

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DE UNIDADES INDUSTRIAIS UTILIZANDO A
TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE PARTÍCULA RADIOATIVA

Wilson dos Santos Vieira

2009



MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DE UNIDADES INDUSTRIAIS UTILIZANDO A TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE PARTÍCULA RADIOATIVA

Wilson dos Santos Vieira

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

Orientadores: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Rio de Janeiro

Abril de 2009

MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DE UNIDADES INDUSTRIAIS UTILIZANDO A
TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE PARTÍCULA RADIOATIVA

Wilson dos Santos Vieira

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

Aprovada por:

Prof. Delson Braz, D.Sc.

Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Prof. Luis Fernando de Oliveira, D.Sc.

Dr. José Ubiratan Delgado, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL DE 2009

Vieira, Wilson dos Santos

Método para a Avaliação de Unidades Industriais utilizando a Técnica de Rastreamento de Partícula Radioativa/ Wilson dos Santos Vieira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 103 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Delson Braz

Luis Eduardo Barreira Brandão

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 96-100.

1. Técnicas nucleares de medidas. 2. Radiotraçadores.
3. Rastreamento computadorizado partícula radioativa .

I. Bráz, Delson et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“Não importa onde você parou...
Em que momento da vida você cansou...
O que importa é que sempre é possível recomeçar.
Recomeçar é dar uma nova chance a si mesmo...
É renovar as esperanças na vida e, o mais importante...
Acreditar em você de novo.
Sofreu muito neste período? Foi aprendizado...
Chorou muito? Foi limpeza da alma...
Ficou com raiva das pessoas?
Foi para perdoá-las um dia...
Sentiu-se só diversas vezes?
É porque fechaste a porta até para os anjos...
Acreditou que tudo estava perdido?
Era o início da tua melhora...
Onde você quer chegar? Ir alto?
Sonhe alto... Queira o melhor do melhor...
Se pensarmos pequeno...
Coisas pequenas teremos...
Mas se desejarmos fortemente o melhor e, principalmente, lutarmos pelo melhor...
O melhor vai se instalar em nossa vida.
Porque sou do tamanho daquilo que vejo, e não do tamanho da minha altura.”

Carlos Drummond de Andrade

Para o meu filho Hagos.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, pelas oportunidades que tive para uma formação digna e saudável.

À Denise, minha esposa, pela paciência e compreensão nos vários momentos de ausência.

Ao Professor Delson Braz, meu orientador do Programa de Engenharia Nuclear, por ter acreditado no meu projeto durante todos esses anos e pelas críticas positivas e pressões necessárias para que o trabalho final tivesse alto padrão de qualidade acadêmica .

Ao Doutor Luis Eduardo Barreira Brandão, também orientador, Coordenador do Laboratório de Traçadores Radioativos do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), pela mudança de objetivo no momento correto, logo no início da tese, por ter disponibilizado o laboratório para todas as experiências e pela excelente orientação na fase experimental da metodologia.

Ao Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa, meu Chefe no Serviço de Tecnologia e Engenharia de Reatores (SETER-IEN) e companheiro de estudos desde a graduação, e a todos os colegas do setor pela acolhida, apoio e incentivo.

À equipe do Serviço de Engenharia do IEN, em especial aos colegas Mônica da Silva Viana e Anísio Marques Garrido Filho, e ao colega João Carlos dos Santos Pereira, lotado no Serviço do Reator Argonauta, pela dedicada confecção de algumas das figuras utilizando o programa AUTOCAD 3D.

Aos colegas Francisco Canindé, Marcos Aurélio de Andrade Pinheiro e André Nunes Barbosa, responsáveis pelas irradiações das esferas de ouro no Reator Argonauta do IEN

Aos colegas colaboradores do Laboratório de Radiotraçadores, em especial o Vítor Santos Ramos e o Ricardo Elias Candeiro, pela ajuda técnica e colaboração na fase experimental da tese.

A todos os professores e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear que cuidaram da minha formação na pós-graduação.

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

MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DE UNIDADES INDUSTRIAIS UTILIZANDO A TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE PARTÍCULA RADIOATIVA

Wilson dos Santos Vieira

Abril/2009

Orientadores: Delson Braz

Luís Eduardo Barreira Brandão

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho, foi desenvolvido um método para otimizar a aplicação da técnica de rastreamento computadorizado de partícula radioativa (CARPT) em unidades industriais. Neste método, um algoritmo de reconstrução de imagens bayesiano foi adaptado para o rastreamento da trajetória de uma partícula radioativa em meios fluidos. Com esta abordagem, o rastreamento em questão pôde ser realizado utilizando-se um sistema experimental composto por quatro detectores de radiação gama. Para a execução do método, foi desenvolvido um algoritmo específico para a visualização das posições instantâneas ocupadas pela partícula colocada no interior de uma unidade cilíndrica. Em seguida, foram realizados experimentos para a validação do método utilizando-se uma esfera de ^{198}Au com 1 mm de diâmetro e um tanque de mistura rápida em escala reduzida. De acordo com os resultados obtidos, quanto menor for o tamanho da partícula radioativa melhor será a resolução espacial das imagens das posições rastreadas e o desvio máximo encontrado entre os valores teóricos e experimentais destas posições foi inferior a 8%, o que garante que o método pode ser aplicado para o diagnóstico de unidades industriais.

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

METHOD FOR THE EVALUATION OF INDUSTRIAL UNITS USING THE RADIOACTIVE PARTICLE TRACKING TECHNIQUE

Wilson dos Santos Vieira

April/2009

Advisors: Delson Braz

Luís Eduardo Barreira Brandão

Department: Nuclear Engineering

In this work, a method was developed to optimize the application of the computer automated radioactive particle tracking ("CARPT") technique in industrial units. In this method, an Bayesian image reconstruction algorithm was adapted for the screening of the radioactive particle trajectory when it is immersed in fluids. With this approach, the screening in question was carried out using an experimental system consisting of four gamma radiation detectors. To implement the method, an algorithm was developed specifically for the visualization of the instantaneous positions occupied by the particle placed within a cylindrical unit. Then, experiments were performed to validate the method using the radioisotope ^{198}Au shaped in an 1 mm diameter sphere and a stirred tank in scale. According to the results, the smaller the radioactive particle size better the spatial resolution of the tracked positions' images and the maximum deviation found between theoretical and experimental values of these positions was less than 8%, which ensures that the method can be applied to the diagnosis of industrial units.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 Nomenclatura	1
I.2 Introdução	2
I.3. Objetivos	5
I.4 Relevância	5
I.5 Originalidade	6
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
II.1 Nomenclatura	7
II.2 Revisão bibliográfica	8
II.3 Fundamentos Teóricos	12
II.3.1 Metodologia para análise de curvas de distribuição do tempo de residência	12
II.3.2 Princípios da técnica de radiotraçadores	14
II.3.3 Principais fenômenos avaliados pela técnica de radiotraçadores	17
II.4 Planejamento de um Ensaio	18
II.4.1 Seleção do Radioisótopo	20
II.4.2 A realização de um Ensaio	20
II.4.3 Avaliação do Ensaio	21
II.5 Os princípios da Técnica de Rastreamento Computadorizado de Partícula Radioativa (CARPT)	21
II.5.1 A técnica CARPT e suas aplicações	21
II.5.2 Relação entre as contagens no detector e a Atividade da partícula	22
II.5.3 Método de otimização para a localização da partícula radioativa	22
II.5.4 O algoritmo iterativo da Máxima Expectância (EM)	24
Capítulo III METODOLOGIA DA PESQUISA	27
III.1 Nomenclatura	27
III.2 Método para a localização da partícula radioativa	28
III.2.1 Cálculo das distâncias entre a fonte e o detector	31

III.2.2 Desenvolvimento do algoritmo EM	32
III.3 Estrutura do algoritmo	33
III.4 A seleção do radioisótopo e a preparação da partícula radioativa	39
III.5 Aplicação do método utilizando valores simulados das contagens	43
III.6 Otimização das coordenadas do sistema de detecção	45
III.7 Otimização do sistema de aquisição e tratamento de dados	48
III.8 Ensaios	50
III.8.1 Experimentos utilizando a geometria anel	51
III.8.2 Experimentos utilizando a geometria L	53
CAPÍTULO IV RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
IV.1 Aplicação do método utilizando valores simulados das contagens	55
IV.2 Otimização da geometria do sistema de detecção	56
IV.3 Otimização do sistema de aquisição de dados	56
IV.3.1 Otimização dos quatro sistemas de detecção em relação a ^{137}Cs e ^{198}Au	56
IV.3.2 Determinação da resposta do detetor em função da distância e do ângulo	60
IV.4 Exames preliminares	62
IV.4.2 Ensaios realizados com a geometria anel	72
IV.4.2.1 Ensaio B	73
IV.4.2.2 Ensaio C	76
IV.4.2.3 Ensaio D	79
IV.4.2.4 Ensaio F	83
IV.4.2.5 Ensaio G	86
IV.4.3 Ensaios realizados com a geometria L	89
IV.4.3.1. Ensaio O	89
Capítulo V CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
Anexo I Função principal do algoritmo	101

LISTA DE FIGURAS

II.1 Diagrama esquemático da metodologia de traçadores (IAEA, 1990)	12
II.2.Fluxograma do planejamento de uma prática com traçadores radioativos	19
III.1.Esquema da unidade cilíndrica inscrita na matriz de reconstrução	30
III.2 Detectores dispostos na geometria anel em torno da unidade cilíndrica do LRI	34
III.3 Detectores dispostos na geometria L em torno da unidade cilíndrica do LRI	34
III.4.Diagrama de fluxo do algoritmo	35
III.5 Arranjo experimental dos detectores 1 a 4 na geometria anel(3D)	45
III.6 Arranjo experimental dos detectores 1 a 4 na geometria L (3D)	46
III.7 Esquema simplificado para a montagem de cada um dos sistemas de detecção	50
III.8 Arranjo detectores montado para a realização dos ensaios - geometria A2	51
III.9 Arranjo detectores montado para a realização de ensaios - geometria L2	53
IV.1 Espectros dos detectores 1 a 4 para uma fonte de calibração padrão de ^{137}Cs	57
IV.2 Espectro integral do detector 1 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)	58
IV.3 Espectro integral do detector 2 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)	58
IV.4 Espectro integral do detector 3 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)	59
IV.5 Espectro integral do detector 4 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)	59
IV.6 A dependência angular, ao longo do eixo X, de um dos detectores NaI:TI (5,08 cmx5,08 cm) utilizado nos ensaios	60
IV.7 A dependência angular, ao longo do eixo Z, de um dos detectores NaI:TI (5,08 cmx5,08 cm) utilizados nos ensaios	61
IV.8 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s com apenas 1 iteração	63
IV.9 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 2 iterações	64
IV.10 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 3 iterações	65
IV.11 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 6 iterações	66
IV.12 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 10 iterações	67
IV.13 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 15 iterações	68

