

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**VICTOR GONÇALVES GLORIA FREITAS**

**DETERMINAÇÃO DE DOSE DE RADIAÇÃO, EM TEMPO REAL, ATRAVÉS  
DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E REALIDADE VIRTUAL**

**Rio de Janeiro  
2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**VICTOR GONÇALVES GLORIA FREITAS**

**DETERMINAÇÃO DE DOSE DE RADIAÇÃO, EM TEMPO REAL, ATRAVÉS  
DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E REALIDADE VIRTUAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear - Profissional em Engenharia de Reatores

Orientadores: Prof. Dr. Antônio Carlos de Abreu Mol  
Prof. Dr. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Rio de Janeiro  
2009

GONÇ Gonçalves Gloria Freitas, Victor.

Determinação de Dose De Radiação, em Tempo Real, Através de Inteligência Artificial e Realidade Virtual / Victor Gonçalves Gloria Freitas – Rio de Janeiro: CNEN/ IEN, 2009.

81f.

Orientadores: Antônio Carlos de Abreu Mol e Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2009.

1. Inteligência Artificial. 2. Realidade Virtual.

DETERMINAÇÃO DE DOSE DE RADIAÇÃO, EM TEMPO REAL, ATRAVÉS  
DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E REALIDADE VIRTUAL

Victor Gonçalves Gloria Freitas

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

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Antônio Carlos de Abreu Mol, D.Sc.

---

Prof.Dr. Cláudio Marcio do Nascimento Abreu Pereira,D.Sc.

---

Prof.Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

---

Dra. Camila Silva de Magalhães, D Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JULHO DE 2009

*Em Memória de minha amada mãe.  
Dedicada ao meu pai, irmã e minha querida namorada.*

## AGRADECIMENTOS

*Aos meus orientadores e amigos, Antônio Carlos de Abreu Mol e Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, pelo apoio e contribuição no desenvolvimento de todo trabalho.*

*Ao meu grande amigo Rafael Gomes da Costa que sempre esteve disposto a acertar e errar junto comigo ao longo do curso.*

*Ao Pedro Couto Mol, pelas contribuições relativas ao núcleo de jogo Unreal Engine.*

*À Comissão Nacional de Energia Nuclear, que através do Instituto de Engenharia Nuclear, proporcionou todo o apoio necessário para a conclusão desta dissertação de mestrado.*

*Aos operadores do reator Argonauta Francisco José Oliveira Ferreira, Marco Aurélio Monteiro Dutra e André Luis Nunes Barbosa que sempre estiveram disponíveis quando preciso.*

Resumo da Dissertação apresentada ao IEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

## DETERMINAÇÃO DE DOSE DE RADIAÇÃO, EM TEMPO REAL, ATRAVÉS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E REALIDADE VIRTUAL

Victor Gonçalves Gloria Freitas  
Julho/2009

Orientadores: Antônio Carlos de Abreu Mol  
Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Nos últimos anos foram desenvolvidos trabalhos nos quais criou-se um modelo virtual do reator de pesquisa Argonauta, localizado no instituto de Engenharia Nuclear (Brasil), chamado Argonauta Virtual (AV). O AV é um modelo tridimensional onde personagens virtuais (avatares) podem transitar e interagir. Nele é possível fazer simulações de fontes nucleares e doses de radiação. No trabalho mais recente, um sistema de monitoramento em tempo real foi desenvolvido a fim de disponibilizar (através de Ethernet TCP/IP) informações dos detectores de área situados no salão do reator.

Estendendo o uso do AV, esse trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema capaz de determinar a dose de radiação no interior do salão do reator para uma dada posição, sob determinada condição operacional. Para tal, um módulo baseado em redes neurais artificiais (RNA) foi desenvolvido e treinado a partir de um conjunto de medidas realizadas no interior do salão do reator. Usando como entrada: i) posição do avatar, ii) Potência do reator e iii) dados de detectores fixados na instalação física, a RNA é capaz de prever a dose de radiação recebida. A função interpoladora, gerada a partir da RNA, foi inserida nesse ambiente virtual, possibilitando assim a visualização do perfil das radiações e com isso o treinamento de pessoas e funcionários sem expô-los aos seus efeitos. Os resultados obtidos demonstraram o perfil contínuo da radiação e sua inserção em ambiente virtual fazendo com que a medição da dose absorvida pelo personagem se tornasse mais precisa em relação à sua posição.



Abstract of Dissertation presented to IEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## REAL TIME DETERMINATION OF DOSE RADIATION THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND VIRTUAL REALITY

Victor Gonçalves Glória Freitas  
July/ 2009

Advisors: Antônio Carlos de Abreu Mol  
Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

In the last years, a virtual environment of Argonauta research reactor, sited in the Instituto de Engenharia Nuclear (Brazil), has been developed. Such environment, called here Argonauta Virtual (AV), is a 3D model of the reactor hall, in which virtual people (avatar) can navigate. In AV, simulations of nuclear sources and doses are possible. In a recent work, a real time monitoring system (RTMS) was developed to provide (by means of Ethernet TCP/IP) the information of area detectors situated in the reactor hall.

Extending the scope of AV, this work is intended to provide a continuous determination of gamma radiation dose in the reactor hall, based in several monitored parameters. To accomplish that a module based in artificial neural network (ANN) was developed. The ANN module is able to predict gamma radiation doses using as inputs: i) the avatar position (from virtual environment), ii) the reactor power (from RTMS) and iii) information of fixed area detectors (from RTMS).

The ANN training data has been obtained by measurements of gamma radiation doses in a mesh of points, with previously defined positions, for different power levels.

Through the use of ANN it is possible to estimate, in real time, the dose received by a person at any position in Argonauta reactor hall. Such approach allows tasks simulations and training of people inside the AV system, without exposing them to radiation effects.

# ÍNDICE

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	iii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Estado da arte.....	2
1.1.1. Mesa de Controle Virtual para Treinamento de Operadores.....	4
1.1.2. Sistema de evacuação LabRV.....	4
1.1.3. Sistema VRDose.....	5
1.1.4. Sistema de realidade virtual do projeto CIPRES.....	6
1.1.5. Sistema de estimativa de dose em ambientes virtuais.....	6
1.2. Objetivo.....	7
<b>2. Radioatividade e Radioproteção.....</b>	<b>9</b>
2.1. Radioatividade.....	9
2.1.1. Radiações ionizantes.....	9
2.1.2. Interação da radiação com a matéria.....	11
2.2. Radioproteção.....	12
2.2.1. Princípios de proteção radiológica.....	13
2.2.2. Blindagem radioativa.....	13
2.2.3. Dosimetria.....	14
2.2.4. Detectores de Radiação/Detectores Geiger-Müller.....	14
<b>3. Realidade virtual.....</b>	<b>16</b>
3.1. Realidade virtual.....	16
3.2. Ambientes virtuais.....	17
3.3. Núcleos de jogos.....	19
3.4. Avatar.....	19
3.5. O núcleo de jogo Unreal Engine.....	21
3.6. LabRV - Laboratório de Realidade Virtual.....	24
<b>4. Redes Neurais Artificiais.....</b>	<b>28</b>
4.1. Redes de Funções de Base Radiais (RBF) .....	31
4.2. Arquitetura regressora GRNN.....	33
<b>5. Metodologia.....</b>	<b>36</b>
5.1. Determinação de Dose.....	36
5.1.1. Aquisição de dados.....	37
5.1.2. Monitoramento de área em tempo real.....	37
5.1.3. Interpolação por RNA.....	38

5.2. Modelagem virtual do ambiente / Inserção do código da RNA.....	39
5.2.1. Modelagem virtual através do Unreal Engine.....	39
5.2.2. Monitores de área em rede com o unreal Engine.....	40
5.2.3. Inserção da RNA treinada no ambiente virtual.....	41
<b>6. Aplicação da metodologia – Estudo de caso: Reator Argonauta do IEN.....</b>	<b>42</b>
6.1. Descrição do reator Argonauta.....	43
6.2. Aquisição de dados nas instalações do IEN.....	44
6.3. Interpolação das medidas de radiação gama por RNA.....	53
6.4. Geração do código da RNA dos dados do salão do Reator.....	54
6.5. Monitores de radiação de área 7027(MRA 7027).....	56
6.6. MRA 7027 em rede com Unreal Engine.....	57
6.7. Inserção do código da RNA no Unreal.....	59
6.8. Resultados.....	61
6.8.1. Resultados da determinação de dose.....	61
6.8.2. Resultados da inserção do código no Unreal.....	75
<b>7. Conclusão e trabalhos futuros.....</b>	<b>76</b>
7.1. Conclusão.....	76
7.2. Trabalhos futuros.....	77
<b>8. Referências bibliográficas.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação.....	13
Figura 2.2 – Detector Geiger-Müller.....	15
Figura 3.1 – Editor UnrealEd editando modelo do reator Argonauta.....	22
Figura 3.2 – Projetores de tecnologia DLP.....	26
Figura 3.3 – Óculos com lentes polarizadoras.....	27
Figura 3.4 – Tela de projeção do LabRV .....	27
Figura 4.1 – Neurônio artificial.....	30
Figura 4.2 – Rede RBF típica com uma camada intermediária.....	31
Figura 4.3 – Diagrama de uma rede GRNN.....	34
Figura 5.1 – Começo da programação da classe RVAICentro.....	42
Figura 6.1 – Reator Argonauta – IEN/CNEN.....	45
Figura 6.2 – Área 0 (hachurada) na planta do salão do reator.....	46
Figura 6.3 – Área 1(hachurada) na planta do salão do reator.....	47
Figura 6.4 – Área 2(hachurada) na planta do salão do reator.....	47
Figura 6.5 – Área 3(hachurada) na planta do salão do reator.....	48
Figura 6.6 – Representação da malha traçada na área 1.....	49
Figura 6.7 – Representação da malha traçada na área 2 .....	50
Figura 6.8 – Representação da malha traçada na área 3 .....	51
Figura 6.9 – MRA 7027 com sonda Geiger-Müller.....	57
Figura 6.10 – Ilustração da localização do MRA dentro do salão.....	58
Figura 6.11 – Esquema de comunicação entre MRA e Unreal.....	60
Figura 6.12 – Mapa de classes.....	61
Figura 6.13 – Mostra eixo cartesiano, o canal J9, e linhas de y.....	63
Figura 6.14 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 34 w. ....	64
Figura 6.15 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 85 w.....	64
Figura 6.16 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 170 w.....	65
Figura 6.17 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 255 w.....	65
Figura 6.18 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 340 w.....	66
Figura 6.19 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 34 w.....	68
Figura 6.20 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 85 w.....	68
Figura 6.21 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 170 w.....	69
Figura 6.22 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 255 w.....	69
Figura 6.23 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 340 w.....	70
Figura 6.24 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 34 w.....	71

Figura 6.25 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 85 w.....	72
Figura 6.26 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 170 w.....	72
Figura 6.27 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 255 w.....	73
Figura 6.28 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 340 w.....	73
Figura 6.27 – Janela de visualização(HUD), no Unreal, com a dose gama recebida acumulada ao logo do espaço e tempo.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites ocupacionais de dose.....	14
Tabela 6.1 – Parte dos dados referente à malha da área um no salão do reator.....	52
Tabela 6.2 – Parte dos dados referente à área dois no salão do reator.....	53
Tabela 6.3 – Dados referentes à área três no salão do reator.....	54
Tabela 6.4 – Aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento..	67
Tabela 6.5 – Aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento..	70
Tabela 6.6 – Aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento..	74

## Capítulo 1

### Introdução

Durante os últimos anos a preocupação com a segurança em instalações nucleares tem crescido consideravelmente e com isso o aumento de procedimentos e normas que visam preservar a integridade física das pessoas e instalações. Particularmente, para instalações radioativas, existem determinadas situações de trabalho nas quais o ser humano pode ficar exposto à radiação. Como a exposição à radiação representa um risco para a saúde, algumas normas devem ser seguidas. O princípio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) (ICRP Publication 60, 1990), ou seja, quando for necessária a exposição à radiação, esta deve ser tão baixa quanto razoavelmente exeqüível é uma importante norma para a garantia da minimização da dose e a observância dos limites seguros estabelecidos para dose de radiação (ICRP Publication 60, 1990) garante o recebimento não nocivo.

Uma das radiações mais nocivas é a Gama, ondas eletromagnéticas provenientes do núcleo dos átomos. Essas ondas são formadas na reestruturação energética neutrônica, e por sua energia e poder de penetração, são as ondas mais prejudiciais aos seres vivos em geral, principalmente pela dificuldade relativa de sua blindagem. Os raios gamas, também assim chamados, queimam e modificam células vivas dando origem a nódulos cancerígenos. Por esse, entre outros motivos, conhecer, estipular e medir a dose gama recebida por uma pessoa é de suma importância hoje para nossa sociedade. Dependendo da dose absorvida, as conseqüências podem variar de sintomas como náuseas e vômitos até a morte da pessoa (PASTURA, 2003).

Existem áreas, definidas como controladas, que apresentam níveis de radiação altos, por isso o controle e monitoração em tais áreas é intenso e rigoroso. Em algumas áreas os trabalhadores não podem estar presentes quando uma intervenção humana é necessária ou, se necessária, devem permanecer o mínimo de tempo, para que a dose permaneça dentro de limites aceitáveis estabelecidos pela norma CNEN-NN-3.01. Como exemplo, uma pessoa pode entrar em uma área controlada para realizar uma tarefa e logo que o nível de radiação se aproximar dos limites aceitáveis, ele deve imediatamente deixar a área, com a tarefa cumprida ou não, podendo ser substituído por outra pessoa caso a tarefa não tenha sido concluída. Um método para minimizar a dose individual é dividir uma tarefa de execução seqüencial entre um grupo de pessoas, de forma que a dose que seria recebida para um único indivíduo seja dividida entre um grupo de pessoas, cada uma recebendo uma fração da dose total. Em situações onde é necessária a exposição a uma alta dose em um curto espaço de tempo, o trabalhador é afastado por um longo período de atividades que venham a expô-lo à radiação, sendo este período de acordo com a dose recebida. Uma medida comum para o controle e monitoração neste caso é o uso de equipamentos de monitoração instantânea dos níveis de radiação.

Também, devido à gravidade da questão, são de grande utilidade métodos e técnicas que permitam estimar a dose de radiação absorvida por um indivíduo cuja ocupação o expõe à radiação.

Sendo assim 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. Neste contexto, treinamentos por meio de



simulações por computador, das atividades de trabalhadores podem trazer 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 treinos, não apresentando nenhum risco para a saúde dos mesmos; (iii) contribui para um melhor planejamento das atividades nestas áreas, medindo as doses recebidas e conseqüentemente 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, etc. (AUGUSTO, *et al*, 2007 e MÓL *et al.*, 2009).

Uma forma de realizar simulações por computador é através do uso da Realidade Virtual(RV) permitindo assim a visualização do ambiente através de uma representação com gráficos tridimensionais, e com uma perspectiva de visualização em primeira pessoa, ou seja, como se o usuário estivesse “dentro” do ambiente.

### **1.1 Trabalhos Relacionados**

Nos últimos anos diversos artigos apresentaram o uso da RV para treinamento e simulação de procedimentos, Dentre eles pode-se citar: Mesa de Controle Virtual Para Treinamento de Operadores (AGHINA *et al.*, 2008), Sistema de Realidade Virtual para Treinamento de Evacuação desenvolvido pelo IEN (Mól *et al*, 2008), o Sistema VRdose, desenvolvido pelo Halden Virtual Reality Centre (Halden Virtual Reality Centre, 2009), o Sistema de Realidade Virtual do

projeto CIPRES (RÓDENAS *et al.*, 2005), e o Sistema para Medição de Dose desenvolvido no IEN (MÓL *et al.*, 2009).

### **1.1.1 Mesa de Controle Virtual para Treinamento de Operadores**

O sistema desenvolvido por Aghina *et al.*, (2008), utiliza tecnologias de Realidade Virtual para desenvolver uma mesa de controle virtual de um simulador “*full scope*” de um reator nuclear de água pressurizada. O uso desta mesa de controle virtual serve para auxiliar o treinamento de operadores de plantas nucleares para geração de energia elétrica. A mesa de controle virtual se comunica com um simulador de uma planta nuclear baseada em reator de água pressurizada (PWR), localizado no Laboratório de Interfaces Homem Sistema no Instituto de Engenharia Nuclear (LABIHS), via protocolo TCP/IP. Os resultados apresentados demonstraram que a mesa de controle virtual desenvolvida atendeu as expectativas, especificamente para treinamento em operação,

### **1.1.2 Sistema de Realidade Virtual para Treinamento de Evacuação**

O sistema de evacuação desenvolvido por Mol *et. al.*,(2008) utilizou o núcleo de jogo do Unreal Engine 2 Runtime, para criar uma ferramenta para treinamento e simulação de evacuação de sítios com grande aglomeração de pessoas. Para este fim, foram implementadas modificações no núcleo de jogo, de modo a tornar a simulação mais realista. Entre as modificações feitas no jogo encontram-se a velocidade de locomoção do avatar e o cilindro de colisão

(cilindro que define o espaço possível entre as pessoas virtuais), que foram alteradas a fim de tornar-se mais próxima aos padrões humanos. As plantas de instalações são reproduzidas no editor de cenários UnrealEd para a criação de um cenário mais realístico. Testes realizados em rede de computadores, onde as pessoas virtuais (avatars) foram controlados por diferentes usuários da rede interagindo entre si, demonstraram que a ferramenta pode ser usada para treinamento prévio de evacuação.

### **1.1.3 Sistema VRDose**

O sistema VRdose (Halden Virtual Reality Centre, 2008) foi desenvolvido para utilização no descomissionamento da central nuclear em Fugen Tsuruga, Japão. O foco principal da VRdose é a elaboração de um plano de trabalho levando em consideração a visualização da radiação e as estimativas destas doses. Ao visualizar a dose de radiação, o VRdose permite aos seus utilizadores a rápida avaliação da situação, a fim de proporcionar uma melhor compreensão da mesma. Porém, o sistema VRdose não funciona em tempo real, tendo sua dose fixa mesmo com características locais variadas.

#### **1.1.4 Sistema de Realidade Virtual do Projeto CIPRES**

O sistema apresentado por RÓDENAS, *et al.* (2004), utilizado no programa de treinamento do projeto CIPRES, foi desenvolvido com o objetivo de reduzir as doses recebidas pelos trabalhadores e procura a minimizar o tempo das operações. Ele permite o treino dos operadores em instalações nucleares simulando operações de recarga de combustível. O sistema também informa, durante a simulação, tanto a dose acumulada como a dose instantânea

#### **1.1.5 Sistema de Estimativa de Dose em Ambientes Virtuais.**

O sistema apresentado por Mol *et al.* (2009), utiliza tecnologias de Realidade Virtual para desenvolver uma ferramenta para construção de ambientes virtuais de modo a reproduzir instalações nucleares com suas respectivas áreas quentes, permitindo que o usuário navegue virtualmente nesta instalação, contabilizando a dose de radiação recebida.

Para cumprir os objetivos propostos, foi proposta uma metodologia para a modificação e adaptação do núcleo de jogo livre Unreal Engine 2 Runtime. Esta metodologia foi utilizada com sucesso, adaptando-o na ferramenta desejada, onde o usuário navega virtualmente na instalação através de um avatar, enquanto simula a contagem de dose de radiação. A flexibilidade de diversos aspectos do núcleo, especialmente através da programação na linguagem de script UnrealScript, demonstrou que o Unreal possui um grande potencial para simulações. Também foi verificado que a ferramenta de modelagem de cenários UnrealEd mostrou-se adequada e de fácil aprendizado e uso para a

reprodução de uma instalação relativamente simples, como a da sala do reator Argonauta.

Entretanto, este trabalho apresenta algumas limitações, entre elas: (a) a taxa de dose para cada grade (áreas pré-definidas como taxa constante) era obtida de forma off-line pelo departamento de proteção radiológica; (b) As taxas de dose, medidas pontualmente, foram atribuídas a grandes áreas, diferenciando da realidade.

## **1.2 Objetivo**

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de predição de doses de radiação para um ambiente virtual baseado em instalação sujeita a radiação, de tal forma que toda a informação de dose do ambiente real seja inserida no ambiente virtual em tempo real. Para este fim, foi dada continuidade ao trabalho apresentado por Mol *et al* (2009), com monitoramento e predição em tempo real sendo realizados e inseridos no ambiente virtual. Para efeito de demonstração foi escolhido o interior do salão do reator argonauta localizado no Instituto de Engenharia Nuclear. Com esse intuito, é proposta toda uma metodologia de aquisição de dados, interpolação e inserção em ambiente virtual que pode ser usada em outras instalações radioativas e não só para instalações nucleares.

