

Latta, J. N. & Oberg, D. J. A conceptual virtual reality model, IEEE Computer Graphics & Applications, pp. 23-29, Jan., 1994.

Louka, M.N., Balducelli, C., 2001. Virtual reality tools for emergency operation support and training. Proceedings of The International Emergency Management Society (TIEMS) 2001, Oslo, June; available online at: <http://www2.hrp.no/vr/publications/tiems2001.pdf>.

Szoke I, Louka MN, Bryntesen TR, Bratteli J, Ed- " vardsen ST, Rø-Eitheim KK, Bodor K. . 2014, Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments. J Radiol Prot; 34(2):389–416. Available from: <http://iopscience.iop.org/0952-4746/34/2/389/>

Machado, L.S. (2003) “A realidade virtual no modelamento e simulação de procedimentos invasivos em oncologia pediátrica: um estudo de caso no transplante de medula óssea”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP

Mól, A.C.A., Jorge, C.A.F., Couto, P.M., Augusto, S.C., Cunha, G.G., Landau, L., 2009a. Virtual environments simulation for dose assessment in nuclear plants. *Progress in Nuclear Energy* 51 (2), 382-387.

NEA, 1999. Geological disposal of radioactive waste: Review of the development in the last decade. Paris: OECD publication No. 51101, p. 10.

Nystad, E., Drøivoldsmo, A., Sebok, A., 2002. Use of radiation maps in a virtual training environment for NPP field operators, Halden Work Report HWR-681.decommissioning. *Proceedings of the International Conference on Safe Decommissioning for Nuclear*

Ohga, Y., Fukuda, M., Shibata, K., Kawakami, T., Matsuzaki, T., 2004. A system for calculation and visualization of radiation fields for maintenance support in nuclear power plants. 10th International Conference on Radiation Shielding and 13th Topical Meeting on Radiation Protection and Shielding (ICRS 10/RPS 2004), Funchal, Madeira Island (Portugal), May 9–14.

Ohga, Y., Fukuda, M., Shibata, K., Kawakami, T., Matsuzaki, T., 2005. A system for the calculation and visualisation of radiation field for maintenance support in nuclear power plants. *Radiation Protection Dosimetry* 116 (1–4), 592–596.

Oliveira, J. C.; Shen X, Georganas N.D. (2000) Collaborative Virtual Environment for Industrial Training and e-Commerce. In: *Workshop on Application of Virtual Reality Technologies for Future Telecommunication Systems*. IEEE Globecom’2000 Conference. Proceedings. San Francisco.

Parkin, B. (1999). *The Human Sphere of Perception and Large-Scale Visualization Techniques*. Conference Guide of the 1999 High Performance Visualization and Computing Summit Oil & Gas, Silicon Graphics, 15.

Rindahl, G., Johnsen, T., Øwre, F., Iguchi., Y., 2002. Virtual reality technology and nuclear

Vermeersch, F., Van Bosstraeten, C., 1998. Development of the VISIPLAN ALARA planning tool. *Proceedings of the International Conference on Topical issues in Nuclear Radiation and Radioactive Waste Safety*, Vienna, Austria, August 31 to September 04; available online at: www.visiplan.be/literature/iaea_2.pdf.

SCHMIDT, L.; HORTA, A.; OLIVEIRA, C.; PEREIRA, S. Public Discourse on Nuclear Energy before and after Fukushima. Report for Task Agreement. Unpublished report for EFDA: WP12-SER-ACIF-1 by Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa, 2013

Sjöberg, L. (2003). Attitudes and risk perceptions of stakeholders in a nuclear waste siting issue. *Risk Analysis*, 23, 739–749.

Swartout, W., van Lent, M., 2003. Making a game of system design. *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on A Game Experience in Every Application* 46 (7), 32–39.

Tsang, M., Fitzmaurice, G., Kurtenbach, G., Khan, A., 2003. Game-like navigation and responsiveness in non-game applications. *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on A Game Experience in Every Application* 46 (7), 56–61.

Turunen, M. Error Handling in Speech User Interfaces in the Context of Virtual Worlds, http://www.cs.uta.fi/~mturunen/error_handling/error_handling.html (Janeiro), 2002.

Vabø R, Piotrowski L, Rindahl G. 3D representation of radioisotopic dose rates within nuclear plants for improved radioprotection and plant safety. *Nucl Saf Simul.* 2010;1(2):127–133. Available from: <http://www.ijnsweb.com/?type=subscriber&action=download&file=final&ext=pdf&id=15>