IV.14 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 1 e 2 iterações	69
IV.15 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 3 e 6 iterações	70
IV.16 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 10 e 15 iterações	71
IV.17 Vista ampliada da imagem da superfície do voxel no plano XZ . Esta é a posição calculada da esfera 1 em $t = 25$ s	72
IV.18 Variação periódica das contagens registradas nos detectores 1 a 4, durante o ensaio B, acompanhando o movimento de rotação da esfera1	73
IV.19 Posições da esfera 1 de $t = 21,00$ s a $t = 23,00$ s. As imagens no plano XY estão na coluna (a) e as imagens no plano XZ estão na coluna (b)	74
IV.20 Posições da esfera 1 de $t = 24,00$ s a $t = 26,00$ s. As imagens no plano XY estão na coluna (a) e as imagens no plano XZ estão na coluna (b)	75
IV.21 A variação periódica no tempo das contagens registradas nos detectores 1 a 4 durante o teste C	76
IV.22 Posições da esfera 1 de $t = 20,50$ s a $t = 21,50$ s (intervalo de 0,50 s)	77
IV.23 Posições da esfera 1 de $t = 22,00$ s a $t = 23,00$ s (intervalo de 0,50 s)	78
IV.24 Ensaio D: a variação nas contagens registradas nos detectores 1 a 4 de acordo com o movimento de rotação da esfera 1	79
IV.25 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 1 de $t=25,00$ s a $t=25,80$ s (intervalo igual a 0,40s)	80
IV.26 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 1 de $t=26,20$ a $t=27,00$ s (intervalo igual a 0,40s)	81
IV.27 O perfil de concentrações no plano XY e na altura $Z = 16,0$ cm gerado para o movimento da esfera 1 no ensaio C durante o intervalo de 20,0 s a 35,0 s	82
IV.28 A variação em função do tempo das contagens registradas nos detectores durante o teste F	83
IV.29 Posições da esfera 1 em $t = 210$ s, $t = 213$ s e $t = 216$ s. Projeções nos planos XY e XZ	84
IV.30 Posições da esfera 1 em $t = 218$ s, $t = 221$ s e $t = 223$ s. Projeções nos planos XY e XZ	85
IV.31 A variação das taxas de contagens registradas nos detectores durante o teste G	86
IV.32 Posições da esfera 1 em $t = 380,50$ s, $t = 381,50$ s e $t = 382,50$ s projetadas nos planos XY e XZ	87

IV.33 Posições da esfera 1 em $t = 383,50$ s, $t = 384,50$ s e $t = 385,50$ s	88
projetadas nos planos XY e XZ	
IV.34 A variação das contagens registradas nos detetores em função da posição instantânea da esfera 2	90
IV.35 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 2 de $t = 398,00$ s a $t = 400,00$ s (intervalo de 1 s)	91
IV.36 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 2 de $t = 401,00$ s a $t = 403,00$ s (intervalo de 1 s)	92

LISTA DE TABELAS

I.1 Os principais setores da indústria baseados em processos multifásicos	3
I.2 Elementos-chave na Engenharia Química atual	4
II.1 Métodos de produção de radioisótopos	13
II.2 Aplicações industriais de traçadores radioativos	14
III.1 Propriedades físico-químicas dos isótopos pré-selecionados	41
III.2 Fluxos de nêutrons no Reator Argonauta -Potência de operação = 340 W	41
III.3 Valores mínimos da Atividade em função do tempo de exposição para a obtenção de mais de 20 contagens no ar, a 10 cm de distância da fonte.	42
III.4 As características das partículas fabricadas para os ensaios	43
III.5 Posições simuladas da partícula radioativa	44
III.6.Os principais parâmetros da avaliação	44
III.7 Coordenadas dos detectores na geometria anel	46
III.8 Coordenadas dos detectores na geometria L	46
III.9 Geometria anel: detectores na configuração A1 e distribuição radioativa no plano $z = 30$ cm	48
III.10 As fontes-padrão utilizadas na determinação da eficiência de fotopico dos detectores (RAMOS, 2006)	49
III.11 Principais parâmetros dos experimentos realizados com a geometria anel	52
III.12 Ensaio realizado com a geometria anel	52
III.13 Principais parâmetros dos experimentos realizados com a geometria L	54
III.14 Ensaio realizado com a geometria L	54
IV.1 Valores das coordenadas de P1 a P10 avaliados pelo algoritmo	55
IV.2 Comparação das somas das taxas de fluência na geometria anel	56
IV.3 Comparação das somas das taxas de fluência na geometria L	56
IV.4 Propriedades dos quatro detectores cintiladores utilizados nos ensaios	57
IV.5 Seleção dos ensaios realizados - geometria anel	72
IV.6 Seleção dos ensaios realizados - geometria L	89

Capítulo I

INTRODUÇÃO

I.1 Nomenclatura

I.1.1 Lista de abreviaturas

CARPT - sigla em Inglês da Técnica de Rastreamento Computadorizado de Partícula Radioativa

De-Nox - processo de remoção de óxidos de nitrogênio, como o NO (denitrificação)

De-Sox - processo de remoção de óxidos de enxofre, como o SO₂ (desulfurização)

DFC - Dinâmica dos Fluidos Computacional

DME - éter dimetílico (CH₃OCH₃)

DTR - Distribuição do Tempo de Residência

HD - molécula diatômica composta pelos dois isótopos do hidrogênio: ¹H e ²H

HDM - reação de hidrodessmetalização

HDN - ácido dinitramínico HN(NO₂)₂

MEOH - álcool metílico (CH₃OH)

MTBE - bioéter metil-terc-butílico (C₅H₁₂O)

PET - tomografia por emissão de pósitrons

PEPT - rastreamento de partículas por emissão de pósitrons

PPO - poli (óxido de fenileno)

SPECT - tomografia computadorizada por emissão de fóton único

I.2 Introdução

Em um processo industrial, durante as transformações pelas quais passam as substâncias que compõem a matéria-prima, ocorrem variações das condições do sistema (como as condições de temperatura, pressão, pureza, concentração, etc). Dependendo do estágio tecnológico do processo, a otimização dessas condições pode aumentar significativamente a eficiência econômica.

Atualmente, a preocupação com o impacto da atividade industrial sobre o meio ambiente é significativa, sobretudo com a influência da mesma sobre o aquecimento global. O consumo exagerado de energia na indústria demanda a queima de quantidades cada vez maiores de combustíveis, gerando os gases causadores do efeito estufa (como o monóxido de carbono). Neste aspecto, o fator ambiental é relevante para a otimização das unidades industriais.

O grau de otimização de um processo depende do estágio tecnológico da indústria, do controle da produção, de ações humanas derivadas da política da empresa e das exigências de licenciamento e fiscalização do governo. Portanto, há uma demanda por métodos que facilitem a aquisição e o tratamento de dados para a otimização operacional na Indústria, visando ao aumento da eficiência do processo e a preservação do meio ambiente.

A visualização científica é a área do conhecimento que abrange o conjunto de técnicas empregadas para a visualização de dados científicos associados a regiões de um volume visando sua exploração e compreensão (SEIXAS, 2006). Ela não se limita a uma determinada aplicação e possui inúmeros recursos tecnológicos. A visualização dos dados volumétricos pode ser tridimensional ou bidimensional e, no caso bidimensional, os dados de interesse são projetados em planos para sua melhor compreensão. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) é uma destas técnicas de visualização volumétrica cujo objetivo é a simulação dos movimentos de fluidos, com ou sem trocas de calor, utilizando como ferramenta a computação (FORTUNA, 2000). O campo de estudo da DFC abrange desde o movimento de um fluido no interior de uma tubulação até o estudo do movimento de ar em torno da asa de um avião.

Um processo de produção industrial é, em geral, complexo, e deve ser dividido em etapas para que se possa avaliar com rigor as possíveis causas de problemas técnicos ou então melhorar o rendimento do processo. As etapas, que são caracterizadas por princípios fundamentais independentes das outras, são definidas como operações unitárias e podem ser classificadas em três grandes grupos, onde o

primeiro envolve os processos mecânicos sobre sólidos particulados, fluidos e sistemas sólidos - fluido, o segundo está relacionado com o transporte de massa e o terceiro com o transporte de calor. Estes dois últimos são descritos pela teoria dos Fenômenos de Transporte (DALEFE, 2007).

No âmbito industrial, mais de 99% das operações unitárias operam com fluidos bifásicos ou trifásicos, compreendendo uma variada gama de aplicações, como mostrado na tabela I.1(DUDUKOVIC, 2007).

Tabela I.1. Os principais setores da indústria baseados em processos multifásicos

SETOR	PRODUTO/PROCESSO
Síntese e conversão de gás natural	MeOH, DME, MTBE, etc.
Produção de energia	Nuclear, óleo, biocombustíveis
Produção de insumos químicos	Aldeídos, álcoois, aminas, ácidos, etc.
Produção de insumos farmacêuticos	Remédios, fragrâncias, etc.
Conversão de biomassa em energia	Biodiesel, etanol, metanol, óleos, etc.
Refino de petróleo	HD, HDN, HDM, combustíveis, etc.
Produção de polímeros	Policarbonatos, PPO, plásticos, etc.
Tratamento de água e despoluição ambiental	De-Nox, De-Sox, processos "verdes", etc.

A instalação de um processo novo na indústria é precedida por testes porque as empresas, obviamente, evitam o risco de investir em uma nova unidade industrial e depois verificar que sua performance não atende às metas de eficiência e às exigências ambientais. Nos primórdios da otimização de unidades industriais, predominava a intuição e a regra da tentativa e erro: primeiro, testava-se o novo processo em escala reduzida, em seguida, construía-se uma planta semi-profissional para ensaios (ou planta-piloto) e, por último, o setor produtivo comprava o processo se ele fosse bem sucedido nas etapas anteriores.

Atualmente, o tempo decorrido entre o primeiro teste em escala e a implementação final do processo é bem menor do que no passado devido aos avanços na modelagem de fenômenos de transporte. Como consequência, a performance do processo na planta industrial final deve ser conhecida já na escala da unidade industrial, o que obriga o projetista a elaborar modelos de fluidos mais

complexos, de acordo com as escalas apresentadas na tabela I.2 (DUDUKOVIC, 2007).