Por ordem de capítulos veremos, no Capítulo 2, alguns conceitos básicos sobre radioatividade e a teoria de radioproteção. No Capítulo 3, serão apresentados estudos sobre realidade virtual e ambientes virtuais. No Capítulo 4, será apresentada a teoria base de redes neurais artificiais usadas, redes RBFs e a

técnica GRNN. No Capítulo 5, veremos toda metodologia proposta nesta dissertação. No Capítulo 6, veremos uma aplicação do método desenvolvido, faremos a estimativa de dose gama no interior do salão do reator da instalação nuclear do IEN, para isso veremos o projeto e especificações do reator nuclear argonauta, fazendo uma avaliação qualitativa e quantitativa desse modelo testando-o e apresentando seus resultados. No Capítulo 7, apresentaremos as principais conclusões tiradas do trabalho, assim como, propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Radioatividade e Radioproteção

#### 2.1 Radioatividade

A radioatividade ou radiatividade 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 (WIKIPEDIA, 2009).

##### 2.1.1 Radiação Ionizante

As radiações são chamadas de ionizantes pela capacidade de geração de íons, ou seja, a radiação tem energia suficiente para ionizar átomos, transformando-os em partículas carregadas eletricamente e instáveis.

Tipos de Radiação:

#### 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 nº atômico diminui 2 unidades.

#### 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. 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.

#### 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, sendo esse tipo de radiação um dos principais focos de estudo do trabalho aqui apresentado.



### **2.1.2 Interação da Radiação com a Matéria**

Os diferentes tipos de radiação interagem de maneiras diferentes tanto com a matéria orgânica quanto, com a não orgânica. Contudo todas elas têm uma característica em comum que é a de excitar os átomos, podendo ou não, ionizá-los.

### **2.2 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 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 ou de longa duração, mesmo que a dose de radiação seja baixa. Para evitar 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 ocorre vazamento de material radioativo, visando minimizar os efeitos nocivos para a saúde do ser humano e o meio ambiente (PASTURA, V., 2003).

### **2.2.1 Princípios de proteção radiológica**

Alguns princípios de proteção radiológica devem ser seguidos para tornar mais seguras as práticas envolvendo radiações ionizantes, nos quais deve predominar a relação custo-benefício de acordo com as normas da CNEN (Augusto, 2007; MÓL *et al.*, 2009 ; ICRP Publication 60, 1990):

Princípio da justificação – Qualquer atividade envolvendo radiações ionizantes ou exposição às radiações deve ser justificada em relação às outras alternativas e trazer um benefício líquido para a sociedade.

Princípio da otimização ou ALARA (As Low As Reasonably Achievable) – Qualquer exposição à radiação ionizante deve ser mantida tão baixa quanto razoavelmente exeqüível, levando-se em conta os recursos sócio-econômicos disponíveis.

Princípio da limitação da dose individual – As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem ultrapassar os limites de dose equivalente definidos na norma CNEN - NN 3.01.

### 2.2.2 Blindagem de Radiações

As pessoas que trabalham com fonte ou geradores de radiação ionizante devem dispor de procedimentos técnicos bem elaborados de modo que o objetivo da tarefa seja concretizado e sua segurança esteja garantida contra exposições desnecessárias ou acidentais. Nesses procedimentos, os fatores tempo e distância em relação às fontes radioativas estão implícitos na habilidade e destreza de um técnico bem treinado para a tarefa. Quando se opera com fontes intensas é necessário mais que apenas tempo e distância. Logo introduzimos a noção de blindagem radiativa. As diferentes formas de radiação e sua forma de blindá-las estão na Figura 2.1

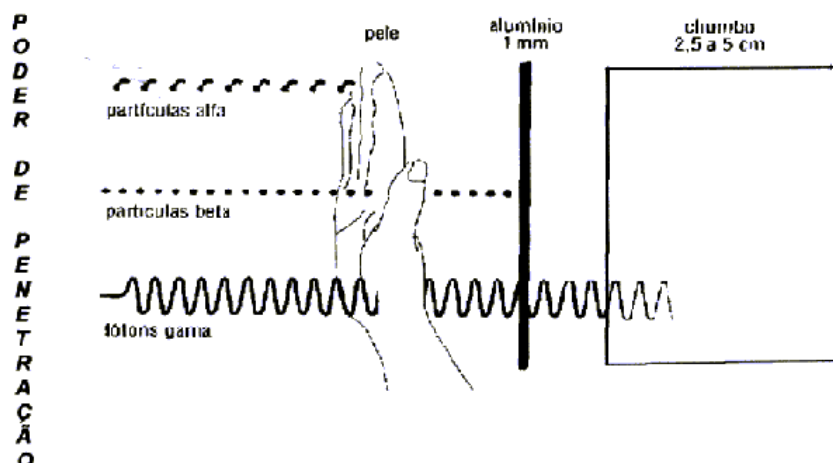


Figura 2.1 – Poder de penetração dos diferentes tipos de radiação

### 2.2.3 Dosimetria

Dosimetria radioativa é o cálculo da dose absorvida na matéria, resultante da exposição à radiação ionizante. A dose é informada em gray (Gy) para material ou sieverts (Sv) para tecidos orgânicos, onde um Gy ou um Sv é igual a um

joule por quilograma. Unidades não baseadas no Sistema Internacional de Medidas também ainda prevalecem, onde a dose é freqüentemente informada em rads e a dose equivalente é informada em rems. Por definição, um Gy é igual a cem rad e um Sv é igual a cem rem. As normas de dosimetria definem regras quanto aos limites aceitáveis de radiação para o meio ambiente e os seres vivos (Tabela 2.1). Através do uso de detectores de radiação e dosímetros individuais, é possível monitorar os níveis de radiação presentes em ambientes e as doses de radiação absorvidas por indivíduos, colaborando para a avaliação e desenvolvimento de procedimentos operacionais como objetivo de minimizar a exposição à radiação.

Tabela 2.1 – Limites ocupacionais de dose

<b>Exposição ocupacional e indivíduos do público</b>			
	<b>Antes da portaria</b>	<b>Atualmente</b>	<b>Cálculos de barreiras Atualmente</b>
<b>Área Controlada</b>	50 mSv/ano (2,5 mR/h)	20 mSv (média de 5anos)	5 mSv/ano (0,25 mR/h)
<b>Área Livre</b>	1 mSv/ano (0,05 mR/h)	1 mSv/ano	0,5 mSv/ano (0,025 mR/h)

## **2.2.4 Detectores de Radiação**

Detector de radiação é um dispositivo que, colocado em um meio onde exista um campo de radiação, seja capaz de indicar a sua presença. Existem diversos processos pelos quais diferentes radiações podem interagir com o meio material utilizado para medir ou indicar características dessas radiações. Entre esses processos os mais utilizados são os que envolvem geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilização de películas fotográficas, a criação de traços no material, a geração de calor e alteração da dinâmica de certos

processos químicos. Normalmente um detector de radiação é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação.

### Detectores Geiger-Müller

Os detectores Geiger-Müller, Figura 2.2, foram introduzidos em 1928 e em função de sua simplicidade, baixo custo, facilidade de operação e manutenção, são utilizados até hoje. Em função de sua característica de um pulso de saída de igual amplitude, independentemente do número de íons iniciais, o detector G-M funciona como um contador, não sendo capaz de discriminar energias. Para a contagem de partículas carregadas, a maior dificuldade é causada pela sua absorção nas paredes do detector. Por esse motivo, são feitas janelas de material leve e fino, que permitam que elétrons e partículas alfa penetrem no volume sensível do detector. Os detectores G-M podem ser usados para estimar grandezas como dose de exposição, utilizando artifícios instrumentação e metrologia. Nesse caso são normalmente calibrados para uma energia determinada e os valores dessas grandezas são calculados através da fluência (PASTURA, V., 2003).



Figura 2.2 - Detector Geiger-Müller

## Capítulo 3

### Realidade virtual

#### 3.1 Realidade Virtual

Realidade Virtual (RV) é um termo usado para descrever um conjunto de tecnologias, técnicas e métodos de interfaces avançadas capazes de permitir duas importantes características: (i) a integração sensitiva entre o usuário e um sistema computacional e (ii) a imersão no ambiente virtual (Burdea and Philippe, 1994).

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 (AUGUSTO, *et al*, 2007). 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 . Em geral, refere-se a uma experiência imersiva e interativa baseada em imagens gráficas tridimensionais geradas pelo sistema computacional. A Realidade Virtual também pode ser caracterizada pela coexistência integrada de três idéias 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. A Realidade Virtual começou na indústria de simulação após a Segunda Guerra Mundial, quando a Força Aérea dos Estados Unidos deu início à construção de simuladores de voo. Hoje, a Realidade Virtual é aplicada nas mais diferentes áreas do conhecimento humano, podendo atingir representações próximas da realidade. É considerada uma tecnologia com grande potencial e aplicabilidade em diversas áreas da engenharia para visualização, treinamento (Francis e Tan, 1999), estudos ergonômicos, simulações e experimentações virtuais, e a cada dia são descobertos novos empregos para essa técnica imersiva.

### **3.2 Ambientes Virtuais**

Ambientes virtuais são cenários reproduzidos em Realidade Virtual onde, através de um 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 (Stanney, Kay M., 2002).

Uma descrição dos procedimentos executados pelo sistema de simulação de um ambiente virtual apresentado por Augusto *et al.* (2007) 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.



### **3.3 Núcleos 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.

O núcleo de jogos tem provado ser uma boa alternativa para simulação (Lewis e Jacobson, 2002; Rosenbloom, 2003; Zyda, 2007; AUGUSTO *et al*, 2007; Trenholme e Smith, 2008). Ele tipicamente fornece os recursos mais necessários para a criação de uma simulação, 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.

### **3.4 – Avatar**

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. 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 do site, programa ou jogo. 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.

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 orientados para aplicações científicas e industriais, geralmente reproduzem cenários e personagens baseados no mundo real, como uma instalação industrial e trabalhadores típicos de tal instalação (AUGUSTO *et al*, 2007).

### 3.5 - O núcleo de jogo Unreal Engine

O programa de ambiente virtual escolhido para cumprir um dos o objetivos propostos nesta tese foi o Unreal Engine [Epic Games, Inc], um núcleo de jogo capaz de ser modificado para se adaptar às necessidades deste projeto (AUGUSTO, *et al*, 2007).

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 3.1), o programa de modelagem de cenários para o núcleo. O UnrealEd 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.
- 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. O código escrito 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. Podem-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.

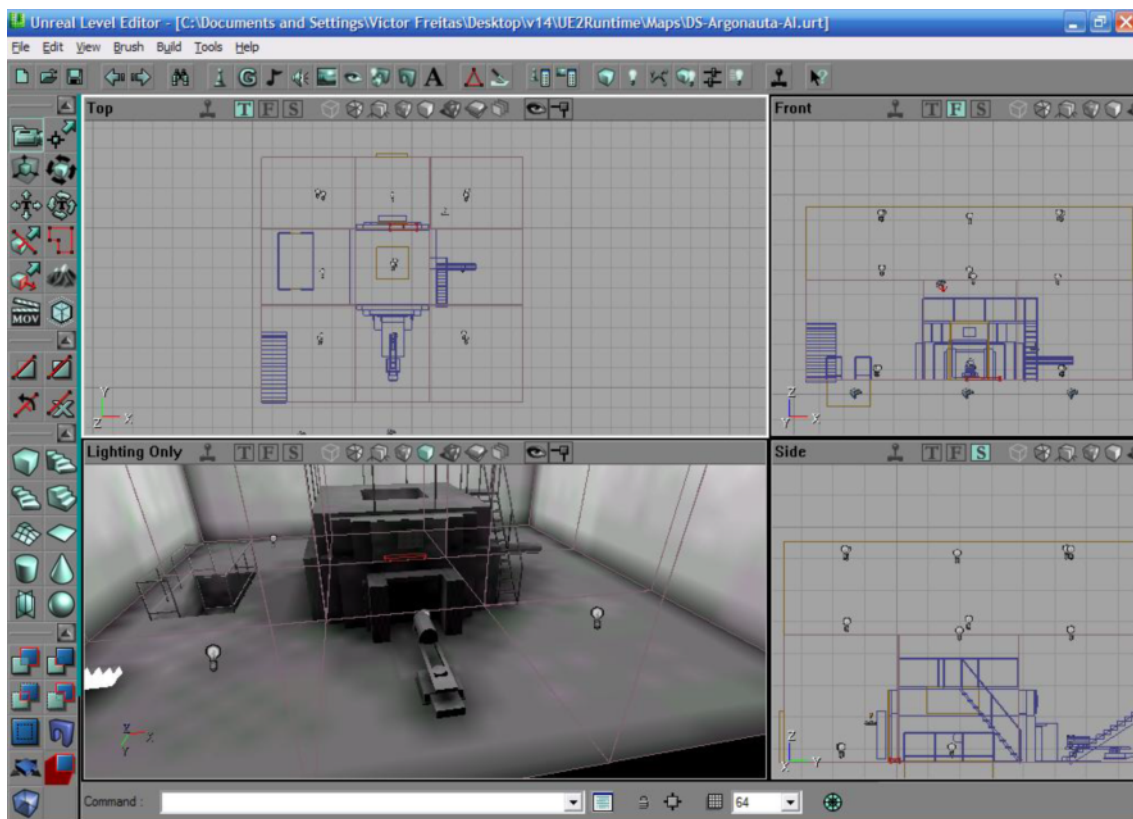


Figura 3.1 - Editor UnrealEd editando modelo do reator Argonauta.

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 de testes para novas técnicas ou mesmo pesquisas de mestrado ou doutorado. Além disso, a experiência ganha com o uso e desenvolvimento no Unreal Engine podem ser reaproveitados em outros sistemas de realidade virtual.

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, em 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 específicos, realiza as tarefas de baixo nível, como renderizar os gráficos, alocar memória, acessar arquivos, 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, a desenvolvedora do Unreal Engine, pois permite que hobbystas aprendam como funcionam diversas características do jogo e possa 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.

### **3.6 Laboratório de Realidade Virtual (LabRV)**

O Laboratório de Realidade Virtual do Instituto de Engenharia Nuclear, o primeiro em seu gênero na área nuclear brasileira, está sendo capacitado para realizar treinamentos, simulações e experimentações, relacionados à área nuclear utilizando um sistema de projeção baseado em estereoscopia, que permite a sensação de imersão em um ambiente virtual (MÓL *et al*, 2005).

O sistema de projeção utilizado no laboratório usa estereoscopia passiva de imagens polarizadas. Utilizam-se dois projetores com filtros polarizadores, cada um para gerar separadamente a imagem destinada a cada um dos olhos humanos, e óculos com lentes também polarizadoras, para que cada olho observe somente a imagem destinada a ele. A projeção é por trás da tela de exibição, para permitir que os usuários possam se aproximar da tela sem produzir sombras na projeção. Neste sistema são utilizados:

- Dois projetores de tecnologia DLP, Figura 3.2, para gerar separadamente as imagens destinadas a cada um dos olhos humanos;
- Dois filtros polarizadores, um para cada projetor, orientados em direções perpendiculares entre si (um na “orientação vertical” e outro na “orientação horizontal”);
- Um espelho, para refletir a imagem dos projetores em direção à tela, com o objetivo de diminuir o espaço necessário para a projeção atrás da tela, visto que há limitação na abertura das lentes dos projetores e o tamanho da imagem projetada é proporcional à distância entre os projetores e a tela;
- Uma tela de projeção anti-refrativa, Figura 3.4, que permite projeção por trás da tela e que mantém a polarização das imagens projetadas pelos projetores;
- Óculos com filtros polarizadores distintos para cada vista, Figura 3.3, também orientados perpendicularmente entre si que, combinados com os filtros nos projetores, fazem com que cada vista só consiga enxergar a imagem do projetor que utiliza o filtro orientado na mesma direção que o filtro utilizado na vista;

- Um sistema de som tipo “*home theater*” ligado à saída de áudio do computador, com cinco canais de áudio (frontal, frente-esquerda, frente-direita, trás-esquerda, trás-direita) e um canal para os sons graves;
- Um computador utilizando uma placa gráfica com duas saídas gera as imagens, uma para cada projetor;
- Um dispositivo de interface para navegação 3D (spaceball).

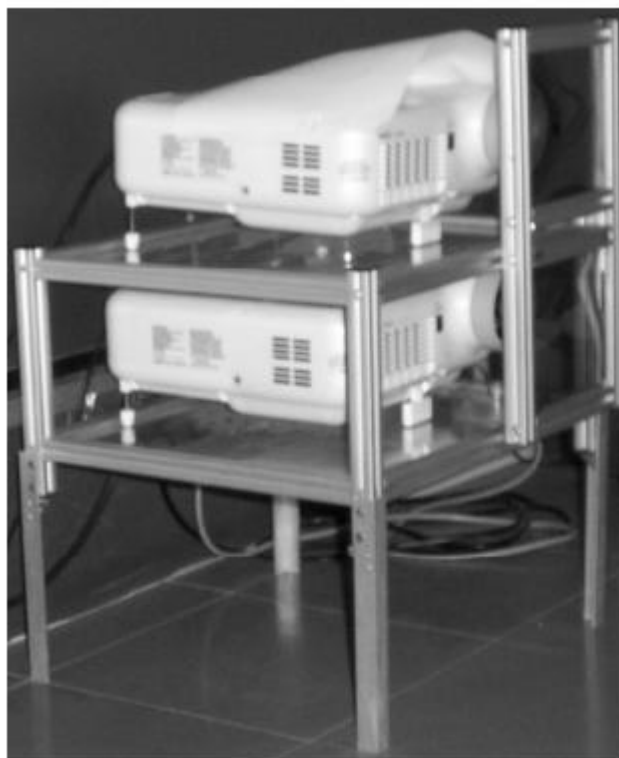


Figura 3.2 - Projetores de tecnologia DLP





Figura 3.3 - Óculos com lentes polarizadas.

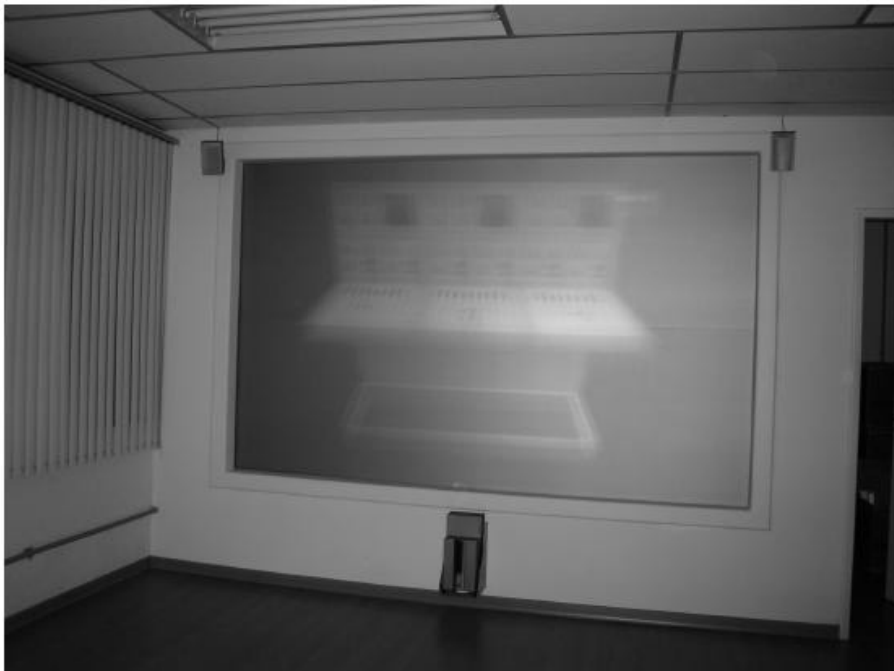


Figura 3.4 - Tela de projeção do LabRV

## Capítulo 4

### Redes Neurais Artificiais

Os primeiros estudos sobre redes neurais artificiais (RNAs) iniciaram na metade do século passado, onde surgiu o primeiro modelo artificial de um neurônio biológico, fruto do trabalho do psiquiatra e neuroanatomista Warren McCulloch e do matemático Walter Pitts em 1943. As redes neurais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura cerebral e que adquirem conhecimento através da experiência. Neste modelo, a saída do neurônio assume apenas os valores lógicos 1 ou 0, descrevendo a propriedade de “tudo ou nada” do modelo. Cerca de quinze anos após a publicação do trabalho de McCulloch e Pitts, uma nova abordagem para o problema de reconhecimento de padrões foi desenvolvida em 1958 e 1962 por Rosenblatt. Rosenblatt provou o teorema de aprendizado do *perceptron* usando uma aproximação estocástica. Mais tarde, Widrow e Hoff sugeriram uma regra de aprendizagem, conhecida como regra de Widrow-Hoff, ou regra delta, que é ainda hoje bastante utilizada. Esta por sua vez, é baseada no método do gradiente para minimização do erro na saída do neurônio com resposta linear. Após uns longos tempos adormecidos, os estudos sobre redes neurais retornaram, basicamente, em 1982, com o trabalho publicado por John Hopfield, ressaltando as propriedades associativas das RNAs. O principal resultado encontrado por Hopfield foi mostrar a relação entre as redes recorrentes auto-associativas e sistemas físicos, o que acabou abrindo espaço para a utilização de teorias correntes da Física para estudar

tais modelos. Outra publicação importante em 1982 foi o trabalho de Kohonen sobre os mapas auto-organizáveis, utilizando uma estrutura de redes unidimensional ou bidimensional. Não obstante, em 1986, Rumelhart descreveu o algoritmo de treinamento de retropropagação do erro (*back-propagation*). Rumelhart mostrou que as RNAs de múltiplas camadas são capazes de resolver problemas “difíceis de aprender”. A partir desse trabalho, houve uma explosão de interesse pelas RNAs na comunidade internacional, motivada também pelo avanço da tecnologia, particularmente a microeletrônica.