Tabela I.2. Elementos-chave na Engenharia Química atual

Escala	Campo de estudo	Método
Molecular	Interações cinéticas	Dinâmica molecular
Partícula	Leis do movimento	Equações Stefan Maxwell
Unidade industrial	Padrões do fluido, da mistura e do contato entre as fases	Modelos DFC validados
Processos de produção	Performance e controle das unidades industriais	Modelos estacionário e transiente

Para a validação dos modelos DFC elaborados na escala da unidade industrial, é preciso verificar com experimentos alguns parâmetros relativos aos fenômenos de transporte. Os parâmetros mais importantes para a caracterização de fluidos heterogêneos são (DUDUKOVIC, 2005):

1. Os padrões de variação espacial e temporal dos perfis de velocidade;
2. os padrões de distribuição e mistura das fases ;
3. a Distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido no sistema.

Para a determinação experimental dos dois primeiros parâmetros, podem ser utilizadas técnicas de visualização de fluidos (CHAOUKI et al., 1997, DYAKOWSKI, 1996). Porém, algumas delas, que se baseiam no posicionamento de sensores em contato direto com o fluido, podem provocar alterações físicas e ou químicas no sistema. Além disso, há técnicas não-invasivas baseadas em métodos ópticos que são inadequadas para análises em sistemas opacos muito densos.

Há também técnicas de reconstrução de imagens, como a tomografia por emissão dos tipos PET, PEPT e SPECT, que são utilizadas para a caracterização de processos (PARKER et al., 1993, PARKER et al.,1994, PARKER et al.,1995, LEGOUPIL et al, 1997).

A avaliação minuciosa das várias técnicas de visualização de fluidos conduz à conclusão de que os métodos não-invasivos baseados no espalhamento ou na absorção da radiação gama no sistema são mais adequados para a caracterização do deslocamento de fluidos como, por exemplo, a metodologia que emprega, conjuntamente, as técnicas de tomografia computadorizada (TC) e de Rastreamento Computadorizado de Partícula Radioativa (CARPT) (DUDUKOVIC, 2005).

A técnica CARPT é uma técnica não-invasiva que utiliza um radiotraçador na forma de partícula única para a determinação de padrões de deslocamento de fluidos

e para o desenvolvimento de modelos numéricos para sistemas dinâmicos multifásicos. Com esta técnica, pode-se visualizar perfis dos campos de velocidade dos fluidos e diagnosticar fenômenos nos processos industriais relacionados com a dinâmica dos fluidos (como recirculações, turbulências, zonas de segregação, difusividades, etc).

I.3 Objetivos

I.3.1. Objetivo principal

Desenvolver e validar um método para a localização instantânea da partícula radioativa nas aplicações industriais da técnica CARPT que seja mais prático que os métodos atuais.

I.3.2 Objetivos secundários

- 1) Aprimorar a etapa de preparação de um ensaio utilizando a técnica CARPT.
- 2) Elaborar um algoritmo para implementar o novo método de localização da partícula radioativa.

I.4 Relevância

No contexto atual, a grande preocupação do setor produtivo é com a redução do custo, o respeito ao meio ambiente e a responsabilidade social. Estas metas são atingidas com investimentos na pesquisa e desenvolvimento de novos métodos de produção e controle de qualidade. A técnica CARPT, além de ser uma ferramenta poderosa de diagnóstico, poderá ser executada com maior praticidade e menor custo se incorporar o novo método de localização da partícula radioativa, que reduz ao mínimo a quantidade de detectores de radiação empregada nos ensaios e diminui o tempo de preparação dos mesmos.

Como ainda não há relatos do emprego da técnica CARPT no Brasil, este trabalho pode ser considerado o pioneiro no desenvolvimento desta técnica no âmbito nacional. Ele disponibiliza mais uma técnica nuclear para a otimização de processos dinâmicos no parque industrial brasileiro.

I.5 Originalidade

Na técnica CARPT, é fundamental a resolução do seguinte problema inverso: as posições consecutivas percorridas por uma partícula radioativa em determinado intervalo de tempo devem ser conhecidas em função dos valores das contagens registradas pelos detectores de radiação.

O princípio do método proposto é a reconstrução da imagem de um pequeno volume do espaço onde se encontra a partícula radioativa, em analogia com os métodos usados nas aplicações médicas de tomografia por emissão de fótons. Nestas aplicações, os detectores cintiladores são colimados para que os pontos do objeto, cuja imagem se deseja observar, sejam determinados em função da Atividade do radioisótopo presente em cada ponto. O sistema tomográfico identifica um ponto do objeto com Atividade não nula quando ele emite feixes de radiação gama que atingem pelo menos dois detectores colimados, isto é, quando o ponto está na intersecção de duas retas que passam pelos centros de dois ou mais detectores. Geralmente, estes detectores são dispostos ao redor do objeto em uma geometria hexagonal e a imagem total do objeto é formada pela reunião das imagens dos pontos detectados a cada instante, empregando-se métodos matemáticos de reconstrução de imagens. A tomografia por emissão utilizada na indústria com base neste princípio ainda é pouco difundida e requer um número elevado de detectores colimados.

No método proposto, a estratégia utilizada para substituir a condição de colimação dos detectores para que o ponto do objeto esteja na intersecção de retas normais às faces dos mesmos foi criar um fator de correção que exprima a probabilidade da partícula radioativa estar em uma determinada região da unidade industrial. A cada posição instantânea dos elementos de volume do fluido corresponde um valor único deste fator de correção que varia em função da relação entre as contagens registradas pelos detectores, a Atividade conhecida da partícula e as propriedades do meio, como a atenuação da radiação gama. Deste modo, a imagem da posição da partícula é determinada utilizando-se detectores sem colimação na abertura, bastando para isto apenas quatro deles.

Capítulo II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1 Nomenclatura

II.1.1 Lista de símbolos

A - Atividade do radioisótopo

B_g - valor das contagens devido à radiação de fundo medido durante t_b

c - taxa líquida de contagens no detector

E(γ_i) - valor esperado do número de contagens no detector i contidas no conjunto γ_i

E(t) - função de distribuição do tempo de residência de um fluido

f_j - valor esperado do número de fótons emitidos pelo elemento j e detectados por algum dos m detectores

f - vetor constituído pelos valores médios do número de fótons emitidos pelos elementos f_j

I(t) - função de distribuição da idade interna de um fluido

N - valor das contagens de fótons na energia do fotopico medido no detector durante t_a

N_j - função densidade de probabilidade do número de fótons emitidos pelo elemento j, por unidade de área e com valor esperado v_j

n_i - número de contagens no detector i que pertencem ao conjunto γ_i

p_{ij} - probabilidade do fóton emitido pelo elemento j ser detectado no detector i, sendo função do arranjo geométrico dos detectores e do(s) coeficiente(s) de atenuação do(s) meio(s);

Q - vazão do fluido

r_i - distância entre a fonte radioativa e o detector i,

t_a - tempo de aquisição das contagens

t_b - tempo de medição da radiação de fundo

t_m - tempo morto do detector

V_T - volume total do sistema

V_U - volume útil do sistema

V_{ZM} - volume do sistema ocupado por uma zona morta

W - matriz de probabilidades formada pelo conjunto de probabilidades de um fóton, quando emitido por cada um dos elementos da matriz de reconstrução, ser detectado por cada um dos detectores

ε - eficiência do detector no fotopico

γ_i - soma das funções densidade de probabilidade do número de fótons emitidos por todos os elementos da matriz de reconstrução e detectados no detector i

τ - tempo médio de residência de um fluido

τ_{teo} - tempo médio de residência teórico

τ_{ZM} - tempo médio de residência sob influência de uma ou mais zonas mortas

$\Lambda(t)$ - função intensidade

Ω - ângulo sólido subentendido pelo detector em relação à posição da partícula

II.1.2 Lista de abreviaturas

CARPT - Técnica de Rastreamento Computadorizado de Partícula Radioativa

CFB - unidade industrial do tipo leito fluidizado circulante

CSTR - unidade industrial onde o fluido é agitado continuamente desde que entra até o instante em que sai da unidade

DFC - Dinâmica dos Fluidos Computacional

$^3\text{H}_2\text{O}$ - óxido de trítio

HTO - óxido de alta temperatura

HTGR - Reator a gás de alta temperatura

NaOH - hidróxido de sódio

TC - tomografia computadorizada

II.2 Revisão bibliográfica

Na maioria dos ensaios que empregam radiotraçadores, a detecção da radiação é efetuada em pontos externos da unidade industrial (geralmente na entrada e na saída do fluxo). A evolução das pesquisas nesta área resultou na elaboração de um relatório técnico pela Agência Internacional de Energia Atômica que recomenda a integração das técnicas de radiotraçadores e DFC na avaliação de processos em unidades industriais para garantir maior confiabilidade aos projetos (AIEA, 2004).

Desde a década de 1960, um número reduzido de pesquisadores da Área de métodos radiométricos dirigiu seus esforços para a visualização dos processos industriais como forma alternativa para a caracterização de fluidos e validação dos modelos teóricos referentes à sua dinâmica.

KONDUKOV et al (1964) foi o pioneiro na determinação experimental do campo de velocidades de fluidos no interior de leitos fluidizados utilizando o

rastreamento de partícula radioativa. Porém, a qualidade da informação obtida era limitada pelo atraso tecnológico dos equipamentos e da técnica.

Na década de 1980, a Universidade de Illinois desenvolveu uma versão aprimorada da técnica CARPT para a determinação dos padrões de recirculação de partículas sólidas em leitos fluidizados a gás. LIN et al. (1985) utilizaram doze detectores cintiladores dispostos em torno da secção transversal da coluna e uma partícula de ^{46}Sc construída com a mesma densidade e dimensões das partículas de vidro traçadas.

Na década de 1990, um trabalho de cooperação entre dois centros de pesquisa, um da Universidade Atlântica da Flórida e outro da Universidade de Washington, permitiu o desenvolvimento de duas novas formas de aplicação da técnica CARPT para o mapeamento dos campos de concentração e de velocidades de sistemas multifásicos. Com o emprego de dezesseis detectores cintiladores, DEVANATHAN et al. (1990) aplicaram a técnica CARPT para a caracterização de uma coluna de bolhas. DUDUKOVIC et al (1991) combinaram as técnicas CARPT e TC no estudo de sistemas multifásicos. MOSLEMIAN et al.(1992), utilizando uma partícula radioativa de ^{46}Sc com Atividade máxima igual a $1,11 \times 10^7 \text{Bq}$, verificaram os fenômenos de recirculação e turbulência no movimento de sólidos em reatores tipo leito fluidizado, com diâmetros iguais a 19 cm e 29 cm, e no movimento de líquidos em colunas de bolhas com diâmetros iguais a 11,4 cm, 19,0 cm e 29,0 cm, variando a velocidade superficial do gás.

Ainda na década de 1990, um novo sistema CARPT começou a ser desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da Escola Politécnica de Montreal para ser aplicado a unidades industriais que operam com meios bifásicos ou trifásicos. LARACHI et al. (1994) aprimoraram a técnica CARPT e utilizaram nos experimentos oito detectores cintiladores, com dimensões 7,6 cm x 7,6 cm, dispostos em dois níveis (11cm e 37 cm) em torno de uma coluna com 10 cm de diâmetro e 150 cm de altura. Os quatro detectores foram dispostos em torno da coluna, em alturas iguais, sendo a distância angular entre dois detectores vizinhos igual a 90° . Foi utilizada uma partícula radioativa de ^{46}Sc cuja Atividade variava de acordo com a distância detector-coluna. Por exemplo, para o valor desta distância igual a 7,2 cm, o valor da Atividade da partícula foi igual a $1,85 \times 10^6 \text{Bq}$.

SHEHATA (2004) desenvolveu um método para a técnica CARPT que utiliza três detectores para a localização da partícula no plano XY e um quarto para a localização da partícula na altura arbitrária Z. Os quatro detectores são montados sobre uma plataforma motorizada que acompanha o movimento vertical da partícula radioativa no interior da unidade industrial. Neste método, as contagens no fotopico

devidas à emissão gama do radioisótopo são duplicadas. Para isto, foi utilizado o ^{60}Co , que possui duas energias bem discriminadas e cada um dos detectores mede os dois valores das contagens no fotopico, totalizando oito valores individuais de contagens. Isto equivale ao caso em que a radiação gama monoenergética é medida por oito detectores individuais. A finalidade do trabalho foi a aplicação da técnica CARPT na avaliação da dinâmica de esferas contendo urânio em reatores nucleares tipo leito fluidizado (“pebble bed reactors” ou HTGR).

BHUSARAPU, S. et al., (2006) aplicaram a técnica CARPT para a determinação dos campos de velocidades de esferas de vidro com diâmetro médio igual a $1,5 \times 10^{-6}$ cm e densidade média igual a $2,5 \text{ g/cm}^3$ suspensas em uma unidade de leito fluidizado circulante (CFB) cujo diâmetro media 15,2 cm e a altura, 7,9m. Uma partícula radioativa de ^{46}Sc , cuja densidade era igual a $2,9 \text{ g/cm}^3$, foi coberta com uma camada finíssima do polímero Parilene N, cuja densidade é igual a $1,1 \text{ g/cm}^3$, até que atingisse os valores médios de densidade e diâmetro das partículas suspensas (O diâmetro final da partícula foi igual a 150 μm). O sistema de detecção continha vinte (20) detectores cintiladores distribuídos em planos ao longo da unidade, com três detectores em cada plano. As posições da fonte radioativa foram determinadas a partir dos dados das contagens realizadas com intervalos de tempo iguais a 0,005 s. Dentre outras conclusões, eles verificaram que o fluxo de partículas sólidas era anisotrópico, onde a direção preferencial do movimento das partículas suspensas coincidia com a direção do eixo principal.

As primeiras aplicações da técnica CARPT a tanques de mistura do tipo CSTR foram desenvolvidas pela Universidade de Washington e, com a utilização de dezesseis detectores cintiladores e uma partícula radioativa de ^{46}Sc , foram obtidos resultados satisfatórios para a caracterização de fluidos em sistemas líquido-líquido (RAMMOHAN et al., 2001) e líquido-sólido (GUHA et al., 2007).

RAMMOHAN et al. (2001) realizaram a caracterização da dinâmica de líquidos em um tanque CSTR utilizando uma partícula de polipropileno com 2,3 mm de diâmetro contendo um reservatório de ar e outro compartimento onde foi inserido o radioisótopo ^{46}Sc , cuja Atividade era igual a 80 μCi , e dezesseis detectores cintiladores com diâmetros iguais a 5,4 cm e medindo 26,0 cm (2"x10,25") cada. Foi escolhida uma geometria que maximiza o ângulo sólido entre a partícula radioativa e cada detetor DEGALEESAN (1997). Os detectores foram fixados em torno do tanque em suportes individuais de alumínio formando um arranjo octogonal com espaçamento de 45 graus entre eles. As bases dos detectores foram fixadas nestes suportes de modo que as cotas de dois detectores consecutivos fossem alternadas. Os autores descobriram a existência de duas zonas de recirculação nestes tipos de tanque: uma

na região acima do plano das pás misturadoras e outra na região abaixo deste plano. Eles também descobriram que há zonas mortas no fundo do tanque.

GUHA et al. (2007) utilizaram a técnica CARPT para caracterizar a dinâmica de sólidos nos processos de misturas sólido-líquido realizadas em tanques tipo CSTR. O diâmetro e a altura do tanque eram iguais a 20 cm e, para a agitação da mistura, ele possuía uma turbina tipo Rushton com seis pás e diâmetro igual a 6,7 cm. A partícula radioativa utilizada era composta pelo isótopo ^{46}Sc e, em seu processo de fabricação, foi coberta com uma camada do polímero “Parilene N” até atingir os valores médios da densidade e do diâmetro, respectivamente iguais a $2,5 \text{ g/cm}^3$ e 0,3 mm, das pequenas sementes de vidro utilizadas como sólidos em suspensão. Neste trabalho, os autores concluíram que a velocidade mínima de rotação da turbina já era suficiente para manter as esferas em suspensão (requisito básico para as reações químicas de interesse), contrariando a literatura vigente até então e possibilitando maior economia de energia em processos de mistura similares.

Com relação ao estado da arte da técnica CARPT, a solução do problema da localização da partícula radioativa em um dado instante, a partir das contagens nos detectores, é dada por três métodos diferentes. No primeiro, a distância entre a posição da partícula e o centro do detector é aproximada por um polinômio cujos termos dependem da contagem de fótons pelo detector. Os coeficientes do polinômio são determinados pela calibração do detector, colocando-se a partícula radioativa em vários pontos no interior da unidade industrial, medindo-se as contagens correspondentes e determinando-se a posição de cada ponto por um método dos mínimos quadrados ponderado (LIN et al, 1985).

O segundo método usa uma simulação com o método de Monte Carlo para descrever um mapa de contagens em função da posição da partícula baseado em um modelo fenomenológico que descreve as interações da radiação com a matéria para o arranjo experimental específico (MOSLEMIAN et al., 1992, LARACHI et al, 1994). Em seguida, o mapa de contagens é ajustado com uma calibração dos detectores para a correção dos valores das contagens e a posição da partícula é determinada por um procedimento de busca neste mapa.

O terceiro método é um aprimoramento do segundo porque as buscas no mapa de contagens são realizadas por uma rede neural artificial do tipo retroprojeção (GODFROY et al., 1996).

II.3 Fundamentos Teóricos

II.3.1 Metodologia para análise de curvas de distribuição do tempo de residência

O estudo da dinâmica de um sistema complexo (ex. uma mistura de duas substâncias em fases diferentes) pode ser realizado monitorando-se o movimento de um agente que possua um comportamento semelhante ao de uma partícula qualquer da substância escolhida. Para isso, o agente precisa ser identificado em pontos ou fases do sistema durante o seu movimento, sendo então chamado de “traçador”. O método baseado no emprego de traçadores possui aplicações em varias áreas do conhecimento e, de acordo com o sistema, podem ser utilizados como traçadores: corantes, eletrólitos, materiais magnéticos, isótopos radioativos, etc.

Para uma definição genérica e sucinta desta metodologia, vamos observar o diagrama da figura II.1 (IAEA, 1990). Na entrada do sistema, a população de uma determinada substância que flui entre a entrada e a saída de um sistema é marcada com outra população (traçador) com características físico-químicas semelhantes

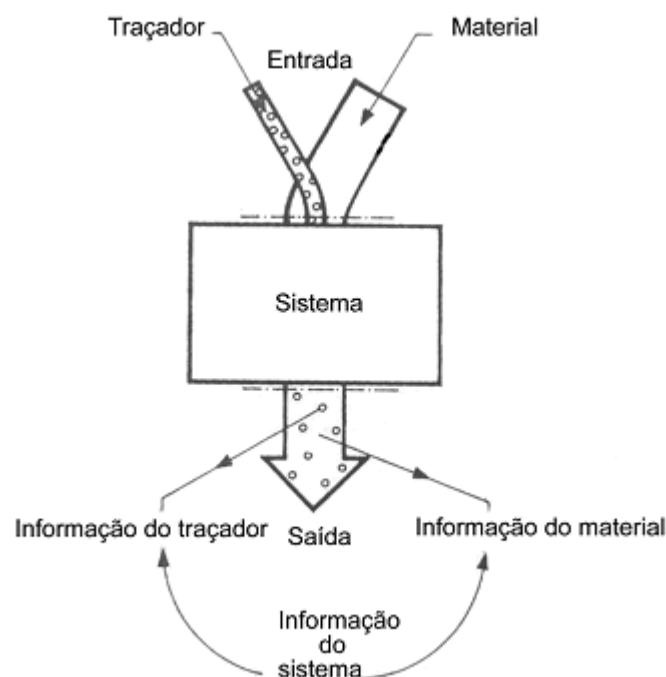


Figura II.1 Diagrama esquemático da metodologia de traçadores. (IAEA, 1990)

às da primeira. Na saída, as informações obtidas com os fluxos do traçador e do meio são úteis para a aquisição de informações sobre o sistema desde que haja uma relação entre os dois fluxos que satisfaça as seguintes condições básicas:

- 1) A variação de concentração do traçador no sistema deve ser detectável e mensurável;
- 2) a variação de concentração do traçador não pode alterar as propriedades do fluxo do material quando ele circula no sistema.