Uma RNA é composta por várias unidades de processamento cujo funcionamento é bastante simples. Esta unidade (neurônios artificiais) é geralmente conectada por canais de comunicação (sinapses) que são associados a determinados pesos. Os neurônios fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são as entradas recebidas pelas suas conexões. Como no caso da rede biológica, o comportamento “inteligente” de uma rede neural artificial vem das interações entre os neurônios da rede. Estas operações de um neurônio artificial podem ser resumidas da seguinte maneira:

- Sinais são apresentados nas entradas;
- Cada sinal é ponderado pela sinapse;
- É feita a soma dos sinais ponderados produzindo um nível de atividade;
- Em função do nível de atividade é produzida uma determinada resposta na saída.

Suponhamos que temos  $p$  sinais de entrada,  $x_1, \dots, x_p$  e sinapses  $w_1, \dots, w_p$ , como mostrado na Figura 4.1

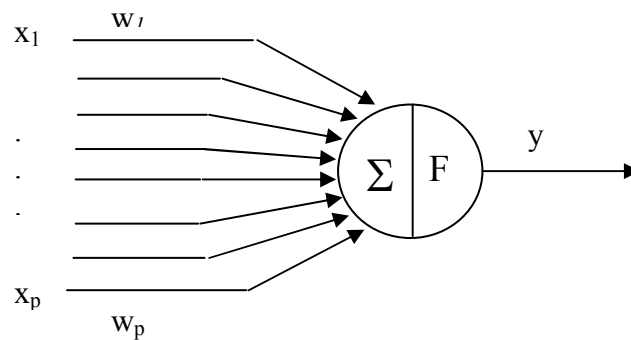


Figura 4.1 - Neurônio artificial

Assim temos:

$$a = \textit{atividade} = \sum_{n=1}^p (w_n \cdot x_n)$$

$y = \textit{saída} = F(a)$ ; onde  $F(.)$  é a função de ativação

As características específicas que configuram os modelos das RNAs dependem principalmente da arquitetura e da neurodinâmica explorada. A arquitetura define o arranjo dos neurônios e suas conexões, enquanto a neurodinâmica especifica basicamente as funções de ativação interna dos neurônios e o tipo de treinamento (Haykin, Simon, 2001).

## 4.1 Redes de Funções de Base Radial

Redes de Funções de Base Radial (*Radial Basis Function* – RBF), Figura 4.2, são RNAs que utilizam funções de base radial em seus neurônios da camada intermediária. Cada camada de uma rede RBF desempenha um papel específico para seu comportamento. A camada intermediária, cujos neurônios utilizam funções de base radial, separa os dados de entrada em grupamentos com características comuns. Esta camada transforma um conjunto de padrões de entradas não linearmente separáveis em um conjunto de saída linearmente separáveis. A camada de saída, procura classificar os padrões recebidos da camada anterior. Esta camada normalmente é do tipo Adaline, uma vez que seus padrões de entrada são linearmente separáveis.

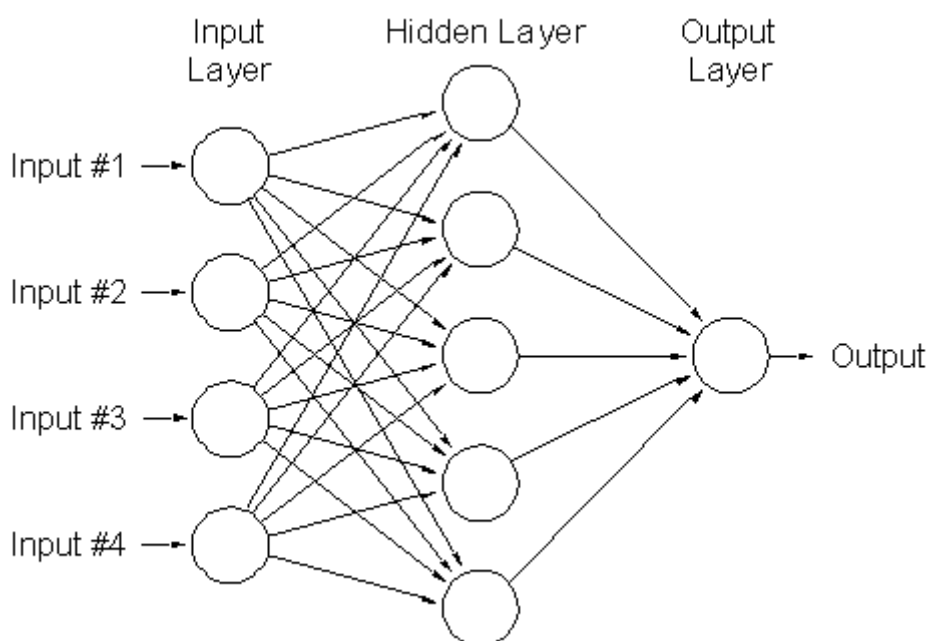


Figura 4.2 – Rede RBF típica com uma camada intermediária

## Rede RBF típica com uma camada intermediária

Funções de base radial representam uma classe especial de funções cujo valor diminui ou aumenta em relação a distância de um ponto central. Normalmente, uma função de base radial tem seu valor não negativo e alto em um determinado ponto  $\mu$  de seu domínio e decai até próximo de zero quando a distância do ponto  $x$  ao ponto central, dada pela norma  $\|x - \mu\|$ , aproxima-se do infinito. Diferentes funções de base radial têm sido utilizadas, as mais comuns são:

$$\text{Função gaussiana: } f(\omega) = e^{-\frac{1}{2} \frac{\omega^2}{\sigma^2}};$$

$$\text{Função multiquadrática: } f(\omega) = \sqrt{\omega^2 + \sigma^2};$$

onde  $\omega = \|x - \mu\|$ , que é dado geralmente pela distância euclidiana,  $x$  é o vetor de entrada, e  $\mu$  e  $\sigma$  representam o centro e a largura da função radial, respectivamente.

Desta forma, a distância euclidiana  $\omega = \|x - \mu\|$  do vetor de entrada  $x$  ao ponto central  $\mu$  serve de entrada para a função, que retorna o valor de ativação da unidade intermediária, e finalmente a resposta gerada por um neurônio  $j$  de saída é dada por:

$$y_j = \sum w_{ji} \cdot f(\omega)$$

O processo de aprendizagem, ao qual uma rede de base radial (RBR) é submetida, consiste em otimizar tanto os pesos lineares associados com as

unidades de saída, ( $w_{ji}$ ), quanto às funções de ativação não-lineares das unidades intermediárias. Pelo fato das camadas intermediárias e de saída realizarem tarefas diferentes, é recomendável que o processo de otimização de cada uma delas seja separado usando métodos diferentes. Na maioria destes métodos, o treinamento é classificado como híbrido, uma vez que é dividido em dois estágios. No primeiro estágio, o número de funções radiais e seus parâmetros são determinados por métodos não supervisionados. Neste caso, os centros são posicionados em regiões do espaço onde estão situados os vetores de entrada mais representativos, um método utilizado é o algoritmo genético. No segundo estágio de treinamento os pesos das sinapses  $w_{ji}$  são ajustados. Como as saídas dos neurônios da camada intermediária constituem um vetor linearmente separável, os pesos podem ser determinados por modelos lineares.

#### **4.2 Arquitetura “*General Regression Neural Networks*”**

A “*General Regression Neural Networks*” (GRNN) é uma rede feedforward, baseada em RBFs, de treinamento supervisionado, usualmente, com quatro camadas.

A GRNN têm arquitetura que executa tanto classificação, assim como é capaz de fazer regressões e com isso interpolações.

## Arquitetura de uma rede GRNN

- Abaixo se encontra o diagrama de uma rede do tipo GRNN:

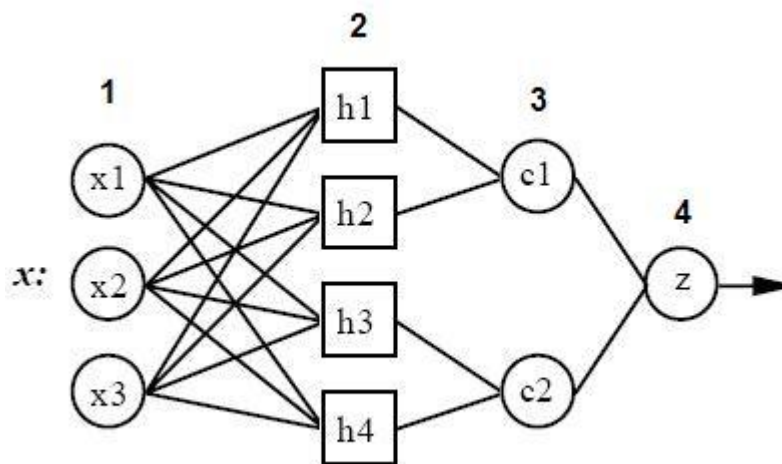


Figura 4.3- Diagrama de uma rede GRNN

A rede GRNN geralmente tem quatro camadas:

1. **Camada de entrada (Input layer)** - Existe um neurônio na camada de entrada para cada variável de entrada. No caso das variáveis categóricas,  $N - 1$  neurônios são usados onde  $N$  é o número de categorias. Normalmente o peso de cada neurônio é unitário, mas também pode ser normalizado, as saídas dos neurônios da camada de entrada alimentam cada neurônio da camada intermediária (Hidden nodes).
2. **Camada oculta (Hidden layer)** - Esta camada tem um neurônio para cada vetor de treinamento. Cada neurônio calcula a distância entre o



vetor de entrada e o do respectivo de treinamento. Esta distância alimenta a função de densidade de probabilidade de cada neurônio, para que seus pesos sejam passados para a camada de soma (class nodes).

3. **Camada classificatória (Class Nodes)** - Para GRNN, existem apenas dois neurônios na camada padrão. Um neurônio é o denominador o outro é o numerador. No denominador acrescenta-se o peso dos valores provenientes de cada um dos neurônios escondidos. No numerador acrescenta-se o peso real, valores multiplicados pelo valor-alvo para cada neurônio escondido.
4. **Camada de decisão (Decision layer)** - Para GRNN, a camada de decisão divide o valor acumulado no numerador pelo valor unitário no denominador e utiliza o resultado como o valor-alvo previsto.

## **Capítulo 5**

### **Metodologia**

Neste capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho para estimar a taxa de dose em um determinado ponto de uma área radioativa e inseri-la no ambiente virtual modelado para representar esta mesma área. Para este fim, dividiu-se o trabalho em duas etapas distintas e complementares. A primeira delas destina-se a determinar um algoritmo para estimar a taxa de dose em um determinado ponto da área radioativa em função de alguns parâmetros conhecidos, cabendo a segunda parte editar o ambiente virtual e inserir esse algoritmo dentro dele. Nas próximas seções serão descritas cada uma dessas etapas.

#### **5.1 – Estimativa da Taxa de Dose**

Normalmente a medição de dose é feita através de detectores de radiação instalados em pontos previamente escolhidos. A estimativa da dose de radiação, em qualquer outro ponto da instalação, é dificultada, entre outros fatores, pela singularidade de cada instalação e pela interação da radiação com os diversos objetos presentes. Sendo assim, torna-se necessário a utilização de algoritmos capazes de interpolar dados, medidos e tabelados, com características normalmente não-lineares.

### **5.1.1 - Aquisição de Dados**

Na fase de aquisição de dados são utilizados detectores de radiação portáteis previamente calibrados.

A seguir são definidos os passos executados para realização dessa tarefa:

Passo 1: defini-se uma altura padrão para todo o local estudado e o eixo de coordenadas;

Passo 2: levantamento preliminar da taxa de dose em todo o local para estimar as áreas onde a dose de radiação é mais intensa.

Passo 3: dividi-se, o local de estudo, em áreas por ordem de grandeza e variação de radiação.

Passo 4: defini-se a malha para cada área, onde a dose for mais intensa e tenha maior variação reticula-se mais a malha, adquirindo mais pontos nesse local.

Passo 5: monta-se uma planilha para cada área (malha).

### **5.1.2 – Monitoramento de Radiação de Área em Tempo Real**

São necessários detectores de radiação instalados na instalação radioativa. Através dos dados destes detectores alimenta-se a tabela de dose de maneira “on-line”, esta tabela é então usada na interpolação da radiação. Monitores de radiação de área (MRA) são necessários para medir diferentes tipos de radiação, incluindo a gama, alfa e nêutrons.

### **5.1.3 - Interpolação por RNA**

O uso de uma RNA, na interpolação, é uma técnica na transformação de um conjunto de dados discreto em um conjunto contínuo, ou seja, encontrar uma curva que melhor se adapta a um conjunto de pontos discretos e que represente bem o espaço por eles representado. Sendo assim, para cada planilha de dados levantada na etapa anterior, é treinada uma RNA para interpolar as diferentes áreas da instalação radioativa representada por essas planilhas.

A seguir são definidos os passos executados para realização dessa tarefa:

Passo 1: separa-se parte dos dados para servir de validação da rede, tomando-se cuidado de escolher pelo menos um de cada potência.

Passo 2: define-se as entradas como sendo a posição espacial (x,y), variáveis que interfiram na dose de radiação de cada instalação e a dose medida pelo detector de área a ser instalado em cada instalação.

Passo 3: defini-se a arquitetura escolhendo as funções de base radial para as camadas da rede.

Passo 4: treina a RNA;

Passo 5: verifica desempenho da RNA (conjunto de treinamento e validação)

Passo 6: se desempenho for satisfatório prossegue para o passo seguinte, caso contrário, retorne para o passo 3.

Passo 7: Gera-se a função interpoladora a partir da RNA treinada.

## **5.2 - Modelagem Virtual do Ambiente e Inserção do Código da RNA**

Utiliza-se o Unreal Engine como núcleo de jogo para o desenvolvimento do ambiente virtual. Através do seu editor de cenários, o unrealED, edita-se o cenário representativo da instalação física radioativa. No Unreal também é possível a programação, através de linguagem UnrealScript, do recebimento de dose pela pessoa virtual.

### **5.2.1 Modelagem Virtual através do Unreal Engine**

O Unreal Engine funciona bem para os objetivos propostos, por razões apresentadas no Capítulo 3.

Os usuários desenvolvem as suas implementações através de uma linguagem de script, que é semelhante ao Java, chamada UnrealScript. Todas as funcionalidades necessárias aos seus próprios aplicativos são desenvolvidas usando uma interface que vem com o Unreal Engine. Suas funcionalidades existentes são modificadas e assim são geradas novas classes. Algumas classes existentes não podem ser modificadas. O que usuários estão aptos a fazer é estender essas classes. O Unreal Engine vem também com um editor de cenários (UnrealED) que é utilizado para criar novos ambientes virtuais. Detalhes sobre o desenvolvimento relativo às duas fases: (i) a fase de modelagem, quando foi modelado o reator Argonauta usando sistema CAD e importado para Unreal Engine; (ii) e o desenvolvimento de novas funcionalidades, incluindo classes e hierarquia, pode ser encontrado em MÓL et al. (2009). Outro trabalho MÓL et al. (2008), fornece mais alguns detalhes sobre características do Unreal Engine. Embora dirigida à outra aplicação, é possível encontrar uma boa visão em ambos os modelos, virtual e desenvolvimento de classes.

### **5.2.2 Monitores de Área em Rede com o Unreal Engine.**

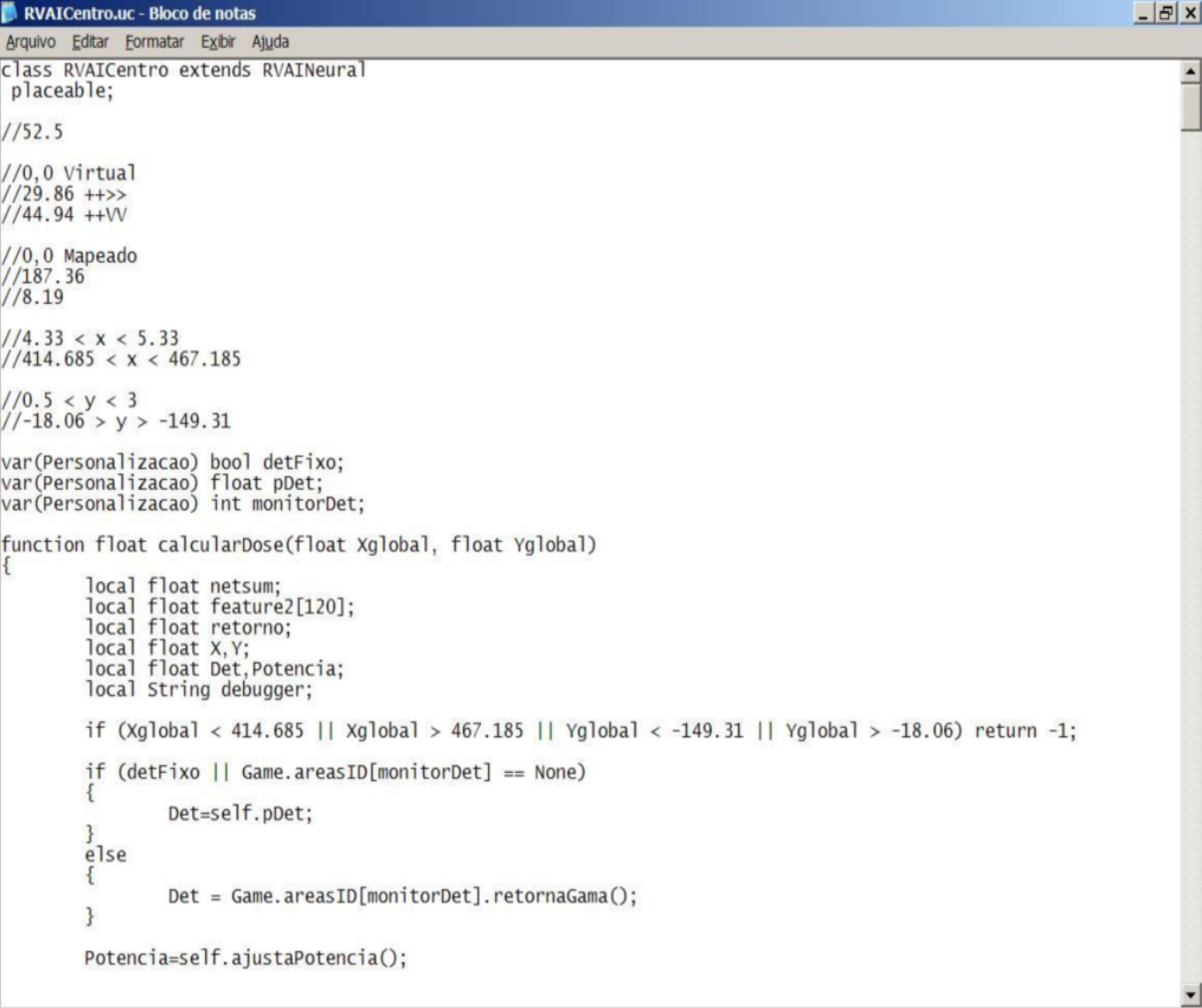
São necessários dados dos detectores de área, em tempo real, dentro do núcleo do jogo Unreal, para isso três processos principais são criados:

- 1 - Um processo recebe e publica os dados medidos pelo MRA
- 2 - Outro processo alimenta esses dados para Unreal Engine
- 3 - Um terceiro processo serve como uma interface entre os dois processos citados anteriormente.