As substâncias utilizadas como traçadores dividem-se em dois grupos de acordo com a natureza do processo:

- 1) Traçadores químicos, internos ou intrínsecos: neste grupo, o traçador e o meio devem possuir afinidade físico-química. Por exemplo: H_3HO (ou HTO) e água, corantes e eletrólitos.
- 2) Traçadores físicos, externos ou extrínsecos: incluem-se nesta categoria os traçadores que satisfazem certas condições físico-químicas do meio, embora não sejam quimicamente iguais entre si. Por exemplo: traçadores isotópicos.

Na Tabela II.1, estão relacionados alguns radioisótopos com a sua forma de produção e as principais aplicações de radiotraçadores estão descritas na tabela II.2.

Os isótopos radioativos utilizados como traçadores no controle de processos atendem às seguintes condições:

- 1) Compatibilidade: para uma dada aplicação, o radiotraçador é escolhido em uma vasta lista de radioisótopos, considerando-se a meia-vida, o tipo de decaimento gama e suas propriedades físico-químicas;
- 2) Especificidade: a emissão de radiação é uma propriedade específica do radiotraçador;
- 3) Sensibilidade: em geral, os radioisótopos são detectáveis em concentrações muito baixas (alta diluição), o que reduz os riscos radiológicos durante a execução da prática;
- 4) Dinâmica: quando os radionuclídeos são diluídos em sistemas fechados, tais como tanques de mistura do tipo CSTR, suas concentrações podem ser medidas em tempo real, sem necessidade de amostragem e sem perturbar o processo;

Tabela II.1 - Métodos de produção de radioisótopos

Método	Cíclotrons	Ativação em reatores	Derivação de outro radioisótopo
Radioisótopos	^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{123}I , ^{18}F , ^{103}Pd	^{140}La , ^{197}Au , ^{90}Sr , ^{23}Na , ^{192}Ir	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (^{99}Mo) ^{90}Y (^{90}Sr)

Tabela II.2 Aplicações industriais de traçadores radioativos

Tipo de indústria	Aplicação
Petroquímica	Medidas de vazão absoluta em sistemas de dutos Determinação da eficiência de sistemas de transporte de massa em trocadores de calor e condensadores: tempo de residência, fugas, recirculação e áreas de estagnação
	Determinação da eficiência de processos de misturas em sistemas líquido/líquido, sólido/líquido e sólido/sólido: velocidade e grau da mistura, tempo de residência, zonas mortas, segregação, canalização e estagnação
Mineração	Estudos de eficiência de produção
	Concentração de componentes em sistemas de flotação: tempo de residência e recirculação
	Hidrotransporte de material: velocidade de sólidos em suspensão e tempo de residência em dutos
	Homogeneização de materiais: misturas secas e úmidas
Cimento	Otimização de processos de separação
	Eficiência de mistura de materiais
	Eficiência de moinhos e trituradores: redução de tamanho na matéria-prima, obstrução, recirculação, zona de estagnação e geração de poeira, tempo de residência
	Eficiência de silos de misturas e calcinadores

II.3.1 Princípios da técnica de radiotraçadores

Nesta seção, serão definidas as funções de distribuição do tempo de residência e de distribuição da idade interna do traçador, o tempo médio de residência, a função intensidade e também como estes conceitos são úteis na determinação de algumas anomalias próprias de processos industriais como a existência de zonas de estagnação, canalizações e recirculações. (DANCKWERTS, 1953) (HIMMELBAU, 1968)

II.3.1.1 Distribuição do tempo de residência (DTR)

As funções de distribuição do tempo de residência são funções estatísticas que resultam na descrição das condições reais do deslocamento do radiotraçador no sistema através da Técnica de estímulo-resposta, isto é, cada pulso emitido pelo radiotraçador (estímulo) é registrado em um detector (resposta) após passar pelo sistema.

As definições quantitativas das funções de distribuição de idade foram definidas por Himmelbau (1968). O tempo de residência é definido como o tempo transcorrido desde a entrada de um elemento de volume dV até sua saída na unidade industrial e a idade de um elemento de fluido é o tempo transcorrido desde a entrada na unidade até um instante qualquer. Para a definição das funções foi considerado um volume V e uma vazão Q , com valores fixos.

II.3.1.2 A função de distribuição da idade do fluido ($E(t)$)

A função $E(t)$, é uma função de distribuição de frequência das idades dos elementos de fluido que escoaram, ou seja, é a fração dos elementos de fluido que passaram pela unidade entre um determinado tempo t e outro $t + \Delta t$. A função $E(t)$ é normalizada, como mostrado na equação II.1, na forma integral:

$$\int_{t=0}^{t=\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{II.1}$$

II.3.1.3 A função de distribuição de frequência ($I(t)$)

A função $I(t)$ é a distribuição de frequência das idades dos elementos que estão no interior da unidade com idade entre t e $t+\Delta t$, conforme apresentado na eq. II.2:

$$\int_{t=0}^{\infty} I(t) dt = 1 \quad \text{II.2}$$

II.3.1.4 O tempo médio de residência (τ)

Em um sistema fechado, com valores constantes de volume (V) e de vazão (Q), define-se τ como o tempo médio gasto pelo traçador para percorrer a unidade industrial do ponto de injeção até a saída. A média da distribuição do tempo de

residência é calculada pelo primeiro momento da distribuição II.1, dado pela equação II.3:

$$\int_{t=0}^{\infty} t.E(t)dt = \frac{V}{Q} \quad \text{II.3}$$

II.3.1.5 A função intensidade ($\Lambda(t)$)

A função $\Lambda(t)$ é uma relação entre a fração de elementos do fluido que saíram da unidade com a idade t e a fração de elementos de fluido que ainda permanece no interior da unidade, sendo dada pela equação II.4. A curva possui um formato característico, sendo inicialmente crescente, indicando a remoção do traçador, depois aproximadamente constante, formando um patamar, o que indica que o material removido e o material ainda no interior do sistema estão se deslocando e, por último, a curva tende ao infinito, o que significa a ausência de traçador dentro do sistema. A função intensidade é muito útil na detecção de anomalias no fluido como a presença de zonas de retenção ou canalizações.

$$\Lambda(t) = \frac{1}{\tau} \times \frac{E(t)}{I(t)} \quad \text{II.4}$$

II.3.1.6 Interpretação das curvas de distribuição do tempo de residência

Há dois modelos básicos de mistura do radiotraçador em um sistema: o modelo de misturador perfeito e o modelo de fluxo pistão. Alguns fenômenos que podem ocorrer no sistema possuem características específicas. Como exemplos temos: canalizações, recirculações, zonas mortas e zonas de retenção. Tais fenômenos alteram o tempo médio de residência e são identificados nas curvas DTR.

II.3.1.7 Modelo ideal de misturador perfeito

É o modelo baseado na hipótese de que o traçador, após sua injeção instantânea, se mistura de maneira uniforme e instantânea dentro do volume do sistema compreendido entre a entrada e a saída do traçador.

II.3.1.8 Modelo de misturador tipo fluxo de pistão

É o modelo que considera que a velocidade de uma fração do traçador é constante nas direções axial e longitudinal do sistema, o que implica que todas as

partes do traçador se movem em trajetórias paralelas entre si, sem interferência mútua.

II.3.2 Principais fenômenos avaliados pela técnica de radiotraçadores

II.3.2.1 Zona morta

Este fenômeno ocorre em sistemas onde há uma diminuição no volume efetivo, ou seja, existe uma região que não participa do processo de mistura. Num sistema com zona morta, o volume útil disponível é menor que o volume real e o tempo médio de residência teórico calculado no projeto do sistema não é mais válido. Então, o volume útil do sistema pode ser definido pela diferença de volumes expressa na equação II.5 e considerando o cálculo do volume V_{ZM} efetuado utilizando-se a equação II.6.

$$V_U = V_T - V_{ZM} \quad \text{II.5}$$

$$V_{ZM} = Q \times (\tau - \tau_{ZM}) \quad \text{II.6}$$

II.3.2.2 Zona de retenção

É a denominação da região que retém uma fração de material marcado por um período de tempo maior do que τ , após o qual esta porção de material volta a participar do processo de mistura. Esse tipo de fenômeno ocasiona um alongamento das caudas das curvas $E(t)$ e $I(t)$.

II.3.2.3 Canalização

É o fenômeno que ocorre quando uma fração de material possui velocidade média maior que a do restante do fluido. Assim, o tempo de percurso desta pequena fração do material é menor do que τ .

II.3.2.4 Recirculação

É o fenômeno caracterizado quando uma parte concentrada do radiotraçador (nuvem radioativa) atravessa ângulo sólido do detector repetidamente. A cada passagem corresponde uma altura de pico na resposta do detector. A tendência, com o decorrer do tempo, é a diminuição gradual das alturas dos picos devido à homogeneização da mistura.

II.4 Planejamento de um Ensaio

No fluxograma da figura II.2, estão organizadas as principais etapas da análise de um problema cujo diagnóstico passa através da técnica de radiotraçadores. Geralmente, para a escolha do radiotraçador, basta a experiência do técnico ou empresa responsável pelo ensaio ou a literatura já publicada sobre o trabalho ou a simples verificação das compatibilidades física e química entre o radioisótopo e o meio em estudo. Porém, em alguns casos, somente testes de validação realizados em laboratório podem assegurar que o uso de um determinado radioisótopo irá satisfazer todas as condições exigidas para uma determinada aplicação.

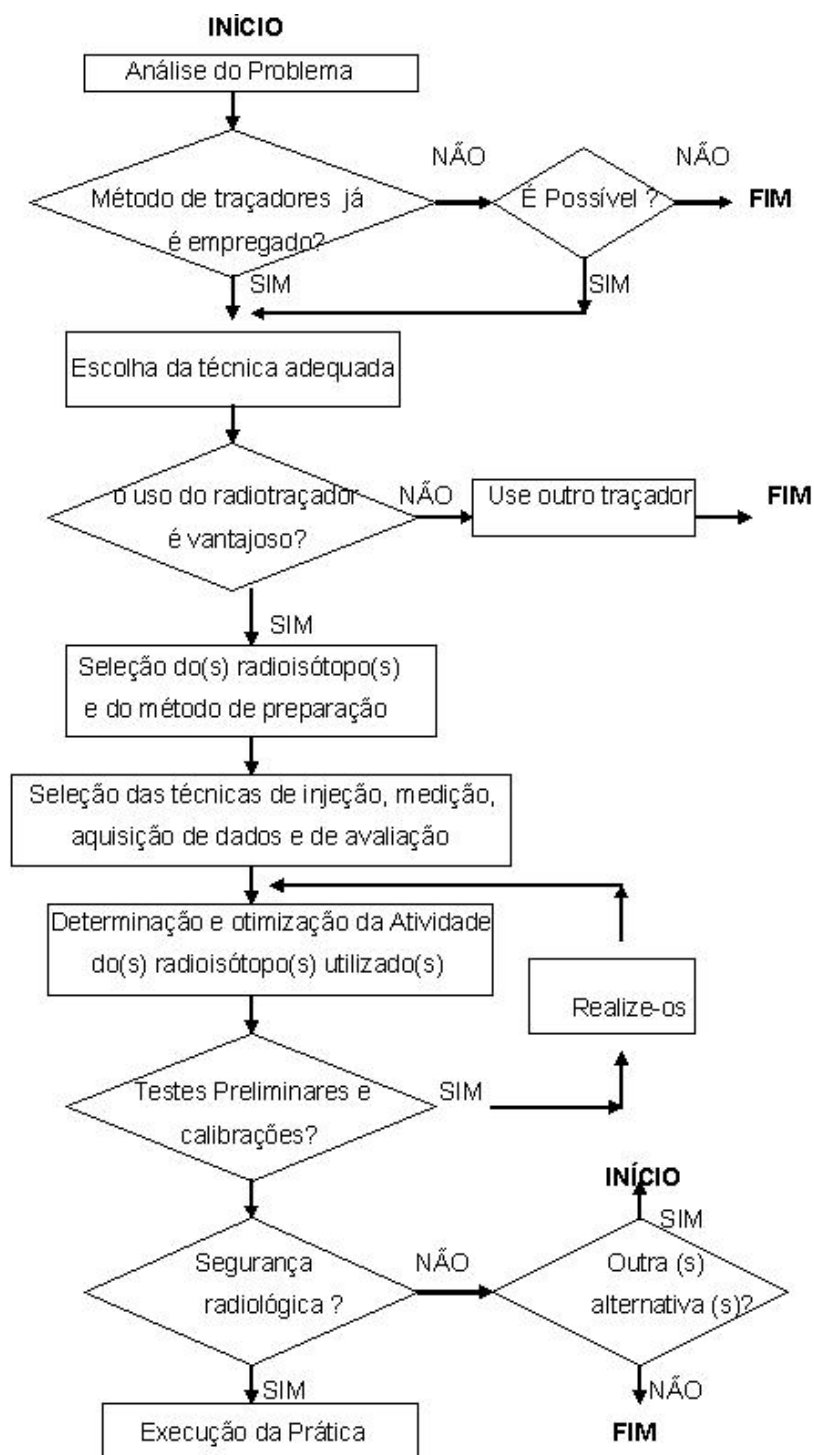


Figura II.2. Fluxograma do planejamento de uma prática com traçadores radioativos. (IAEA, 2004)

II.4.1 Seleção do Radioisótopo

A fase de seleção do radioisótopo está estreitamente relacionada com a fase de otimização da Atividade porque, a princípio, vários radioisótopos podem ser considerados adequados para o uso como radiotraçador baseando-se apenas nas suas propriedades físicas e químicas. Então, como critérios de desempate, eles devem ser comparados em relação à disponibilidade, ao custo, ao risco ocupacional e ao destino dos rejeitos radioativos. Portanto, somente após realizados os cálculos de otimização da Atividade para todos os radioisótopos pré-selecionados é que um deles poderá ser selecionado com base nos parâmetros acima mencionados.

II.4.1.1 Cálculo da Atividade do Radioisótopo

Como visto na seção anterior, às vezes o radioisótopo selecionado pode ser produzido em um reator nuclear pela ativação de um determinado isótopo (geralmente denominado isótopo-pai) contido em uma amostra onde ocorre a reação de absorção de nêutrons (n, α). Se a probabilidade de ativação do próprio radioisótopo no reator, após sua produção, for desprezível, a estimativa do tempo de irradiação da amostra só depende da relação entre a Atividade requerida do radioisótopo e o fluxo de nêutrons do reator. Caso contrário, é preciso incluir na equação um fator de correção para o valor da Atividade da amostra (TSOULFANIDIS, 2000).

II.4.2 A realização de um Ensaio

Na etapa de execução, uma solução contendo o radioisótopo selecionado e com um valor de Atividade otimizado é injetada na unidade industrial a partir de um ponto na entrada. Dependendo das características da unidade, dois procedimentos diferentes podem ser empregados para a injeção do radiotraçador: um pulso rápido ou uma injeção contínua. No final, a resposta da interação do radiotraçador com o fluxo principal é registrada pelos detectores posicionados junto a parede externa da unidade, e observada no monitor do computador. Os cintiladores são os detectores mais utilizados por sua alta eficiência na detecção da radiação gama e fácil manuseio. À medida que a amostra vai se difundindo e se mesclando ao meio, sua concentração modifica-se a cada instante e ela assume o comportamento de uma nuvem radioativa

II.4.2 Avaliação do Ensaio

Há vários programas comerciais para aquisição e tratamento dos dados obtidos no ensaio e eles são capazes de realizar, por exemplo, a normalização, a convolução, a deconvolução e o ajuste de curvas DTR. Há também outros programas desenvolvidos em institutos de pesquisa que permitem analisar as curvas de distribuição do tempo de residência, como o do Laboratório de Radiotraçadores do Instituto de Engenharia Nuclear (BRANDÃO, 2001).

As principais fontes de erros na técnica de radiotraçadores são :

- 1) Emprego de traçador inadequado;
- 2) Fatores de correção, como o da atenuação da radiação, mal determinados;
- 3) Sinais perturbados por fontes externas de radiação;
- 4) Sinais de baixa intensidade devido à elevada distância entre o detector e o traçador;
- 5) Aproximações numéricas dos cálculos envolvidos no programa.

II.5 Os princípios da Técnica de Rastreamento Computadorizado de Partícula Radioativa (CARPT)

II.5.1. A técnica CARPT e suas aplicações

O rastreamento computadorizado de partícula radioativa é uma técnica não-invasiva utilizada para a determinação de padrões de fluidos e para o desenvolvimento de modelos para unidades industriais que operam com fluidos multifásicos, tarefas essenciais para um projeto de Engenharia otimizado. Com esta técnica, pode-se avaliar a performance da unidade em processo contínuo ou batelada e outros parâmetros para a quantificação dos processos (recirculações, turbulências, zonas de segregação, difusividades, etc).

A técnica CARPT se baseia no uso de uma fonte radioativa cujo comportamento dinâmico é semelhante ao da fase que será monitorada. A radiação gama é registrada por um conjunto de detectores cintiladores colocados ao redor da unidade e as contagens realizadas em cada detector durante o deslocamento da partícula na fase marcada diminuem à medida que a distância detector-partícula aumenta. A partir dos valores de posição em função do tempo, computam-se as distribuições da posição da partícula ou da velocidade instantânea, o que possibilita

assim a análise do comportamento de um conjunto de partículas semelhantes. A condição básica para esta técnica é que o número de dados seja grande o bastante para minimizar as incertezas, implicando em um aumento correspondente do tempo total de contagem nos detectores.

II.5.2 Relação entre as contagens no detector e a Atividade da partícula

Na técnica CARPT, uma condição fundamental para a localização do radiotraçador é que somente são detectados e contados os fótons que não são espalhados pelo meio, isto é, aqueles que seguem uma trajetória retilínea entre a partícula e o detector. As contagens no fotopico durante um intervalo de tempo t derivam da taxa líquida de contagens no detector que, por sua vez, depende dos parâmetros expressos na equação II.7 (TSOULFANIDIS, 1995):

$$c = \Omega.F.\varepsilon.A \quad \text{II.7}$$

Na prática, a taxa líquida de contagens é obtida com o desconto da contribuição da radiação de fundo e com a correção da influência do tempo morto do detector, de acordo com a equação II.8.

$$c = \frac{N/t_a}{1 - \left(N/t_a\right) \times t_m} - \frac{Bg}{t_b} \quad \text{II.8}$$

Considerando que as contagens devido à radiação de fundo são desprezíveis em detectores com diâmetro reduzido e blindados lateralmente e que o tempo morto dos detectores cintiladores é aproximadamente igual a 300ns, estes fatores podem ser anulados na equação II.8, e os valores das contagens no fotopico em um intervalo de tempo t são expressos pela equação II.9, que resultou da substituição da equação II.8 (com as simplificações) na equação II.7

$$N = \Omega.F.\varepsilon.A.t \quad \text{II.9}$$

II.5.3 Método de otimização para a localização da partícula radioativa

No capítulo I, foram citados como parte do estado da arte da técnica CARPT três métodos para a localização da partícula radioativa baseados na determinação das curvas de resposta de cada detector (ou mapa de contagens) em função da

posição da partícula radioativa. Nesta parte, será descrito resumidamente o método mais utilizado dentre aqueles.

Geralmente, a relação entre a taxa de contagens em cada detector utilizado e a distância entre ele e a partícula é obtida por calibração antes do ensaio. Isto se deve ao fato de que a distribuição de densidades no interior da unidade não é homogênea durante a dinâmica do processo. A partícula radioativa é colocada em várias posições conhecidas no interior da unidade e, em cada posição, a taxa de contagens no fotopico medida por cada detector é registrada. No final, elaborase, para cada detector, uma curva relacionando as contagens registradas e as respectivas distâncias entre o detector e a partícula (LARACHI et al., 1994).