Todos esses processos podem residir em um ou mais computadores, e são acessíveis a todos os outros através de uma rede TCP / IP.

### **5.2.3 Inserção da RNA Treinada no Ambiente Virtual**

A inserção de uma rede neural no Unreal, sendo programada com a linguagem Unrealscript, figura 5.1, gera uma nova classe. As diferentes classes são adicionadas ao núcleo do jogo, criando assim ferramentas para novas simulações. Os treinamentos das RNAs geram funções interpoladoras, cada função, referente a cada área, é inserida usando a adaptação da linguagem de programação, abrangendo assim todo o espaço de locomoção do avatar. Também são ajustados arquivos de configurações iniciais do núcleo, de forma a fazer o núcleo utilizar as classes modificadas ou criadas.



```
class RVAICentro extends RVAINEural
placeable;

//52.5

//0,0 Virtual
//29.86 ++>>
//44.94 ++VV

//0,0 Mapeado
//187.36
//8.19

//4.33 < x < 5.33
//414.685 < x < 467.185

//0.5 < y < 3
//-18.06 > y > -149.31

var(Personalizacao) bool detFixo;
var(Personalizacao) float pDet;
var(Personalizacao) int monitorDet;

function float calcularDose(float Xglobal, float Yglobal)
{
    local float netsum;
    local float feature2[120];
    local float retorno;
    local float X,Y;
    local float Det,Potencia;
    local String debugger;

    if (Xglobal < 414.685 || Xglobal > 467.185 || Yglobal < -149.31 || Yglobal > -18.06) return -1;

    if (detFixo || Game.areasID[monitorDet] == None)
    {
        Det=self.pDet;
    }
    else
    {
        Det = Game.areasID[monitorDet].retornaGama();
    }

    Potencia=self.ajustaPotencia();
}
```

Figura 5.1 – Começo da programação da classe RVAICentro.



## Capítulo 6

### **Aplicação da metodologia – Estudo de caso: Reator Argonauta do IEN**

A aplicação da metodologia foi feita nas instalações do Instituto de Engenharia Nuclear, mais especificamente no Reator de pesquisa Argonauta. Essa instalação foi escolhida, pois quando o reator nuclear é colocado crítico, ou seja, em funcionamento padrão, temos geração de radiação gama. Essas ondas têm um canal de saída, do núcleo do reator, chamado J9, que é usado para irradiar objetos em pesquisas, e logo, quando aberto, afeta áreas no salão (o reator é blindado, o que dificulta a saída de radiação por outros locais). Para essa aplicação foram adquiridas apenas medidas de dose gama e a interpolação foi feita com um aplicativo de RNA chamado Neuroshell [Ward Systems Group, INC] onde foi usado o treinamento de arquitetura GRNN. Após as redes treinadas e testadas foram geradas três funções interpoladoras em linguagem de programação c++, uma função para cada área específica. Após a geração das funções foi feita a adaptação dessas funções para linguagem Unrealscript, que é a linguagem do programa Unreal. Essas funções foram inseridas como o cálculo de dose recebida pelo avatar. Assim é possível calcular em tempo real a dose total recebida, por esse indivíduo virtual, dentro do salão, a partir de dados como: a posição do avatar, potência do reator Argonauta e medidas de radiação de detectores fixos.

## 6.1 Descrições do Reator Argonauta

O reator Argonauta, Figura 6.1, localizado no Instituto de Engenharia Nuclear, na Ilha do Fundão no Rio de Janeiro, é um reator térmico de pesquisa tipo piscina que utiliza como combustível urânio enriquecido a 20% em U-235, com potência máxima de 5 kW (para configuração atual). Todavia, tem como operação padrão as potências de 170 a 340 W. Foi o primeiro reator de pesquisa construído no país por uma empresa nacional. Apresenta ótimas características para ensino, pesquisa e treinamento de pessoal especializado em ciência e tecnologia nuclear. Desde 1965, o reator de pesquisa Argonauta vem sendo utilizado em pesquisas envolvendo nêutrons nas áreas da física de reatores e física nuclear. Atualmente, entre as principais linhas de pesquisas (nestas áreas) estão ensaios não destrutivos com nêutrons térmicos nas áreas de biologia, indústria, meio ambiente e segurança pública nacional. Também são produzidos radioisótopos (Mn-56, La-140, Se-75 e Br-82) para serem utilizados como traçadores em pesquisas nas áreas do meio ambiente e industrial. Em colaboração com universidades e instituições, são ministradas aulas em suas dependências completando a formação de alunos. Da graduação ao doutorado, mais de 60 alunos de instituições e universidades brasileiras já obtiveram seus títulos de mestre ou doutor utilizando este reator no desenvolvimento de suas pesquisas (AUGUSTO, 2007 e MÓL *et al.*, 2009).

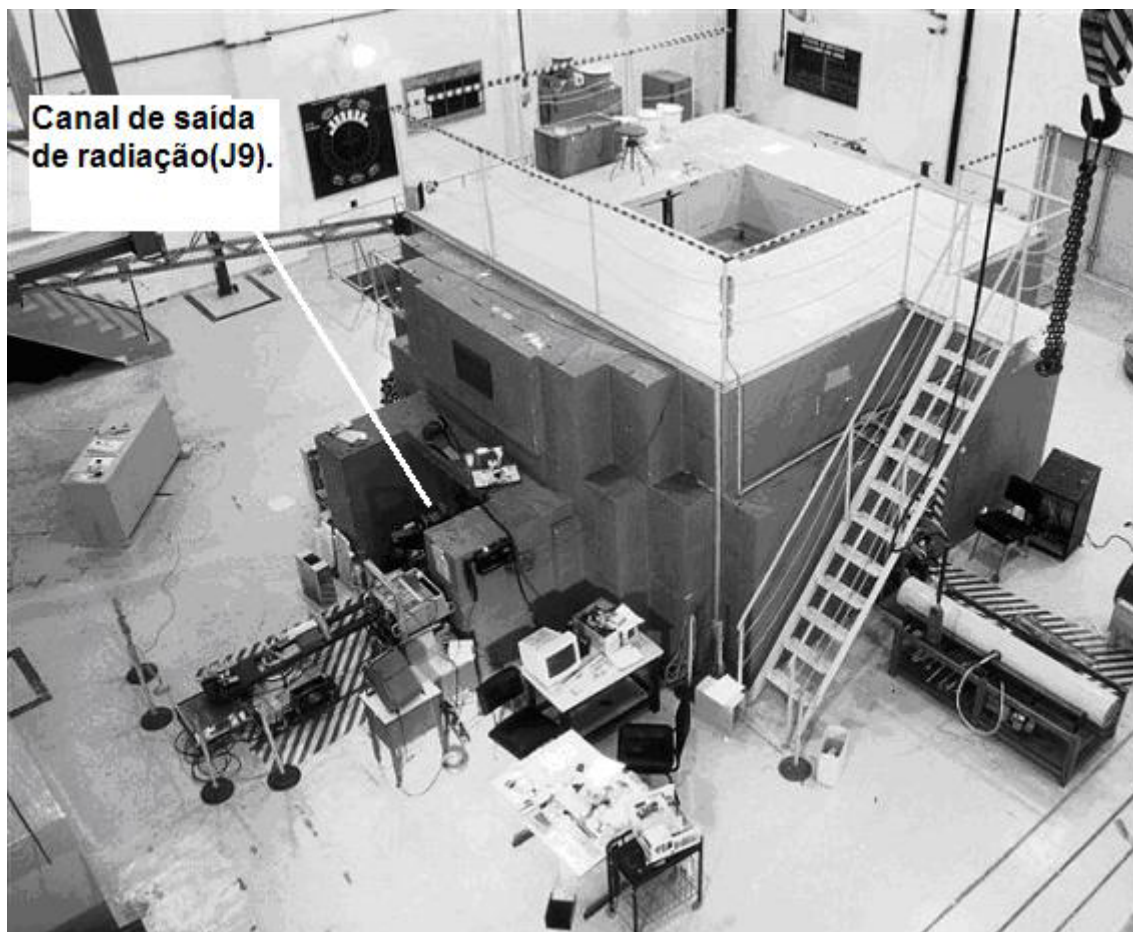


Figura 6.1 – Reator Argonauta – IEN/CNEN.

## 6.2 Aquisições de Dados nas Instalações do IEN

Na aquisição de dados foi usado detector do tipo Geiger-muller, esse detector foi calibrado anteriormente.

Abaixo se encontra a aquisição passo a passo:

**Passo 1:** Foi definida uma altura de um metro como altura de aquisição de dose de radiação gama, visto que nessa altura encontram-se, tanto em homens quanto em mulheres, muitos órgãos sensíveis a radiação. Para isso foram usados tripés ajustáveis.

**Passo 2:** Nesse passo fizemos um levantamento geral da área no intuito de conhecer os lugares de dose mais críticos e assim separar o salão em subáreas e percebeu-se que frente ao reator a medida de dose era mais significativa, porém, atrás e dos lados a dose era apenas uma medida de fundo (background), não dependendo do reator nuclear.

**Passo 3:** Depois de feito o levantamento total, foi decidido pela separação em quatro grandes áreas.

Na Área 0, Figura 6.2, foi decido pelo uso de uma média de 2.5 microsievverts como medida de fundo, pois a variação da dose, em relação à operação do reator, é desprezível.

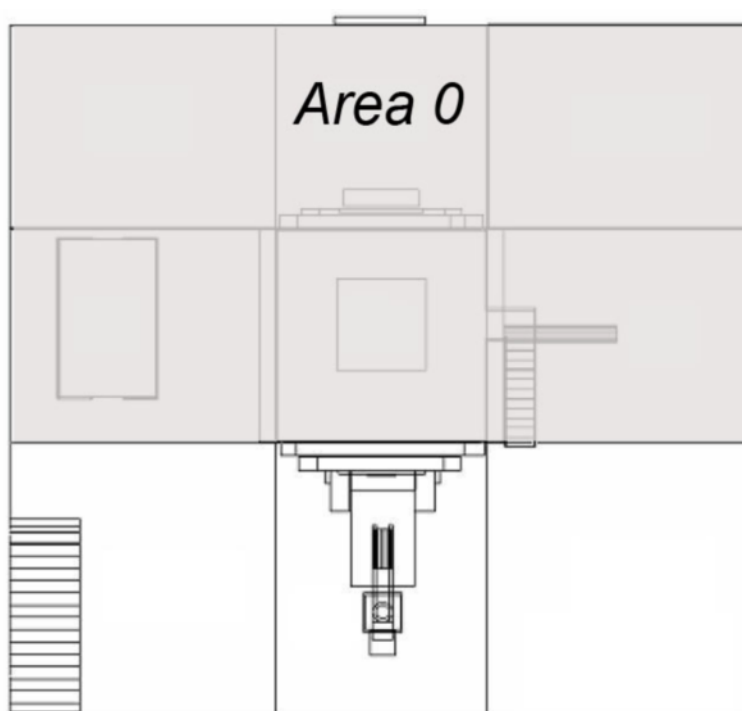


Figura 6.2 – Mostra a área 0 (hachurada) na planta do salão do reator

Na área 1, Figura 6.3, a variação da dose é relativamente baixa, com isso foi traçada uma malha com menor número de pontos, logo menor quantidade de dados para interpolação.

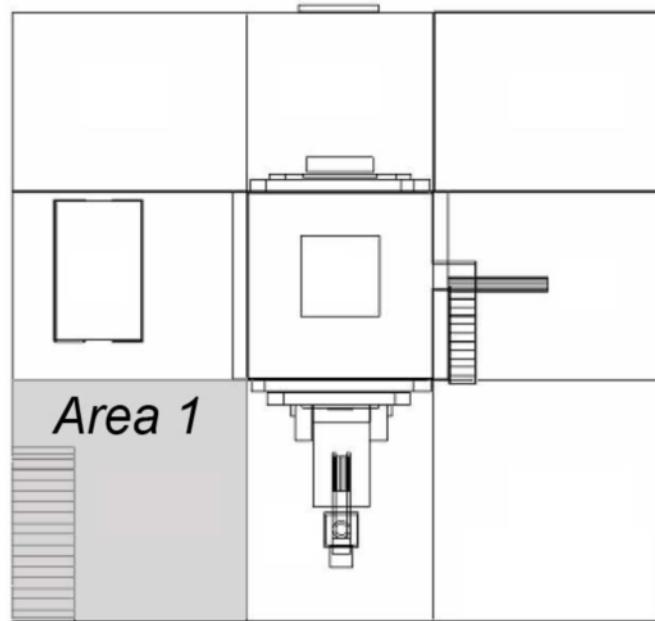


Figura 6.3 – Área 1(hachurada) na planta do salão do reator

Na área 2, figura 6.4, a variação foi significativa e os valores são muito maiores, com isso o cuidado de ter uma malha com maior números de pontos para uma melhor interpolação.

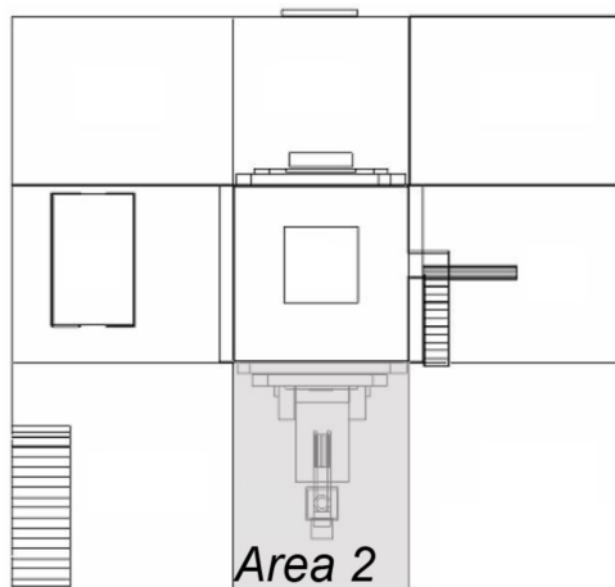


Figura 6.4 – Área 2(hachurada) na planta do salão do reator

Na área 3, Figura 6.5, foi encontrada uma variação menor que a área dois, assim como na área um, foi discretizada com menos pontos.

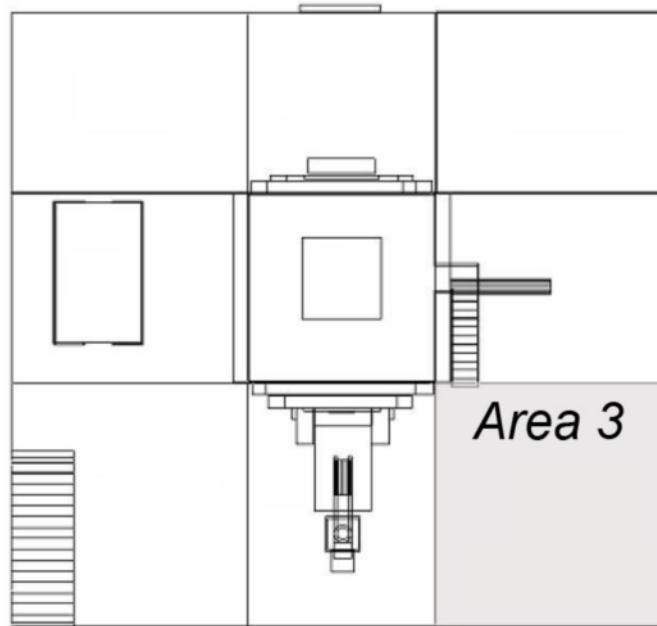


Figura 6.5 Área 3(hachurada) na planta do salão do reator

**Passo 4:** Neste passo definimos a quantidade de pontos para cada malha em cada área.

Na malha 1, Figura 6.6, foi usada uma distância de um metro no eixo x com três pontos separados por esta distância, sendo eles,  $x=0$ ,  $x=1$  e  $x=2$ , porém devido a fronteira com a área dois, a malha foi traçada com menor espaçamento, tendo uma distância de trinta e três centímetros no eixo x. No eixo y a discretização foi de meio metro.

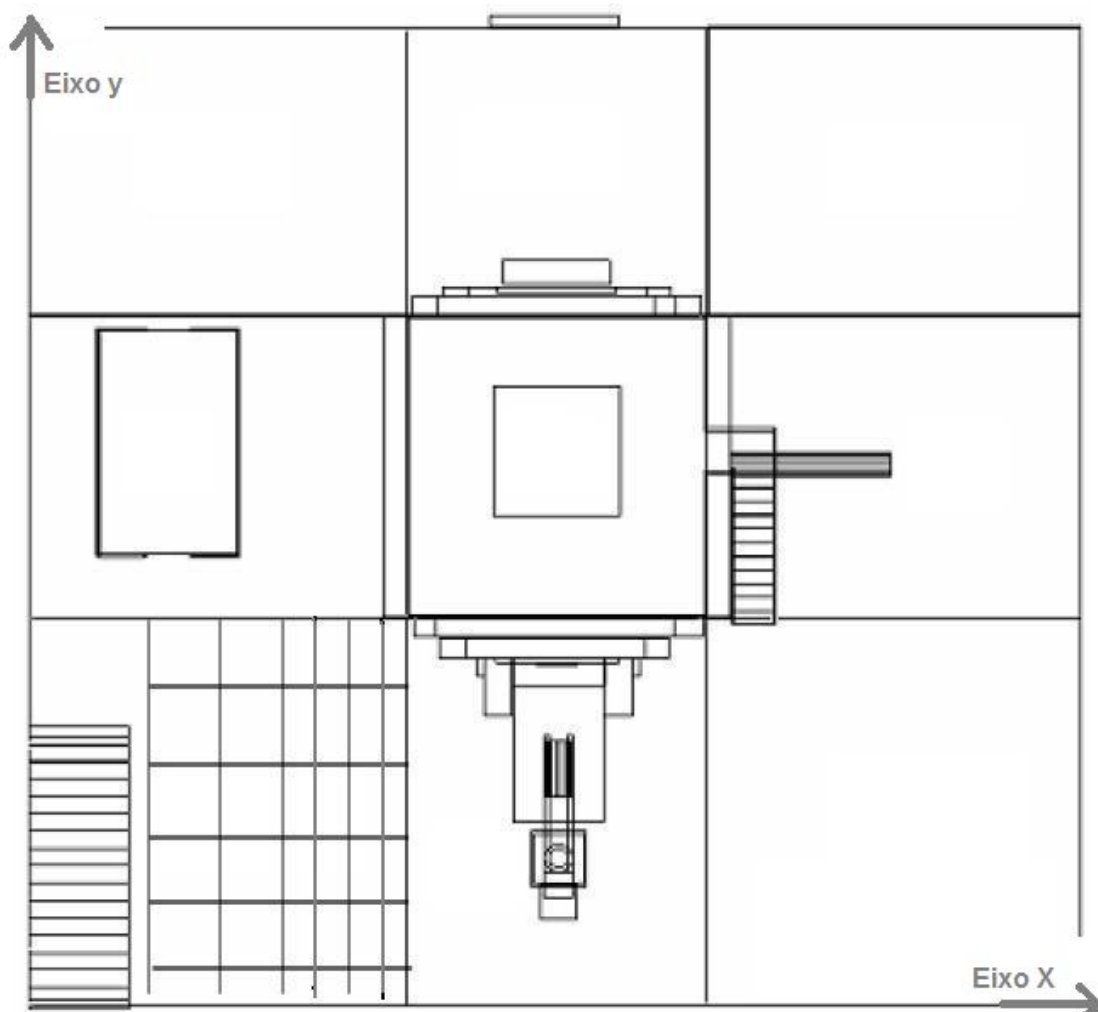


Figura 6.6 – Representação da malha traçada na área 1

Na malha 2, figura 6.7, a discretização no eixo y foi de meio metro e todo o eixo x foi discretizado com espaçamento de trinta e três centímetros, essa distância é a menor medida de tal forma que não interfira fisicamente na medida do ponto ao lado, tendo assim, um maior número de pontos na área mais variável.