Fisicamente, a distância entre a fonte radioativa e o detector, avaliada a partir de um dos quatro métodos de calibração citados no capítulo I e expressa na equação II.10, é a medida da distância entre a posição da partícula no instante t , localizada em (X_p, Y_p, Z_p) , e a posição fixa do centro do i -ésimo detector, em (X_i, Y_i, Z_i) , sendo igual ao raio da esfera com este mesmo centro. Com uma única equação, a posição da partícula em um dado instante é indeterminada, pois ela pode estar em qualquer ponto da superfície esférica.

$$r_i^2 = (X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2 + (Z_p - Z_i)^2 \quad \text{II.10}$$

A solução (X_p, Y_p, Z_p) pretendida é única, no R^3 , para um sistema com, no mínimo, quatro equações similares à da equação II.13 e corresponde fisicamente ao ponto de intersecção de quatro esferas centradas nas posições dos detectores, situadas em (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , (X_3, Y_3, Z_3) e (X_4, Y_4, Z_4) , porque apenas três esferas se interceptam no mínimo em dois pontos, sendo necessária uma quarta esfera para a eliminação de um desses dois pontos e identificação do ponto restante como o ponto de intersecção procurado. Portanto, teoricamente, quatro é o número mínimo de detectores para a realização da técnica CARPT. Na prática, são utilizados cerca de dezesseis detectores para a redução das incertezas nas contagens. Eles são colocados ao redor da unidade industrial em planos perpendiculares ao seu eixo vertical para que a partícula radioativa, em cada ponto de sua trajetória, esteja sempre próxima de um detector. Esta redundância no número de detectores contribui para a redução da incerteza total na determinação das posições instantâneas e, além disso, a solução ótima é obtida com o auxílio do método de regressão linear ponderado, desenvolvido por LIN et al. (1985)

II.6 O algoritmo iterativo da Máxima Expectância (EM)

É uma solução bayesiana do problema inverso da reconstrução de imagens tomográficas, sendo uma das soluções derivadas do método da entropia (LIANG,JASZCZAK, 1989). Este algoritmo pertence à classe dos métodos iterativos de reconstrução de imagens (ROSENFELD,1982) e foi escolhido para esta pesquisa porque:

- 1) Permite a inclusão de inúmeros parâmetros físicos no algoritmo antes da reconstrução da imagem, como o fator de atenuação e a eficiência dos detetores (LANGE,CARSON,1984);
- 2) considera as contagens nos detetores como pertencentes à distribuição de Poisson;
- 3) é o algoritmo mais adequado para a reconstrução de imagens com poucas projeções.

As definições que seguem são necessárias para a demonstração do algoritmo EM que virá em seguida. O produto $V_j \times p_{ij}$ é o valor esperado do número de fótons provenientes da atividade do elemento j que são detectadas pelo detector i , o produto $\sum_{j=1}^n V_j \times p_{ij}$ como sendo o valor esperado do número de fótons detectados no detector i provenientes de n elementos e o conjunto γ_i como sendo a soma das funções densidade de probabilidade do número de fótons emitidos por todos os elementos da matriz de reconstrução e detectados no detector i , de acordo com a equação II.11.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n N_j \quad \text{II.11}$$

O objetivo do algoritmo é encontrar os elementos do vetor $v_j = (v_1 \dots v_n)^T$ a partir dos valores conhecidos p_{ij} e n_i . Assim, o algoritmo deve extrair os valores v_j a partir dos valores de f_j expressos pela equação II.12:

$$f_j = v_j \times \sum_{l=1}^m p_{lj} \quad \text{II.12}$$

Os elementos da matriz de probabilidades W são definidos pela equação II.13

$$w_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{l=1}^m p_{lj}} \quad \text{II.13}$$

O valor esperado de n_i é expresso pela equação II.14:

$$E(y_i) = \sum_{j=1}^n v_j \times p_{ij} \quad \text{II.14}$$

Após a substituição das variáveis v_j , dada na equação II.12, e p_{ij} , dada na equação II.13, na equação II.14, resulta uma nova forma de expressão de n_i dada na equação II.15:

$$E(\gamma_i) = \sum_{j=1}^n \frac{f_j}{\sum_{l=1}^m p_{lj}} \times w_{ij} \times \sum_{l=1}^m p_{lj} = \sum_{j=1}^n f_j \times w_{ij} \quad \text{II.15}$$

A equação II.15 também pode ser descrita na forma da equação matricial II.16, sendo $W = [w_{ij}]$ e $f = [f_j]$

$$E(\gamma) = W \times f \quad \text{II.16}$$

Os elementos de W são razões entre probabilidades ($p_{ij} > 0$) e os elementos de f são valores médios do número de fótons medidos nos elementos ($f_j > 0$). Logo, $E(\gamma_i)$ é uma estimativa da probabilidade dos fótons emitidos pelos j elementos serem detectados pelo detector i , sendo então válidas as condições descritas na equação II.17:

$$E(\gamma_i) = (Wf)_i > 0, \forall i \text{ e } \sum_{i=1}^n w_{ij} = 1, \forall j \quad \text{II.17}$$

Maximizando-se a expressão II.14, obtêm-se a maior probabilidade de ocorrência de contagens no detector i com o valor n_i , o que corresponde a determinados valores dos elementos do vetor f (f_j). Isto é feito através da maximização da função de probabilidade $L(f)$, como demonstrado a seguir.

Seja $p(k)$ a função de probabilidade de Poisson para a variável aleatória γ relacionada aos valores de n_i e expressa pela equação II.18.

$$p(k) = \frac{(E(\gamma_i))^k}{k!} \times \exp[-(E(\gamma_i))] = \frac{(W \cdot f)_{ik}}{k!} \times \exp(-Wf)_i \quad \text{II.18}$$

A função $L(f)$ para o parâmetro desconhecido $(Wf)_i$ é a probabilidade de ocorrência dos valores médios n_i dada pela equação II.19:

$$L(f) = \prod_{i=1}^m p((Wf)_i, n_i) = \prod_{i=1}^m \frac{(W \cdot f)_{n_i}}{n_i!} \times \exp(-Wf)_i \quad \text{II.20}$$

O valor máximo de $L(f)$ é proporcional ao valor máximo de $\log L(f)$. Então, pode-se demonstrar, desenvolvendo os cálculos, que $L(f)$ máximo é dado pela relação II.21:

$$L(f) = \log L(f) = \sum_{i=1}^m [n_i \times \log(Wf)_i - (Wf)_i] \quad \text{II.21}$$

Portanto, o algoritmo EM tem como finalidade obter um vetor f que maximiza a função $L(f)$, sendo um método iterativo para se obter a solução Bayesiana f dada pela equação II.22:

$$f_{k+1} = f_k \times (W^T) \frac{n}{Wf} \quad k = 0, 1, \dots \quad \text{II.22}$$

Esta solução também pode ser utilizada na reconstrução de imagens tridimensionais.

Capítulo III

METODOLOGIA DA PESQUISA

III.1 Nomenclatura

III.1.1 Lista de abreviaturas

EM - algoritmo iterativo da máxima expectância

LTR - Laboratório de Traçadores Radioativos do Instituto de Engenharia Nuclear

III.1.2 Lista de símbolos

A - Atividade total da partícula radioativa;

$A(t_0)$ - valor da Atividade ao fim do intervalo de tempo de irradiação $[0, t_0]$, em Bq/g

a - fração de peso do isótopo pai multiplicada pelo seu percentual de massa na molécula

a_{ij} - fator de atenuação para um fóton contado pelo detector i e emitido por um ponto na célula j (o ponto de referência é o centro da célula)

d - a menor distância entre a face do detector e a parede da unidade cilíndrica

d_{ij} - distância percorrida por um fóton ao longo da célula j antes de ser contado pelo detector i

dp - comprimento da menor unidade de volume da matriz de reconstrução

d_w - espessura da parede da unidade

i - vetor unitário na direção X do sistema de coordenadas cartesiano

j - vetor unitário na direção Y do sistema de coordenadas cartesiano

k - vetor unitário na direção Z do sistema de coordenadas cartesiano

N_i - valor das contagens no detector i medido para a energia do fotopico selecionado no espectro de emissão gama do radiotraçador.

f_j - intensidade da imagem do voxel j da matriz de reconstrução M em um instante t qualquer durante o movimento da partícula radioativa, ou seja, o valor medido da Atividade do elemento j no instante t

h_{ij} - ângulo sólido subentendido pela superfície do detector i em relação ao centro da célula j;

m - número de pontos de detecção da radiação (igual ao número de detectores de radiação) ;

p_{ij} - probabilidade de um fóton emitido por uma célula j ser contado pelo detector i;

R - raio da unidade cilíndrica

r_{ij} - probabilidade da partícula estar na célula j , sendo função de p_{ij} , N_1 , N_2 , N_3 , N_4 e A
 T_B - meia-vida do radioisótopo produzido

u_1 - coeficiente de atenuação linear total do meio 1, função da energia do fotopico selecionado no espectro de emissão gama do radiotraçador

u_2 - coeficiente de atenuação linear total do meio 2, função da energia do fotopico selecionado no espectro de emissão gama do radiotraçador

u_w - coeficiente de atenuação linear total do material da parede da unidade, função da energia do fotopico selecionado no espectro de emissão gama do radiotraçador

W_t - massa atômica relativa do elemento químico ao qual pertence o isótopo pai

w_{ij} - o valor da probabilidade total do fóton originado na célula j alcançar a face do detector i (elemento da matriz de probabilidades, que contém $m \times n$ elementos)

ω - velocidade angular das pás durante os ensaios

$\mu_{j'}$ - coeficiente de atenuação linear total do meio onde está inserida a célula j

σ_A - secção de choque de absorção de nêutrons térmicos do isótopo-pai

σ_B - secção de choque de absorção de nêutrons térmicos do radioisótopo produzido

Φ - o fluxo de nêutrons térmicos do núcleo do reator de potência.

III.2 Método para a localização da partícula radioativa

Pode-se dividir a metodologia da pesquisa em três etapas: a primeira foi a concepção do método para a reconstrução da imagem do ponto onde se encontra o radiotraçador, com a conseqüente elaboração do algoritmo para a sua execução. A segunda etapa foi a otimização do arranjo geométrico dos detectores cintiladores utilizados nos ensaios e a terceira foi a etapa experimental, com a realização de ensaios no LTR visando à validação do método. Os dados experimentais permitiram a avaliação das imagens das posições ocupadas por uma partícula de ^{198}Au imersa na água e no ar.

Nesta pesquisa, ao invés de se adotar um método baseado na relação empírica entre as contagens no detector e a distância entre ele e a partícula radioativa, optou-se por um método que utiliza um modelo físico para a unidade industrial e incorpora um algoritmo bayesiano de reconstrução de imagens, o algoritmo EM, como visto no capítulo II. A finalidade do algoritmo EM é a de introduzir no modelo físico os parâmetros mais relevantes para a reconstrução da imagem da posição da partícula, que são: a Atividade da partícula, a atenuação do meio e o ângulo sólido entre a partícula radioativa e o detector. (VIEIRA, 2008)

De acordo com o método proposto, o volume total da unidade industrial foi inscrito em um arranjo tridimensional, chamado de matriz de reconstrução, formado por células cúbicas ou “voxels”, conforme apresentado na figura III.1. A dimensão linear destas unidades de volume é aproximadamente igual ao diâmetro da partícula mas, na figura III.1, elas estão ampliadas para fins ilustrativos. O modelo matemático escolhido para o volume total da unidade industrial foi o de cilindro reto porque ele é o mais utilizado nos processos industriais.