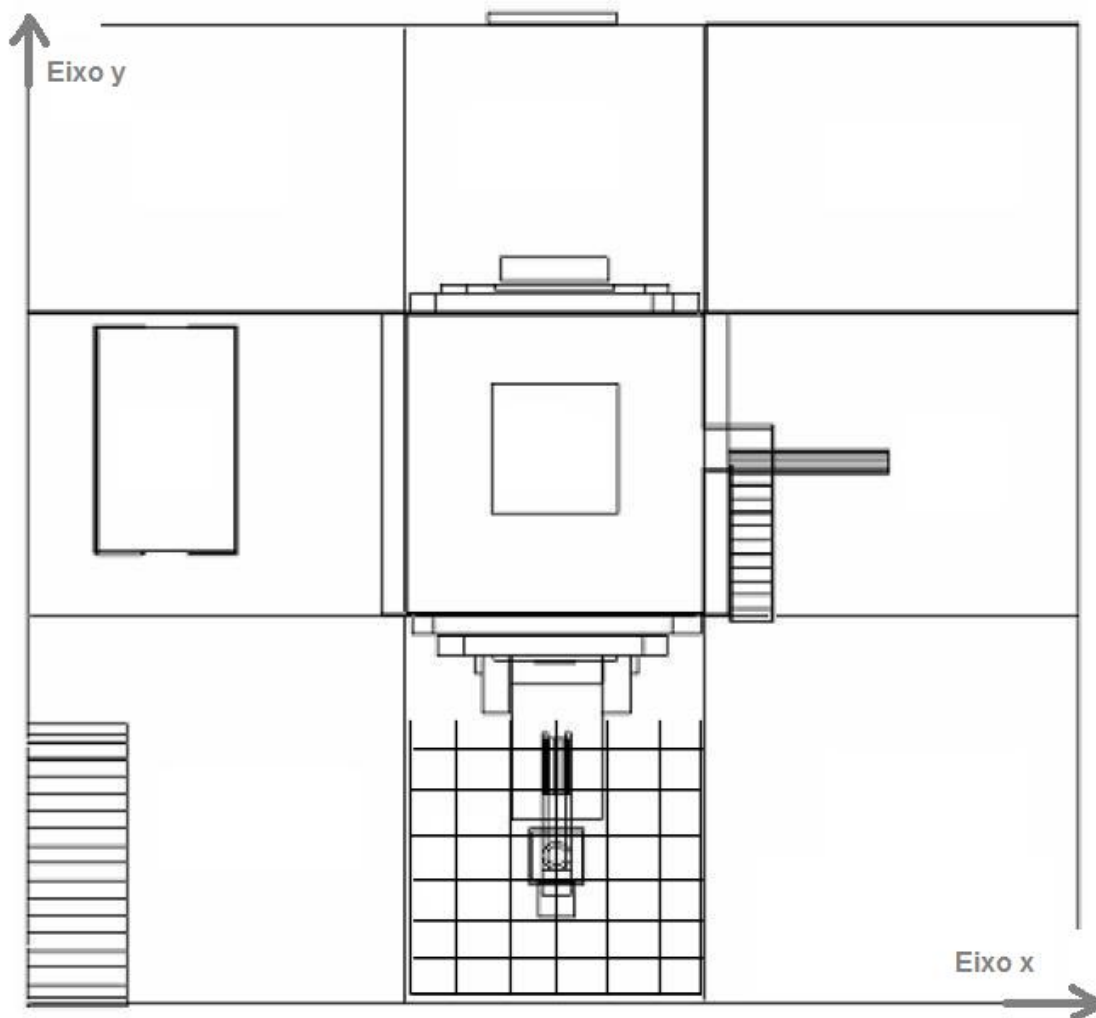


Figura 6.7 – Representação da malha traçada na área 2

Na malha 3, Figura 6.8, o eixo x foi feito um espaçamento de um metro com três pontos usando esta distância  $x=8$ ,  $x=9$  e  $x=10$ , porém pela fronteira com a área dois, para pontos menores que oito, o espaçamento foi de trinta e três centímetros. Na coordenada y tivemos meio metro como espaço.



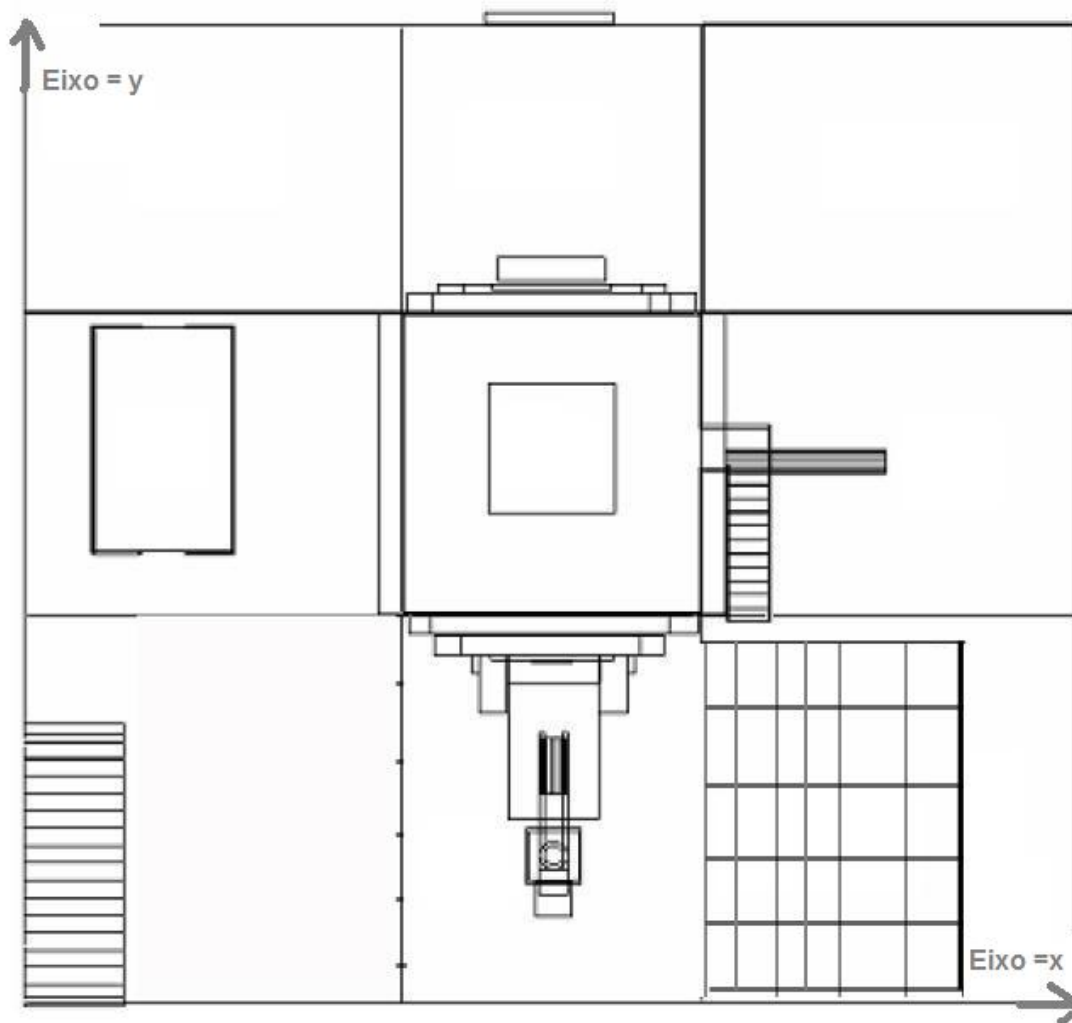


Figura 6.8 – Representação da malha traçada na área 3

**Passo 5** : Nesse passo foram organizadas as tabelas com os dados adquiridos para cada malha. A tabela foi organizada de tal maneira que tivéssemos uma coluna para a potência, para coordenada x, para coordenada y, uma com medidas de dose de um ponto fixo e uma última coluna para dose de radiação gama medidas na instalação. A dose observada no detector só varia com a potência do reator. O ponto fixo escolhido como entrada de rede foi  $x = 5.33$  e  $y = 1$ , pois este encontra-se na área mais crítica do espaço físico estudado.

Na tabela referente à área 1, Tabela 6.1, usada no treinamento da rede, não foram inseridas as medidas do ponto  $x=0$  e  $y=0$  devido à incerteza de medição, dada a dificuldade do posicionamento do tripé que tinha como barreira estantes no salão do reator. As medidas de fronteira,  $x=0$  e  $y=\text{constante}$ , assim como  $y=0$  e  $x=\text{constante}$ , são consideradas background, dada sua invariância perante uma mudança na potência do reator.

Tabela 6.1 – Parte dos dados referente à malha da área um no salão do reator.

Potência(w)	Y(m)	X(m)	Dose Corrigida( $\mu\text{sv/h}$ )
34,0000	1,0000	1,0000	2,0834
34,0000	1,0000	2,0000	2,1592
34,0000	1,0000	2,3300	1,9887
34,0000	1,0000	2,6600	2,0834
34,0000	1,0000	3,0000	2,1213
34,0000	1,0000	3,3300	1,2311
34,0000	1,0000	3,6600	2,9357
34,0000	1,0000	4,0000	4,3562
34,0000	2,0000	1,0000	3,0304
34,0000	2,0000	2,0000	2,7463
34,0000	2,0000	2,3300	2,5569
34,0000	2,0000	2,6600	2,4622
34,0000	2,0000	3,0000	4,5456
34,0000	2,0000	3,3300	4,0721
34,0000	2,0000	3,6600	5,0191
34,0000	2,0000	4,0000	5,9661
34,0000	3,0000	1,0000	2,1781
34,0000	3,0000	2,0000	1,9887
▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪
340.0000	6.0000	7.3300	9.3890
340.0000	6.0000	7.6600	5.7198
340.0000	6.0000	8.0000	6.1514
340.0000	6.0000	9.0000	4.4787

Na tabela referente à área 2, tabela 6.2, foi inserida a medida do detector de área(dose de um ponto fixo), visto que este se encontra na posição referente a essa área. As medidas de fronteira (y=0) foram retiradas pelo mesmo motivo apresentado anteriormente.

Tabela 6. 2 – Parte dos dados referente à área dois no salão do reator.

Potência(w)	Y(m)	X(m)	Dose Corrigida(µsv/h)	Det1(µsv/h)
34,0000	1,0000	4,3300	12,8792	51,8016
34,0000	1,0000	4,6600	31,2510	51,8016
34,0000	1,0000	5,0000	89,0180	51,8016
34,0000	1,0000	5,3300	51,8016	51,8016
34,0000	2,0000	4,3300	9,0912	51,8016
34,0000	2,0000	4,6600	31,3457	51,8016
34,0000	2,0000	5,0000	10,6064	51,8016
34,0000	2,0000	5,3300	8,0508	51,8016
34,0000	3,0000	4,3300	10,2276	51,8016
34,0000	3,0000	4,6600	55,8730	51,8016
34,0000	3,0000	5,0000	10,6064	51,8016
34,0000	3,0000	5,3300	4,9643	51,8016
▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪
340.0000	6.0000	4.3300	113.6400	510.4616
340.0000	6.0000	4.6600	265.1600	510.4616
340.0000	6.0000	5.0000	235.8030	510.4616

Na tabela referente à área 3, Tabela 6.3, não foram usadas as medidas de fronteira pelo mesmo motivo apresentado anteriormente.

Tabela 6. 3 – Dados referentes à área três no salão do reator.

Potência(w)	Y(m)	X(m)	Dose Corrigida(µsv/h)
34,0000	1,0000	5,6600	7,9861
34,0000	1,0000	6,0000	3,6693
34,0000	1,0000	6,3300	3,8635
34,0000	1,0000	6,6600	2,5361
34,0000	1,0000	7,0000	2,3742
34,0000	1,0000	7,3300	2,6764
34,0000	1,0000	7,6600	3,3563
34,0000	1,0000	8,0000	1,3706
34,0000	1,0000	9,0000	1,3490
34,0000	2,0000	5,6600	3,7988
34,0000	2,0000	6,0000	3,8851
34,0000	2,0000	6,3300	3,7556
34,0000	2,0000	6,6600	2,8059
34,0000	2,0000	7,0000	2,2663
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
340.0000	6.0000	7.0000	7.9321
340.0000	6.0000	7.3300	9.3890
340.0000	6.0000	7.6600	5.7198
340.0000	6.0000	8.0000	6.1514
340.0000	6.0000	9.0000	4.4787

### 6.3 Interpolação das Medidas de Radiação Gama por RNA

O treinamento da rede neural artificial foi feito usando um aplicativo chamado Neuroshell [Ward Systems Group, INC].

A seguir se encontram os passos do treinamento da rede:

**Passo 1:** Neste passo foi separado um percentual de 15%(45 pontos) dos dados da tabela da área um, sendo 10%(30 pontos) para teste e 5%(15 pontos) para validação da rede. Na área mais intensa, área dois, foi separado manualmente parte dos dados, com o intuito de ter, ao menos, uma medida para cada potência. Com os dados separados podemos assim validar a rede (aplicação da rede sobre dados desconhecidos). Na área três foi separado

16%(40 pontos), sendo 10%(26 pontos) para teste e 6%(14 pontos) para validação.

**Passo 2:** Nesse passo foram escolhidas as variáveis de entrada e saída da rede. Como entradas foram colocadas a potência e par ordenado para todas as áreas, contudo, na área dois, acrescentamos a medida do detector fixo. Como saída temos apenas a variável dose.

A seguir encontram - se as informações dos treinamentos por área:

Na área um foi usada uma arquitetura GRNN, onde se encontrava na primeira camada três neurônios. Na segunda camada foram usados duzentos e quarenta neurônios (representando 240 pontos ) e na terceira camada foi usado apenas um neurônio para valores de dose.

Na área dois foi usada uma arquitetura GRNN, onde se definiu quatro neurônios na primeira camada, cento e vinte neurônios (representando 120 pontos) para segunda camada e um neurônio na terceira camada.

Na área três foi usada uma arquitetura GRNN, onde se definiu três neurônios para camada de entrada, duzentos e setenta neurônios (representando 270 pontos ) para segunda camada e um para terceira camada.

#### 6.4 Geração do Código da RNA dos Dados do Salão do Reator

Após o treinamento foram geradas três funções interpoladoras em linguagem C++ (uma para cada área). Na área um, obteve-se o protótipo “void Fire\_Area1(double \*inarray, double \*outarray)”, onde inarray é um vetor com o número de posições igual ao número de entradas de rede, sendo inarray[0] a posição onde é guardado o valor da potência, inarray[1] a posição onde é guardado o valor da coordenada y e inarray[2] a posição onde é guardado o valor da coordenada x. O vetor outarray é responsável por guardar os valores de saídas, sendo apenas uma posição ,outarray[0], onde é guardada a dose calculada pela função interpoladora, dados os valores de entrada.

Na área dois obteve-se o protótipo “void Fire\_Area2(double \*inarray, double \*outarray)”, onde inarray é um vetor com o número de posições igual ao número de entradas de rede, sendo inarray[0] a posição onde é guardado o valor da potência, inarray[1] a posição onde é guardado o valor da coordenada y, inarray[2] a posição onde é guardado o valor da coordenada x e inarray[3] a posição onde é guardado o valor do detector de área. O vetor outarray é responsável por guardar os valores de saídas, sendo apenas uma posição ,outarray[0], onde é guardada a dose.

Na área três obteve-se o protótipo “void Fire\_Area3(double \*inarray, double \*outarray)”, exatamente como na área 1, inarray é um vetor com o número de posições igual ao número de entradas de rede, sendo inarray[0] a posição onde é guardado o valor da potência, inarray[1] a posição onde é guardado o valor

da coordenada  $y$  e  $inarray[2]$  a posição onde é guardado o valor da coordenada  $x$ . O vetor  $outarray$  é responsável por guardar os valores de saídas, sendo apenas uma posição  $outarray[0]$ , onde é guardada a dose.

### 6.5 Monitor de Radiação de Área 7027(MRA 7027)

Para realizar medidas em tempo real detectores de radiação desenvolvidos chamados MRA 7027 (Oliveira, *et al* 1997, 2000) foram instalados na sala no reator de pesquisa do Instituto de Engenharia Nuclear. Juntamente com sondas Geiger-Muller é possível monitorar a dose de radiação gama dentro do salão do Argonauta.

A Figura 6.9 mostra um MRA 7027 com. A Figura 6.10 mostra uma ilustração da localização do MRA dentro do salão.



Fig. 6.9 - MRA 7027 com sonda Geiger-Müller.



Figura 6.10 Ilustração da localização do MRA dentro do salão

O MRA 7027 tem a capacidade de trabalhar em rede local se conectando, através de RS-485, ou via protocolo TCP/IP, monitorado por um software local. O computador controla a comunicação do MRA a fim de exibir os dados na tela ou compartilhá-los, através da rede TCP/IP, para outros computadores. O sistema adotado para a comunicação com Unreal Engine é descrito na seção 6.6 a seguir.

### **6.6 MRA 7027 em Rede com o Unreal Engine**

Para alimentar a RNA que foi inserida no Unreal foi necessário um sistema que interligasse os dados do detector de área, localizado no salão do reator Argonauta, ao código inserido no Unreal. Foi desenvolvido um sistema que trabalha em rede. Neste sistema, dois servidores passivos têm comunicação apenas com os sistemas MRA e Unreal e então são interligados por um



terceiro sistema chamado “Man in the Middle” (MiM). O processo MIM recupera as informações do primeiro sistema (dados de dose) e alimenta o segundo sistema com estes dados. O processo MIM pode residir em qualquer um dos servidores, ou pode residir em um terceiro computador separado, se comunicando com os outros através de uma rede TCP / IP. O processo MiM, foi criado com a linguagem de macro AutoIt ([www.autoitscript.com/autoit3/](http://www.autoitscript.com/autoit3/)). Toda a comunicação é realizada através do protocolo HTTP, versão 1.1, descrito pela RFC 2616 (Fielding et al., 1999).

Na Figura 6.11 encontra-se o esquema de rede desenvolvido. O servidor que recolhe os dados medidos a partir MRA é rotulado "MRA servidor". O servidor executando o primeiro processo utiliza o software Apache para publicar estes dados na rede, com um módulo PHP5 para a dinâmica do tratamento de arquivos, este é identificado como "servidor Apache." O servidor Unreal Engine2 Runtime utiliza uma implementação própria, o compilador UCC, para rodar o servidor do jogo, desenvolvido através da classe "RVDoseWeb", este é identificado como "Unreal servidor" (segundo processo). Os computadores rotulados "Unreal clientes" são explorados pelos usuários que participam numa determinada simulação. O servidor executando o processo MIM também é mostrado.

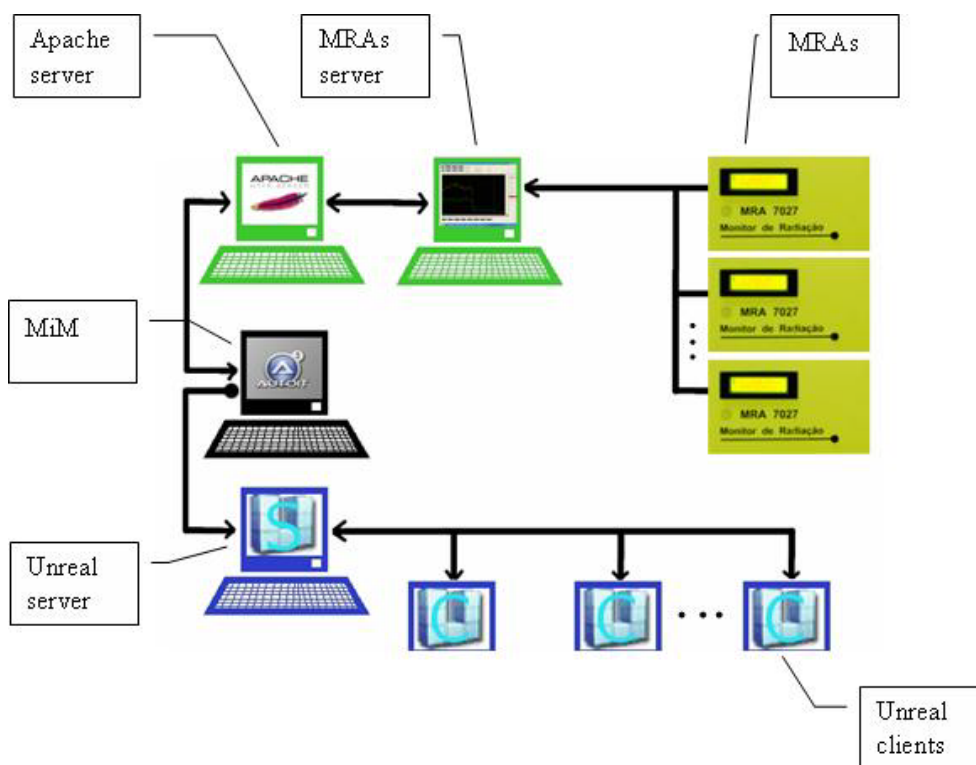


Figura 6.11 – Esquema de comunicação entre MRA e Unreal.

### 6.7 Inserção do Código da RNA no Unreal

Os códigos contendo as funções foram reescritos em linguagem UnrealScript para a inserção no simulador de realidade virtual Unreal. Foi gerada uma nova classe no núcleo do jogo Unreal (Figura 6.12). Cada código, referente às funções de cada área 1, 2 e 3, foi inserido na área respectiva representada pela planta virtual. Uma medida de background foi inserida no restante do salão.

A classe criada pelo trabalho em questão foi de nome RVA/neural, com suas subclasses respectivas. As subclasses de nome RVA/Esquerda, RVA/Centro, RVA/Direita referem-se às áreas 1, 2 e 3.

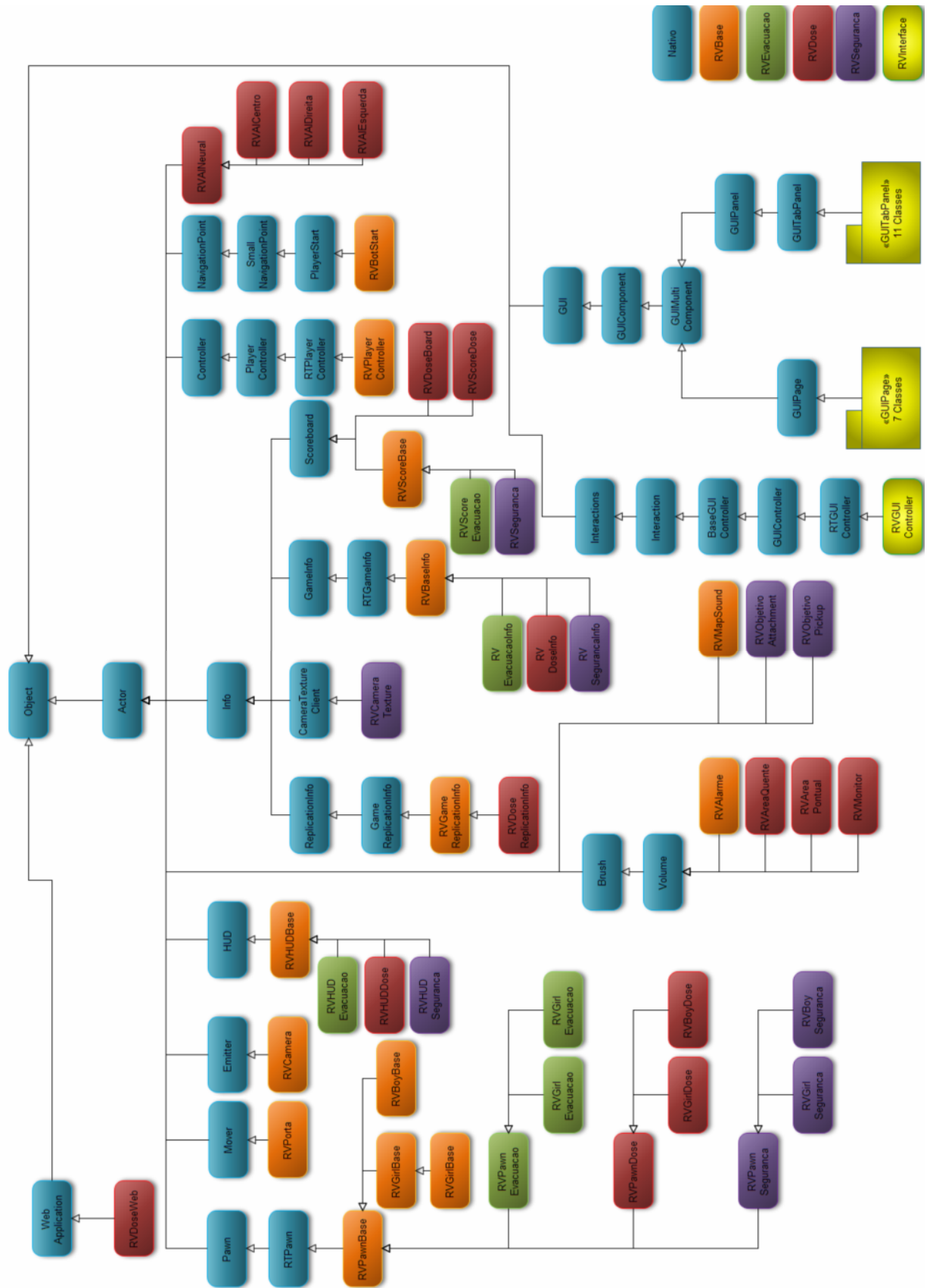


Figura 6.12 – Mapa de classes

## **6.8 Resultados**

Os resultados serão apresentados em duas partes distintas, sendo a primeira responsável pela determinação da dose, e, cabendo a segunda parte, a apresentação do resultado referente a inserção do código no Unreal.

Quanto à determinação de dose, serão apresentados os gráficos com as curvas geradas pela RNA treinada e a capacidade de generalização da RNA treinada vista através da aplicação da rede sobre dados separados previamente.

Quanto à inserção do código no Unreal, será apresentado o resultado principal que é a janela de informação de dose dentro do simulador Unreal, janela esta chamada de HUD.

### **6.8.1 Resultados da Determinação de Dose**

As séries chamadas reais são os dados experimentais e as séries contínuas são medidas interpoladas através de RNA (cada cor representa uma linha de y e as séries reais tem a mesma cor de sua linha interpolada).

O eixo cartesiano assim como a abertura do canal J9 encontram-se na Figura

6.13

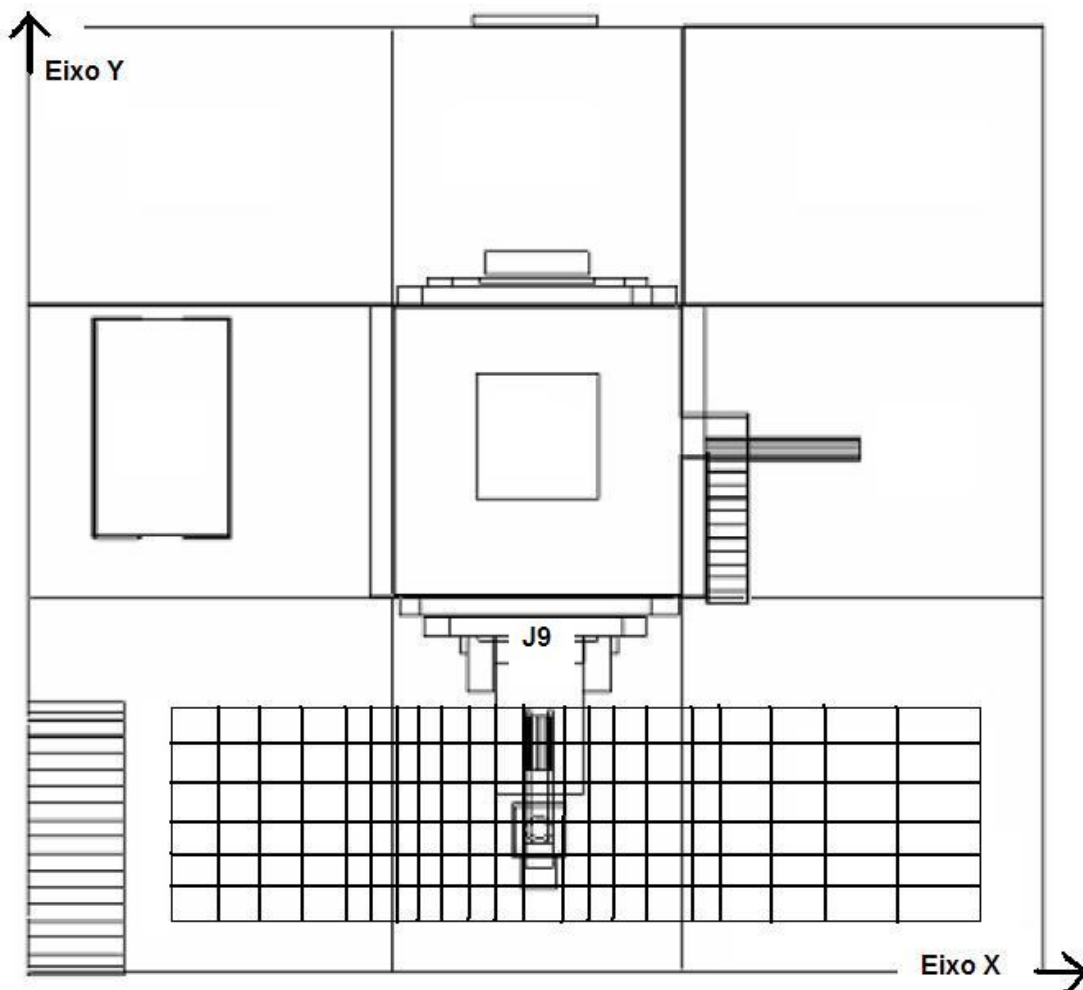


Figura 6.13 – Mostra eixo cartesiano, o canal J9, e linhas de y

Na área um, foi feito o treinamento da rede usando a arquitetura GRNN.

A seguir encontram-se os gráficos, das medidas interpoladas, para linhas da coordenada y com valores de potência de 34, 85, 170, 255 e 340 watts. Também se podem observar, em diferentes cores para cada valor de y, as medidas experimentais na forma de pontos, a proximidade entre o ponto e a curva é uma medida da diferença dos valores experimentais para os valores interpolados.

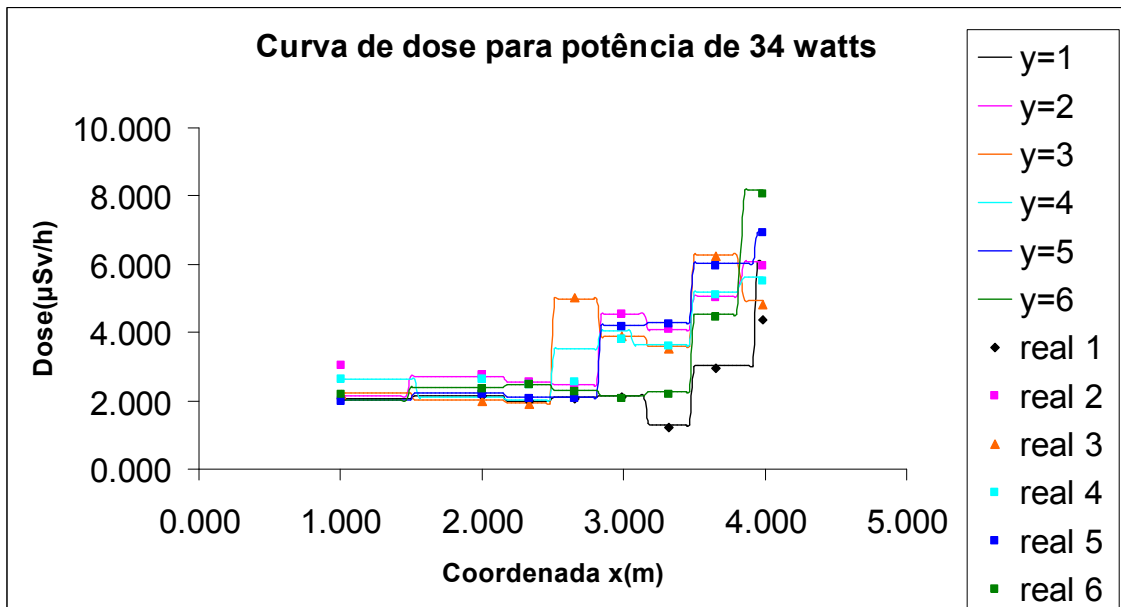


Figura 6.14 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 34 w.

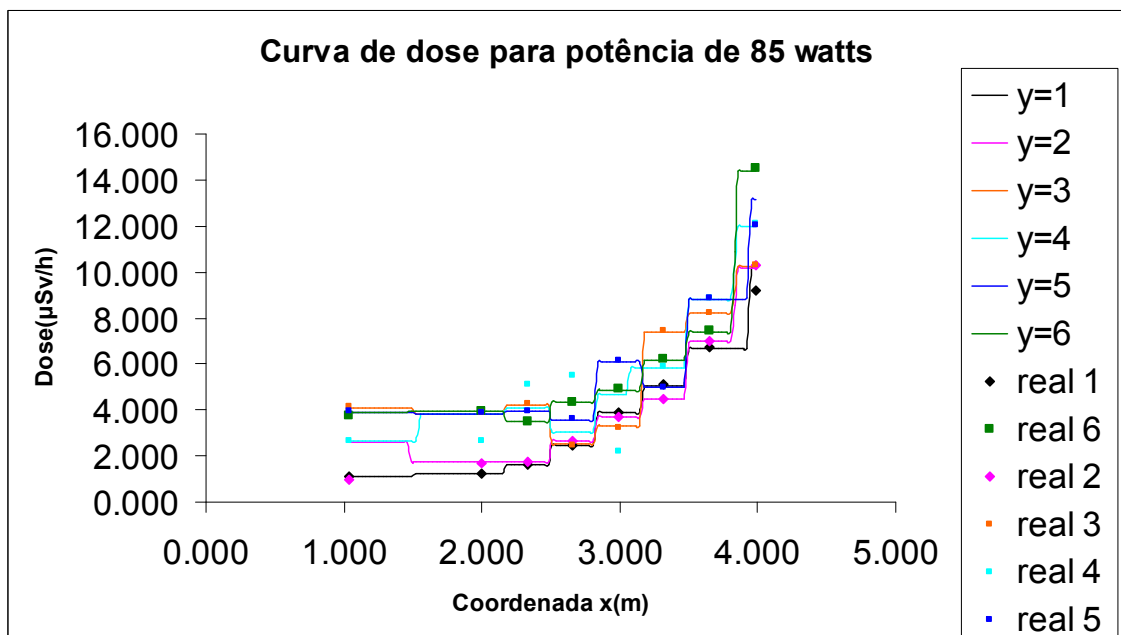


Figura 6.15 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 85 w.

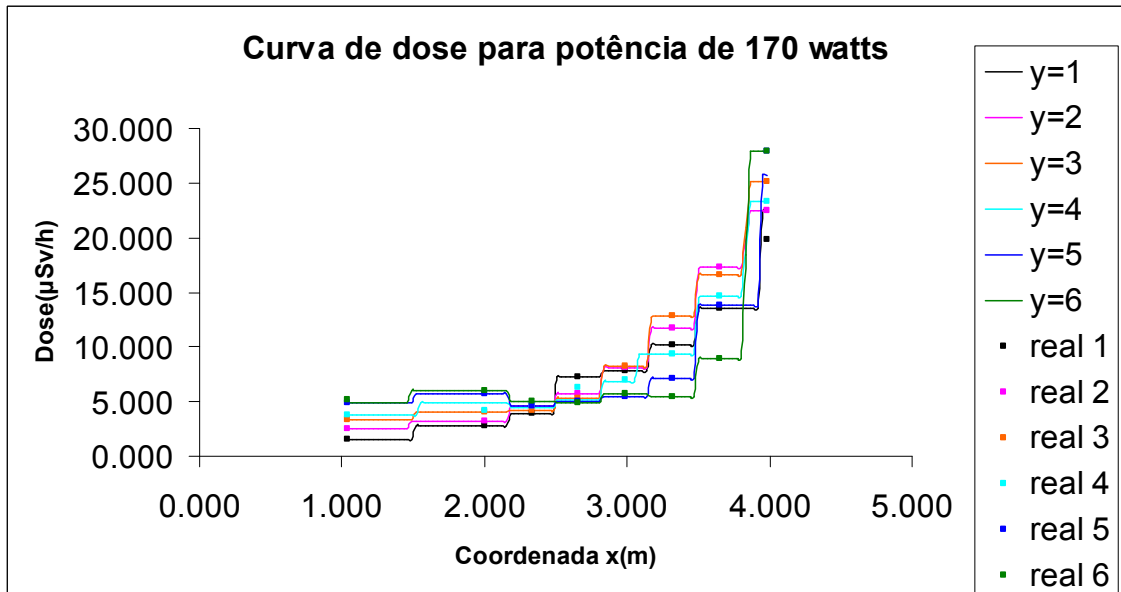


Figura 6.16 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 170 w.

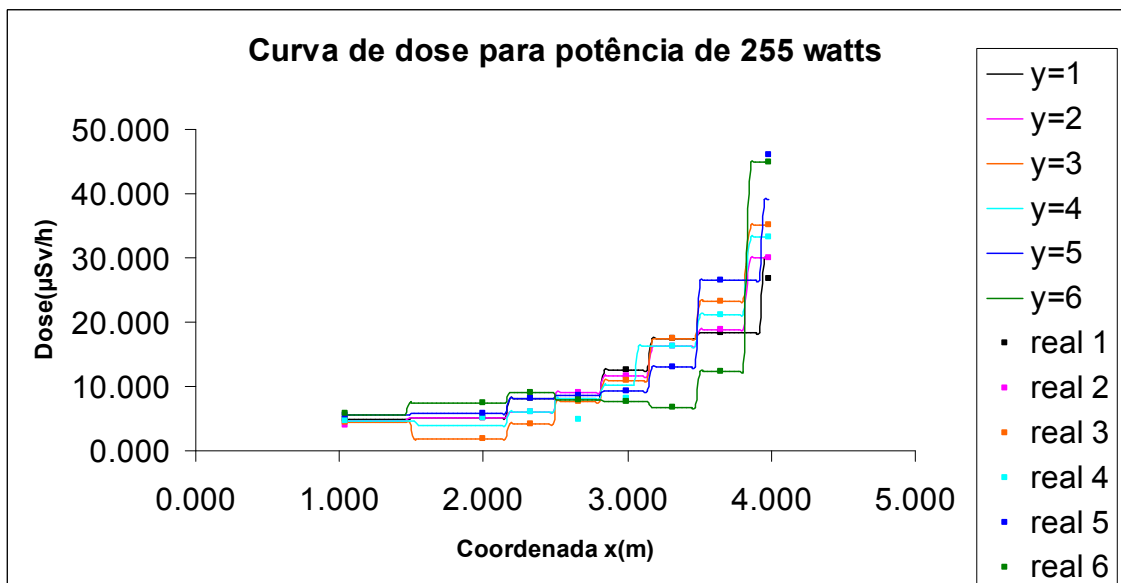


Figura 6.17 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 255 w.

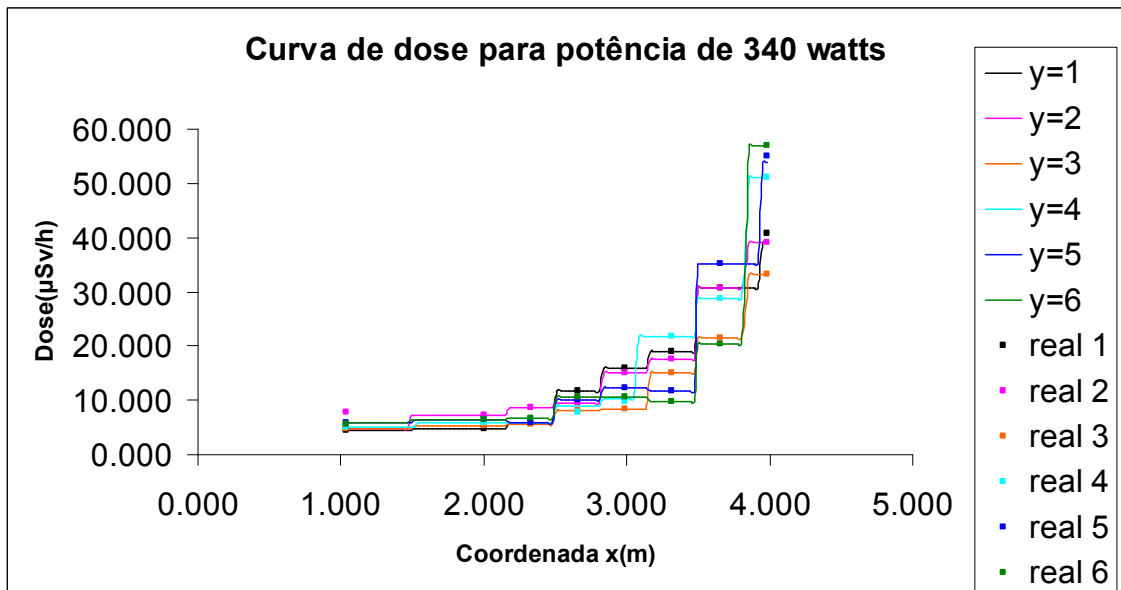


Figura 6.18 – Dose de radiação interpolada na área 1 para potência 340 w.

Todos os gráficos para área um mostraram um crescimento da dose ao longo da coordenada X (em direção a área dois, frente ao canal J9). Pode-se observar também a variação das curvas em relação a potência, sendo que quanto maior a potência maior o valor da dose.

Na Tabela 6.4 será apresentada a aplicação da rede neural treinada sobre os dados previamente separados da área um, o que significa jogar na função interpoladora(vista anteriormente) os valores de entrada e assim calcular a dose (posição do vetor de saída), a diferença mostra uma comparação percentual dos valores de dose esperado (valores experimentais) com os valores calculados pela função interpoladora, este método testa a capacidade de generalização da rede e se os valores forem satisfatórios, temos então a validação do código da RNA.



Tabela 6.4 – Mostra a aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento.

Potência(w)	Y(m)	X(m)	Dose esperada( $\mu$ sv/h)	RNA( $\mu$ sv/h)	Diferença(%)
34.000	4.000	2.000	2.651599884	1.927228093	27.31829169
34.000	4.000	2.330	2.462199926	1.927228093	21.72739214
34.000	4.000	3.000	3.788000107	3.887684345	-2.63157961
85.000	4.000	2.330	5.113800049	4.132740974	19.18454114
170.000	4.000	2.000	4.166800022	4.688495636	-12.52029402
170.000	4.000	2.330	4.545599937	4.189629555	7.831097932
170.000	4.000	2.660	6.250199795	5.187361717	17.00486564
170.000	4.000	3.000	7.007800102	6.933393002	1.061775444
255.000	4.000	2.000	5.113800049	3.940196514	22.94973451
255.000	4.000	2.330	5.966100216	5.935660839	0.51020559
255.000	4.000	3.000	8.144200325	10.17602253	-24.94808727
340.000	4.000	2.000	5.77670002	5.935660839	-2.751758248
340.000	4.000	2.330	6.344900131	5.686227322	10.38113754
340.000	4.000	2.660	7.765399933	8.928857803	-14.9825879
340.000	4.000	3.000	9.754099846	10.42545509	-6.882800649
				Média =	4.216795597

Os dados de dose mostrados na tabela 6.5 foram separados do conjunto total e não foram usados no treinamento. A rede gerada foi aplicada sobre esses dados e retornou o uma diferença média mostrada na tabela 6.5

Na área dois, foi feito o treinamento da rede usando a arquitetura GRNN.

Assim como para a área um, a seguir encontram-se os gráficos para linhas da coordenada y com valores de potência de 34, 85, 170, 255 e 340 watts.

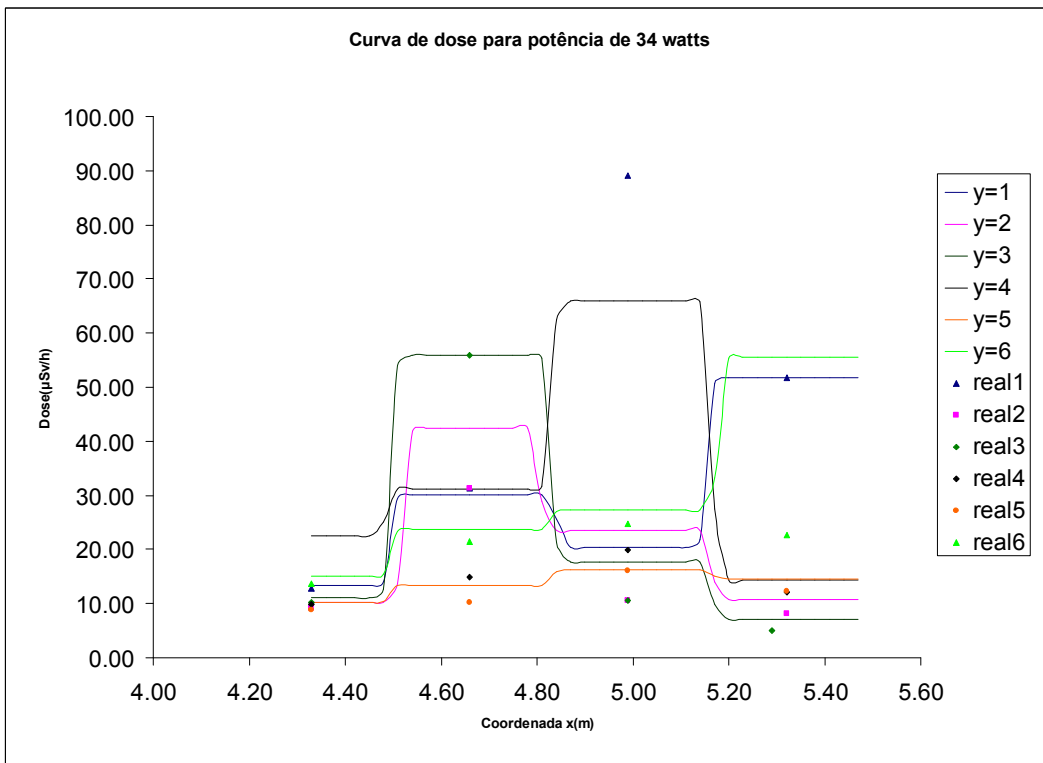


Figura 6.19 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 34 w.

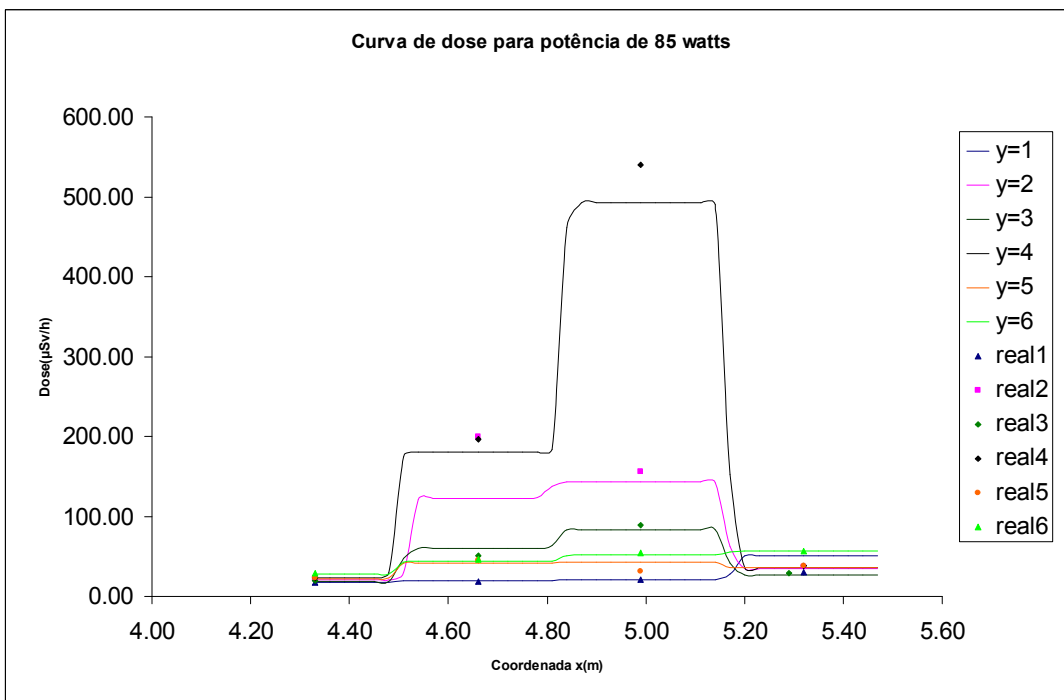


Figura 6.20 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 85 w.

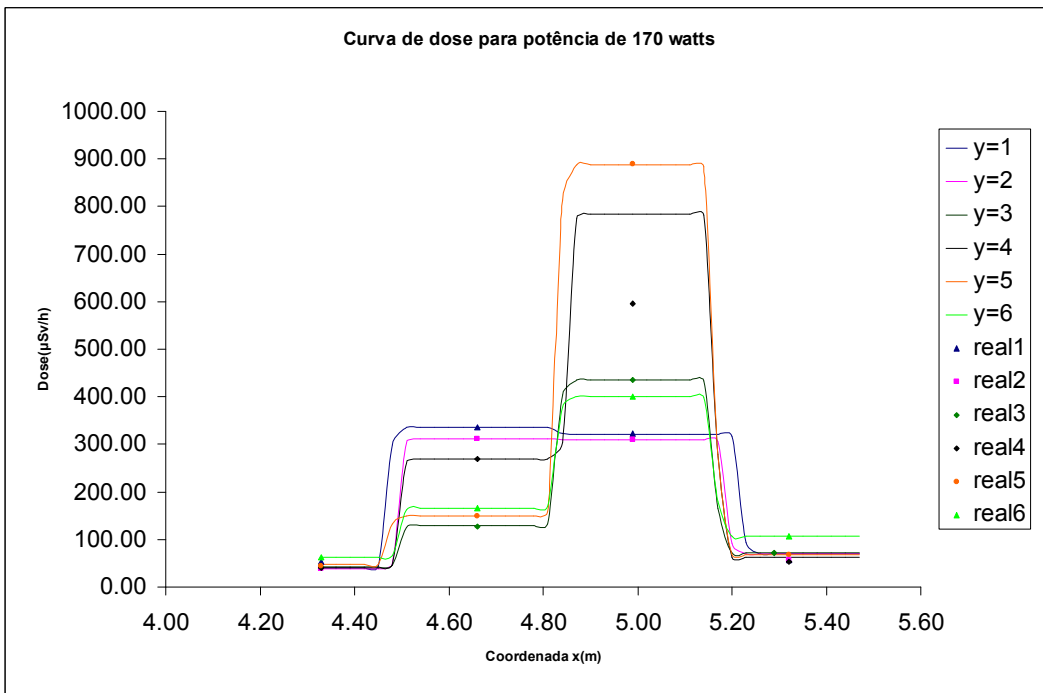


Figura 6.21 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 170 w.

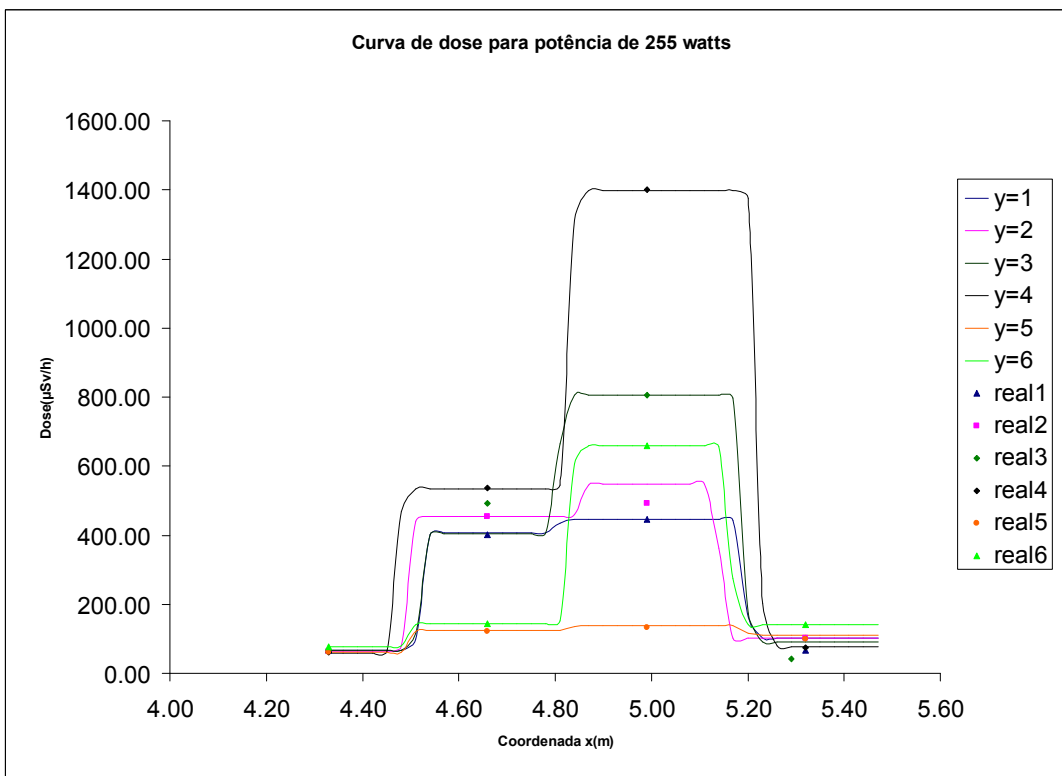


Figura 6.22 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 255 w.

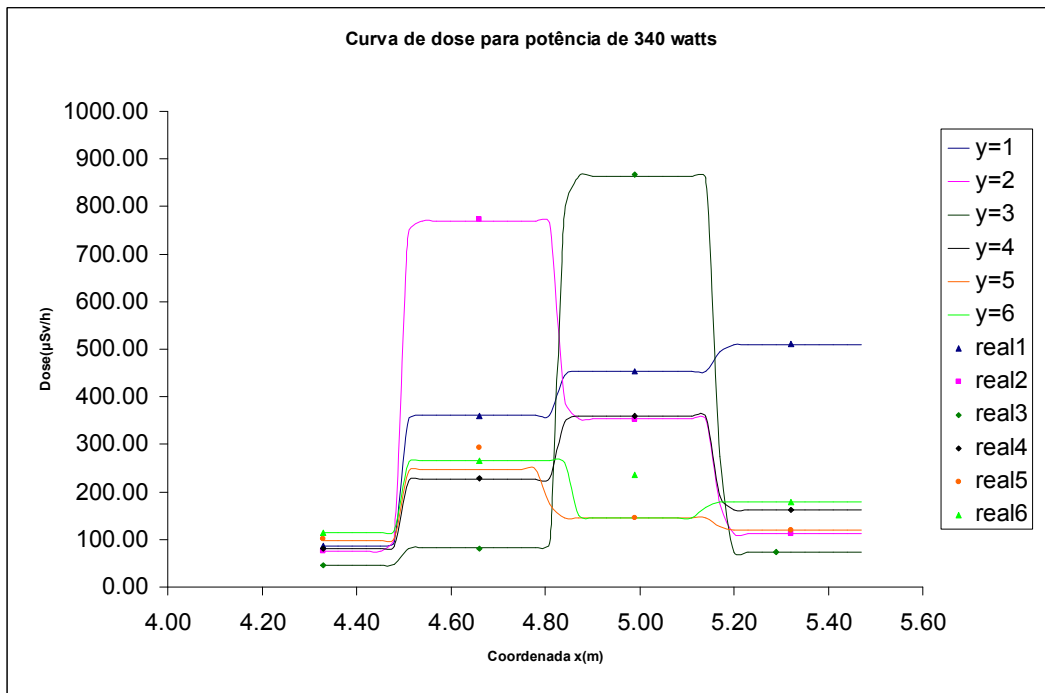


Figura 6.23 – Dose de radiação interpolada na área 2 para potência 340 w.

Nos gráficos da área dois podem-se ver duas características principais, os valores de dose crescem muito em relação à área um e seu perfil é bem diferente do perfil da área um, os valores de dose tem um pico entre os pontos 4.5 e 5.3 da coordenada x.

Assim como na área um, na Tabela 6.6 será apresentada a aplicação da rede neural treinada sobre os dados previamente separados da área dois.

Tabela 6.5 – Aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento.

Potência(m)	Y(m)	X(m)	Det1(usv/h)	Dose esperada(usv/h)	RNA(usv/h)	Diferença(%)
34.00	4.00	5.00	51.80	19.88699913	28.98723984	-45.7597481
85.00	3.00	4.66	30.54	51.13800049	56.13253403	-9.766775179
170.00	4.00	5.33	56.32	54.06792068	63.21297836	-16.91401771
255.00	2.00	5.00	66.80	492.4400024	553.9978027	-12.50056859
340.00	5.00	4.33	510.46	101.3290024	97.5378952	3.741384094
					Média	-16.2399451

Os dados foram separados manualmente usando, ao menos, um valor para cada potência.

Pode-se observar que:

- Para potências maiores, onde as doses são maiores, as diferenças são menores, o que realmente importa, pois são essas doses maiores que mais importam na segurança em áreas radiativas.
- Para doses menores, as diferenças são maiores devido à grande interferência da radiação de fundo.

Na área três, foi feito o treinamento da rede usando a arquitetura GRNN.

Assim como na área um e dois, a seguir encontram-se os gráficos das medidas experimentais em relação ao gráfico das medidas geradas pela função interpoladora.

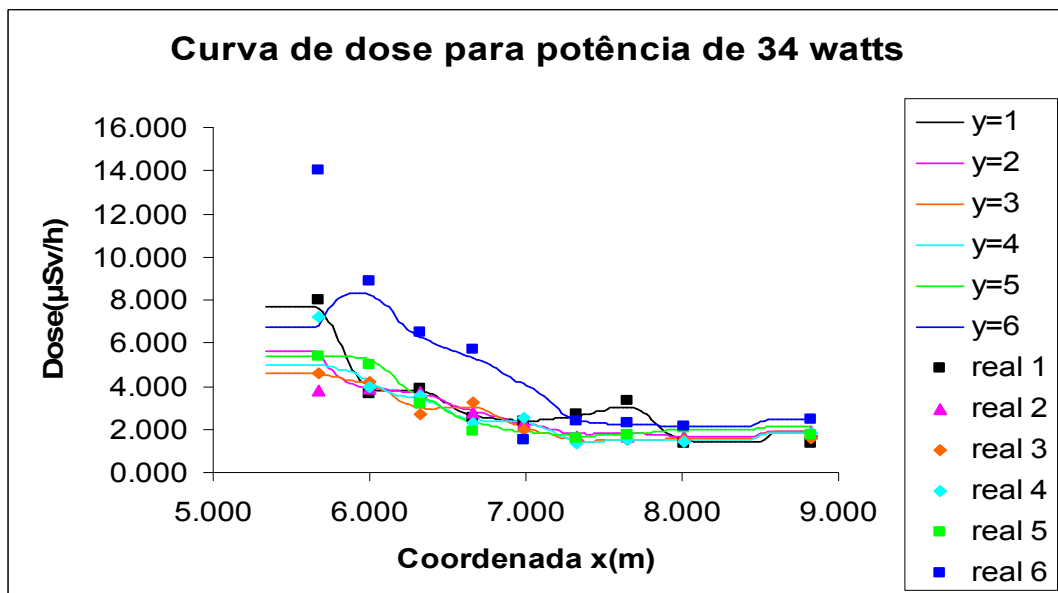


Figura 6.24 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 34 w.

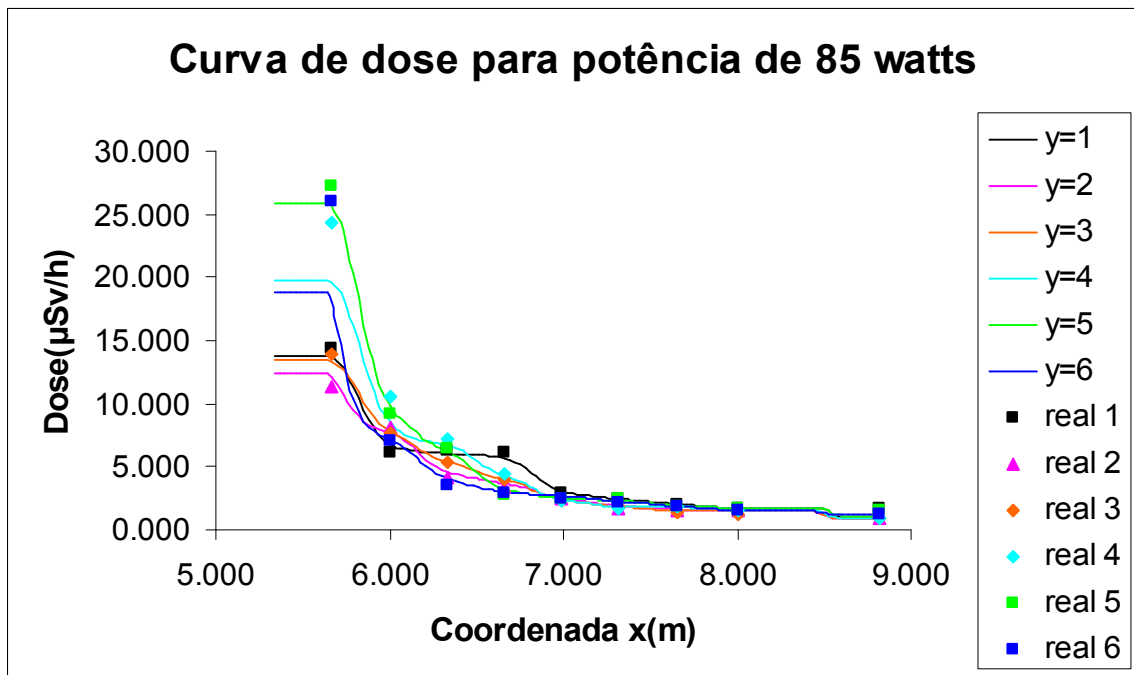


Figura 6.25 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 85 w.

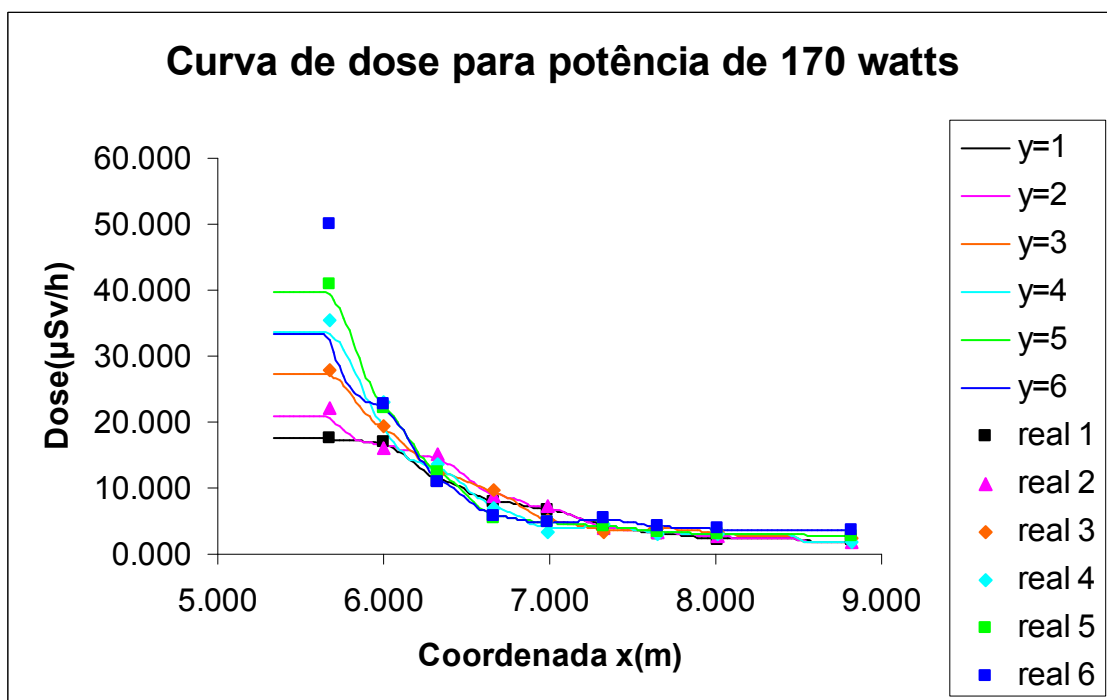


Figura 6.26 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 170 w.

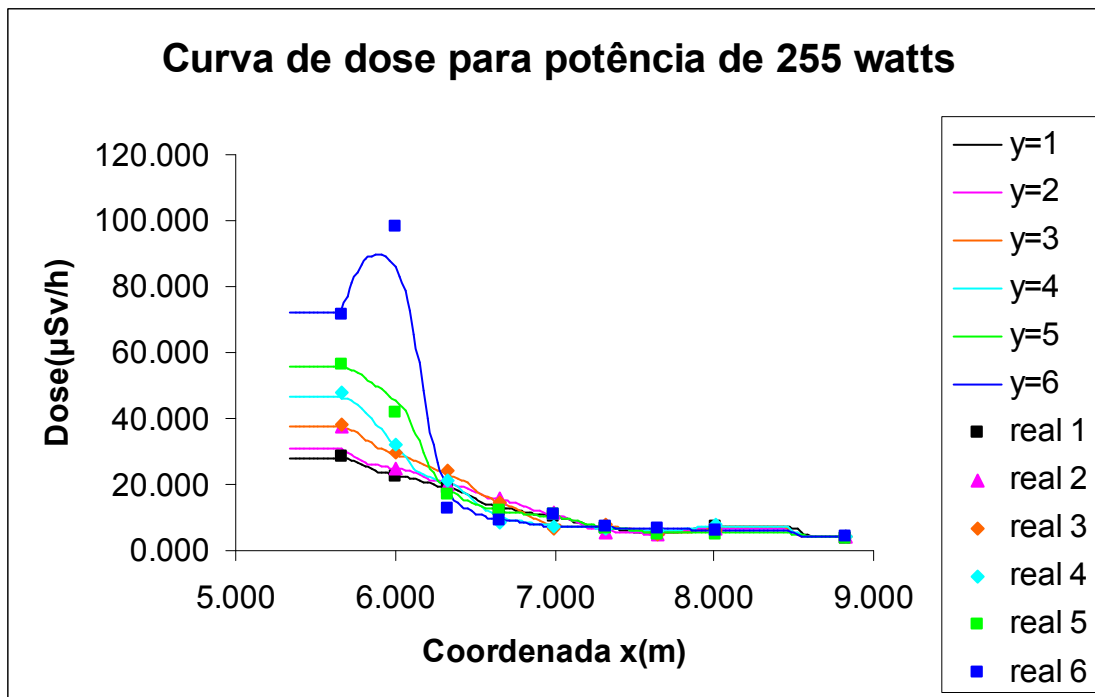


Figura 6.27 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 255 w.

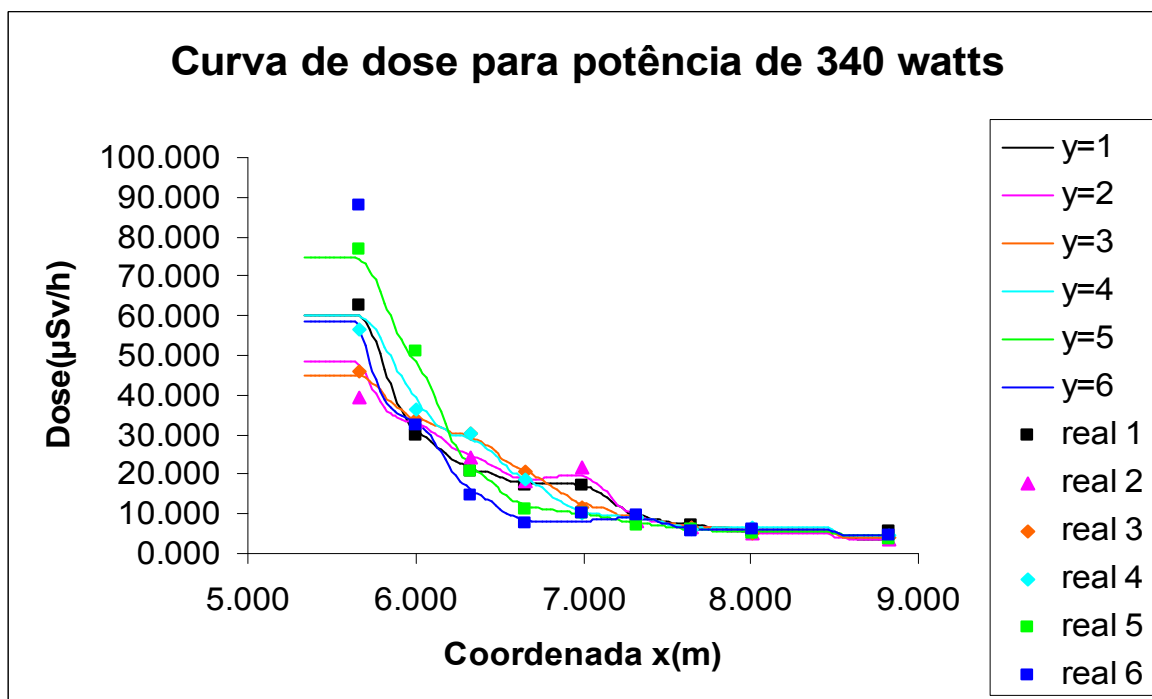


Figura 6.28 – Dose de radiação interpolada na área 3 para potência 340 w.

Para a área três o perfil é decrescente, pode-se relacionar isso ao afastamento da área dois e do canal J9, os valores são distintos das áreas um e dois, pode-se ainda identificar que após o ponto nove da coordenada x medem-se valores muito próximos ao background, o que também valida o método de separação por áreas.

Assim como na área um e dois, na tabela 6.6 será apresentada a aplicação da rede neural treinada sobre os dados previamente separados da área três.

Tabela 6.6 – Mostra a aplicação da rede sobre dados separados do conjunto de treinamento.

Potência(w)	Y(m)	X(m)	Dose esperada(usv/h)	RNA(usv/h)	Diferença(%)
34	3	8.00	1.51088	1.561907	-3.37728
34	3	9.00	1.6188	1.547268	4.418822
85	4	6.00	10.57616	8.49271	19.6995
170	3	8.00	3.2376	3.191471	1.424782
170	3	9.00	2.37424	1.95945	17.47043
170	4	5.66	35.39776	34.13197	3.575891
170	4	6.00	23.09488	21.02931	8.943856
255	3	8.00	6.04352	6.509478	-7.71005
255	3	9.00	4.53264	3.875351	14.50123
255	4	5.66	48.0244	47.45036	1.1953
255	4	6.00	31.8364	34.65208	-8.84421
340	3	9.00	3.99304	4.068816	-1.89769
340	4	5.66	56.76592	59.38742	-4.6181
340	4	6.00	36.58488	41.33485	-12.9834
				MÉDIA	2.271361

Todas as tabelas de validação mostram a capacidade de generalização da rede, pois está aplicando a rede sobre dados que a rede não conhecia até então, ou seja, não usada para o treinamento da RNA. A média das diferenças está baixa, essa média é que realmente interessa, pois a dose que a pessoa



recebe é a dose acumulada ao longo do espaço, logo a diferença da dose recebida é a diferença média mostrada nas tabelas apresentadas.

### 6.8.2 Resultado da Inserção do Código no Unreal.

Depois de inserido o código, é visualizada no HUD, Figura 6.27, a dose gama recebida pelo avatar, referente a cada posição, potência do reator e a medida do detector fixo.



Figura 6.27 – Janela de visualização(HUD), no Unreal, com a dose gama recebida acumulada ao longo do espaço e tempo.

## Capítulo 7

### 7.1 Conclusão

O principal objetivo dessa dissertação foi o desenvolvimento de um sistema de predição de doses de radiação para um ambiente virtual baseado em instalação sujeita a radiação, de tal forma que toda a informação de dose do ambiente real seja inserida no ambiente virtual em tempo real. Para este fim, foi adaptado o núcleo do jogo Unreal e feita sua conexão com a instalação real através de um sistema de rede computacional, as medidas de dose de radiação foram estimadas em perfil contínuo interpoladas por redes neurais artificiais atingindo o objetivo principal. A metodologia proposta foi aplicada no salão do Argonauta e agora é possível a monitoração, em tempo real, do perfil contínuo de dose de radiação gama e a visualização no Unreal.

O importante, na visão da radioproteção, é a dose gama recebida estocasticamente, ou seja, o acúmulo de dose ao longo do tempo e espaço. A média dos erros é satisfatória, pois essa média representa o acúmulo de dose.

Nas áreas um e três a dose de fundo interfere muito nas medidas, com isso as diferenças, entre as doses experimentais e as calculadas pela RNA, são maiores.

A interpolação proporcionou uma análise quantitativa da medida de dose gama dentro do salão do reator Argonauta e essas medidas são usadas no treinamento de funcionários através da plataforma de monitoramento desenvolvida neste trabalho, minimizando assim, a exposição às altas taxas de radiação, visto que cada pessoa já vai à instalação física sabendo como se comportam as radiações naquele local.

## 7.2 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento desse trabalho abre espaço para outro estudo, onde pode-se usar sensores de presença ou câmeras com reconhecimento de padrão em pontos estratégicos dentro do salão do reator, de tal maneira que quando uma pessoa esteja dentro do salão o núcleo do jogo receba além da potência do reator a posição dessa pessoa dentro da instalação física, logo a dose será agora recebida não pelo avatar e sim pelo funcionário que está dentro do salão e assim será conhecida, logo após a saída de dentro do Argonauta, a dose que essa pessoa tomou devido ao tempo de exposição dentro do salão.

Outro estudo pode medir a taxa de dose em diferentes alturas e interpolar no espaço  $R^3$ , podendo assim fazer uma representação de dose do corpo de uma pessoa e, conhecendo a dose em todo espaço, medir quanto cada órgão absorve dado esse total volumétrico.

## Capítulo 8

### Referências Bibliográficas

AUGUSTO, S. C., MÓL, A. C. A., JORGE, C. A. F., et al., 2007, “Use of Virtual Reality to Estimate Radiation Dose Rates in Nuclear Plants”. *2007 International Atlantic Conference – INAC 2007*, Santos, São Paulo, Brasil, Outubro 2007.

AGHINA, M. A. C.; Mól A.C.A ; JORGE, C. A. F. ; Pereira, C. M. N. A ; VARELA, T. F. B. ; CUNHA, G. G. ; LANDAU, L. . Virtual Control Desks for Nuclear Power Plant Simulation: Improving Operator Training. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 28, p. 6-9, 2008

Burdea, G., Philippe, C., 1994. *Virtual reality technology*. John Wiley & Sons, New York.

EpicGames. UnrealEngine2 Runtime Demo Version End-User License Agreement, <http://udn.epicgames.com/Two/UnrealEngine2RuntimeEULA.html>.

Fielding, R., Gettys, J., Mogul, J., Frystyk, H., Masinter, L., Leach, P., Berners-Lee, T., 1999. *Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1*, The Internet Society; <http://tools.ietf.org/html/rfc2616>.

Francis, G.A., Tan, H.S., 1999. Virtual reality as a training instrument. *The Temasek Journal* 7, 4–15.

GRECCO, Cláudio Henrique dos Santos ; SANTOS, Isaac Luquetti dos ; MÓL, Antônio Carlos de Abreu ; CARVALHO, Paulo Vitor Rodrigues de ; SILVA, A. C. F. ; Oliveira F. ; Dutra M., M. A. . Virtual Reality Technology as a Tool for Human Factors Requirements Evaluation in Design of the Nuclear Reactors Control Desks. In: *International Nuclear Atlantic Conference INAC 2007*, 2007, Santos. *International Nuclear Atlantic Conference INAC 2007*, 2007.

Halden virtual Reality centre. VRdose software. Disponível em:  
<<http://www2.hrp.no/vr/products/vrdose/download/pdf/vrdose-brochure.pdf>>  
acessado em 15 de julho de 2009.

Haykin, Simon. Redes Neurais: Princípios e práticas; trad. Paulo Martins Engel. – 2.ed. – porto Alegre : Bookman, 2001

Lewis, M., Jacobson, J., 2002. Introduction. Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on Game Engines in Scientific Research 45 (1), 27–31.

MOL, A ; JORGE, C ; COUTO, P ; AUGUSTO, S ; CUNHA, G ; LANDAU, L . Virtual environments simulation for dose assessment in nuclear plants. Progress in Nuclear Energy, v. 51, p. 382-387, 2009

MÓL, Antônio Carlos de Abreu ; LAPA, Celso Marcelo Franklin ; PEREIRA, Cláudio Marcio Nascimento Abreu ; ALMEIDA, José Carlos Soares de ; MARINS, Eugenio . Neural and Genetic-Based Approaches to Nuclear Transient Identification Including don't know Response. Progress in Nuclear Energy, Estados Unidos, v. 48, p. 268-282, 2006.

MÓL, A. C. A., GRECCO, C. H. S., CARVALHO, P. V. R., 2005, "Implementation of the Immersive Virtual Reality Laboratory in Nuclear engineering Institute". *2005 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005*. Santos, São Paulo, Brasil. 28 Agosto - 2 Setembro.

MÓL, Antônio Carlos de Abreu ; ALEXANDRE, Carlos ; COUTO, P. M. ; CARVALHO, Paulo Vitor Rodrigues de ; SANTOS, Isaac Luquetti dos ; GRECCO, Cláudio Henrique dos Santos . Virtual Environment Simulation as a Tool to Support Evacuation Planning. In: *International Nuclear Atlantic Conference, 2007, Santos. inac 2007, 2007*.

MÓL, Antônio Carlos de Abreu ; JORGE, C. A. F. ; COUTO, Pedro Mol . Using a Game Engine for VR Simulations to Support Evacuation Planning. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 28, p. 6-12, 2008.

Oliveira, M.V., Aghina, M.A.C., Soares, M., 1997. Sistema de monitoração de radiação 7027. In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Brazilian National Meeting on Nuclear Applications and 11<sup>th</sup> Brazilian National Meeting on Reactor Physics and Thermal Hydraulics*, Poços de Caldas, MG, Brazil, pp. 473–476.

Oliveira, M.V., Aghina, M.A.C., Mól, A.C.A., 2000. Sistema de monitoração de radiação 7027 do reator Argonauta. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> Brazilian National Meeting on Nuclear Applications, 8<sup>th</sup> General Congress on Nuclear Energy and 12<sup>th</sup> Brazilian National Meeting on Reactor Physics and Thermal Hydraulics, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 473–476.

PASTURA, V., 2003, “Energia Nuclear e Proteção Radiológica”. *Divisão de Proteção Radiológica – Instituto de Engenharia Nuclear – Comissão Nacional de Energia Nuclear*. Rio de Janeiro, Setembro 2003.

*proceedings of the Third International Conference on Education and Training in Radiological Protection – ETRAP 2005*. Bruxelas, 23-25 Novembro.

RÓDENAS, J., ZARZA, I., FELIPE, A., et al., 2005, “Generation of Dose databases for an Operator Training Application in Nuclear Facilities”.

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

Rosenbloom, A., 2003. Introduction. Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on A Game Experience in Every Application 46 (7), 28–31.

Stanney, Kay M. (Ed.), Handbook of Virtual environments: design, implementation, and applications, 2002

TAUHATA, L., SALATI, I.P.A., PRINZIO, R.D., PRINZIO A.R.D.

Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 3<sup>a</sup> v. abril/2001 – Rio de Janeiro – IRD/CNEN 234p.

Trenholme, D., Smith, S.P., 2008. Computer game engines for developing first-person virtual environments. *Virtual Reality* 12 (3), 181–187.

Ward Systems Group INC, direitos reservados 1997 - 2009  
< <http://www.wardsystems.com/engine.asp> >

WIKIPEDIA. *Radioatividade*. Wikipédia. Disponível em:  
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Radioatividade> > Acessado em: 10 junho. 2009.

Zyda, M., 2007. Introduction. *Communications of the Association for Computing Machinery (CACM) – Special Issue on Creating a Science of Games* 50 (7), 26–29.

Zyda, M., Hiles, J., Mayberry, A., Wardynski, C., Capps, M., Osborn, B., Shilling, R., Robaszewski, M., Davis, M., 2003. Entertainment R&D for defense. *IEEE Computer Graphics and Applications* 23 (1), 28–36.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)