Observando-se a figura III.1, as coordenadas de cada um dos m pontos de detecção da radiação, como o ponto D, e dos pontos de localização da partícula no interior do cilindro, como o P, são medidas em relação à origem do mesmo sistema de coordenadas no espaço. $P(x,y,z)$ é a posição do centro da célula onde a partícula radioativa está inscrita e PD é a distância percorrida por um fóton emitido por P e detectado na posição do centro geométrico da face do detector de radiação: o ponto $D(x_d,y_d,z_d)$. Como, na Indústria, a ordem de grandeza da distância PD é muito maior que a das dimensões da partícula radioativa (inferiores a 5 mm), a fonte em P pode ser considerada uma fonte pontual.

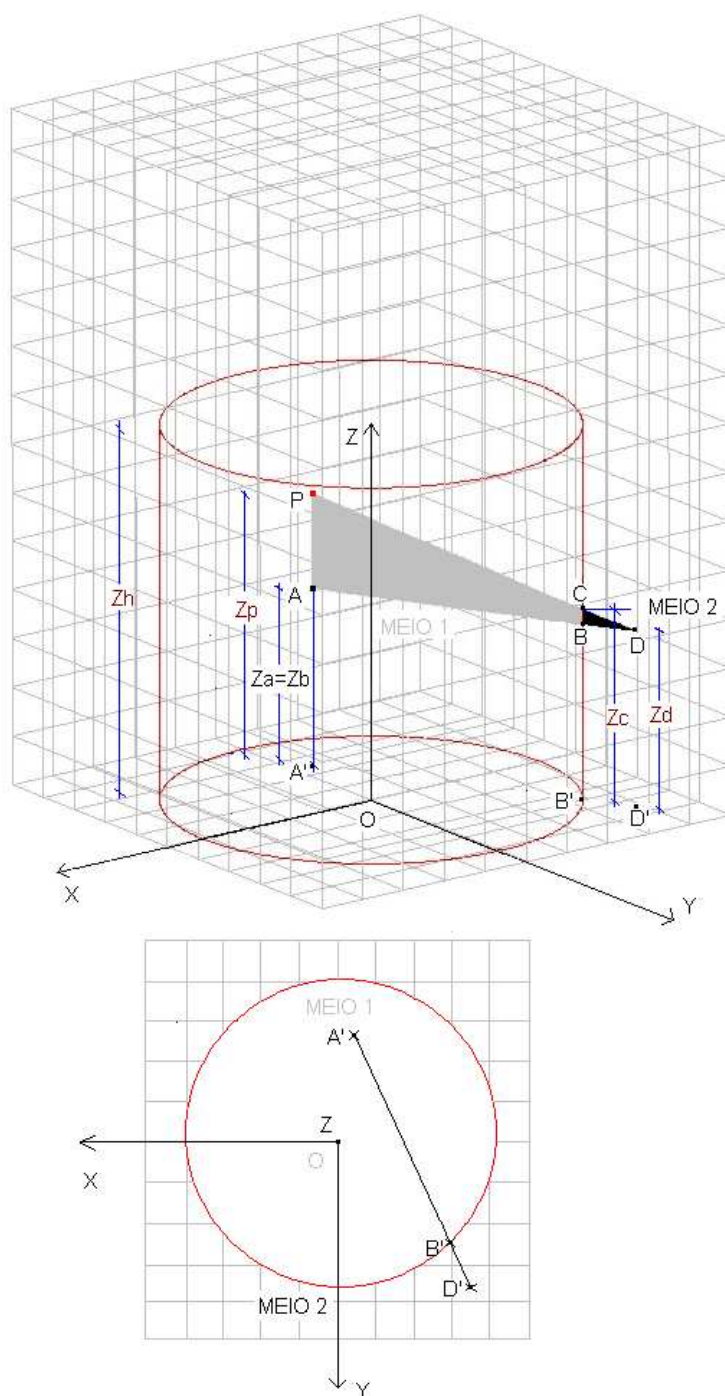


Figura III.1. Esquema da unidade cilíndrica inscrita na matriz de reconstrução. O ponto P é uma posição arbitrária da fonte radioativa e D é um dos pontos de detecção. A', B' e D' são as projeções dos pontos A, B e D sobre o plano XY.

III.2.1 Cálculo das distâncias entre a fonte e o detector

Para viabilizar a determinação das distâncias requeridas na determinação das grandezas físicas utilizados no algoritmo para a reconstrução das imagens das posições da fonte radioativa, o segmento PD traçado na figura III.1 está dividido em dois trechos, PC e CD, que correspondem, respectivamente, às distâncias percorridas pelo fóton nos meios 1 e 2.

Os pontos A(xa,ya,za), B(xb,yb,zb) e D(xd,yd,zd) possuem a mesma altura, isto é, $Z_a=Z_b=Z_d=Z_h/2$. Assim, observando-se a mesma figura, verifica-se que o segmento AP é paralelo ao eixo Z e, portanto, $x_a=x$ e $y_a=y$. Analogamente, as coordenadas do ponto B no plano XY são iguais às coordenadas do ponto C e são determinadas em função das coordenadas de P, de D e do diâmetro do cilindro. Isto é possível porque $(x_b,y_b)=(x_c,y_c)$ é a solução do sistema de equações gerado para a determinação do ponto de intersecção entre a circunferência que delimita a secção transversal do cilindro e a reta PD.

Daqui em diante, já é possível calcular, a partir das relações trigonométricas entre os triângulos APD e BCD, os comprimentos dos percursos PC e CD com as relações III.1 a III.5:

$$\frac{PC}{CD} = \frac{AB}{BD} \quad \text{III.1}$$

$$AB = A'B' = \left[(xb - x)^2 + (yb - y)^2 \right]^{1/2} \quad \text{III.2}$$

$$BD = B'D' = \left[(xd - xb)^2 + (yd - yb)^2 \right]^{1/2} \quad \text{III.3}$$

$$PC = \left[(xb - x)^2 + (yb - y)^2 + (zc - z)^2 \right]^{1/2} \quad \text{III.4}$$

$$CD = \left[(xd - xb)^2 + (yd - yb)^2 + (zd - zb)^2 \right]^{1/2} \quad \text{III.5}$$

Agora, isolando-se o segmento PC na equação III.1 e efetuando-se as substituições dos valores de AB, BD e CD pelas relações dadas nas equações III.2, III.3 e III.5, obtêm-se o valor da medida PC em função das coordenadas dos pontos P, B e D, como está expresso na equação III.6:

$$PC = \frac{\left[(xd - xb)^2 + (yd - yb)^2 + (zd - zb)^2 \right]^{1/2} * \left[(xb - x)^2 + (yb - y)^2 \right]^{1/2}}{\left[(xd - xb)^2 + (yd - yb)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{III.6}$$

Da mesma forma, o comprimento total PD é determinado pelas coordenadas da posição da partícula e da posição definida do ponto de detecção, sendo calculado pela equação III.7

$$PD = \left[(xd - x)^2 + (yd - y)^2 + (zd - z)^2 \right]^{1/2} \quad \text{III.7}$$

Finalmente, o comprimento CD é obtido pela diferença expressa na equação III.8:

$$CD = PD - PC \quad \text{III.8}$$

III.2.2 Desenvolvimento do algoritmo EM (SEPPANEN, 2000, DEFRISE, M., GULLBERG, G., 2006)

Os fatores de atenuação a_{ij} são determinados pela função exponencial dada na equação III.9:

$$a_{ij} = \exp\left[-\sum \mu_{j'} \times d_{ij'}\right] \quad \text{III.9}$$

Observando-se o sistema de eixos cartesianos da figura III.1, o ângulo sólido h_{ij} subentendido entre o centro do voxel j , o ponto $P(x, y, z)$ onde se situa a partícula radioativa com raio r_f , e a face do detector i , com raio R_d , é calculado pelas expressões dadas nas equações III.10 e III.11 (OBLOZINSKY, 1971)

$$h_{ij} = \left(\frac{1}{2} \right) - \frac{1}{\Pi^2 \cdot r_f^2} \times \int_0^{r_f} r f dr f \times \int_0^\Pi z d\Psi \times \dots \quad \text{III.10}$$

$$\dots \times \int_0^\Pi \frac{z^2 + \rho^2 + R_d \cdot \cos(\Theta)}{z^2 + \rho^2 - \rho^2 \cdot \cos^2(\Theta)} \times (z^2 + \rho^2 + R_d^2 + 2 \cdot R_d \cdot \rho \cdot \cos(\Theta))^{-1/2} d\Theta$$

$$\rho^2 = (y_d - y)^2 + x^2 \quad \text{III.11}$$

Enquanto que as probabilidades p_{ij} são o produto dado na relação III.12:

$$p_{ij} = a_{ij} \times h_{ij} \quad \text{III.12}$$

A igualdade na equação III.13 possibilita a construção da matriz de probabilidades $[w_{ij}]$, que contém $m \times n$ elementos, e que inclui o fator de localização r_{ij} , capaz de induzir a convergência da solução para um único elemento da matriz de reconstrução

$$w_{ij} = p_{ij} \times r_{ij} \quad \text{III.13}$$

Assim, o problema inverso resultante deste modelo matemático consiste na obtenção dos valores dos n elementos do vetor imagem f através da solução do sistema linear dado pela equação III.14.

$$N_i = \sum^n w_{ij} \times f_j \quad \text{III.14}$$

O método de solução escolhido para este sistema é o iterativo da máxima expectância (EM), descrito no capítulo II, cuja fórmula iterativa para a obtenção do vetor f é dada na equação III.15.

$$f_{k+1} = f_k \times ([w_{ij}]^T) \times \frac{n_i}{[w_{ij}] \times f} \quad k = 0, 1, \dots; i = 1, \dots, m \quad \text{III.15}$$

III.3 Estrutura do algoritmo

O algoritmo possui parâmetros que podem ser alterados pelo usuário de acordo com as condições específicas da aplicação. Incluem-se dentre os parâmetros as dimensões da unidade (raio e altura), a quantidade de detectores de radiação e suas posições em relação ao sistema cartesiano fixo na base da unidade, a Atividade nominal da partícula radioativa e a geometria dos detectores de radiação. Por exemplo, para a avaliação da unidade de decantação do LRI, cujo volume útil possui formato cilíndrico com diâmetro e altura iguais a 40 cm, há duas opções para o arranjo geométrico dos detectores: o arranjo em forma de anel, cujo esquema está apresentado na figura III.2, e o arranjo em forma semelhante à letra “L”, exibido na figura III.3. Nos dois arranjos, a menor distância entre cada detector e a parede da unidade foi fixada em 10 cm.

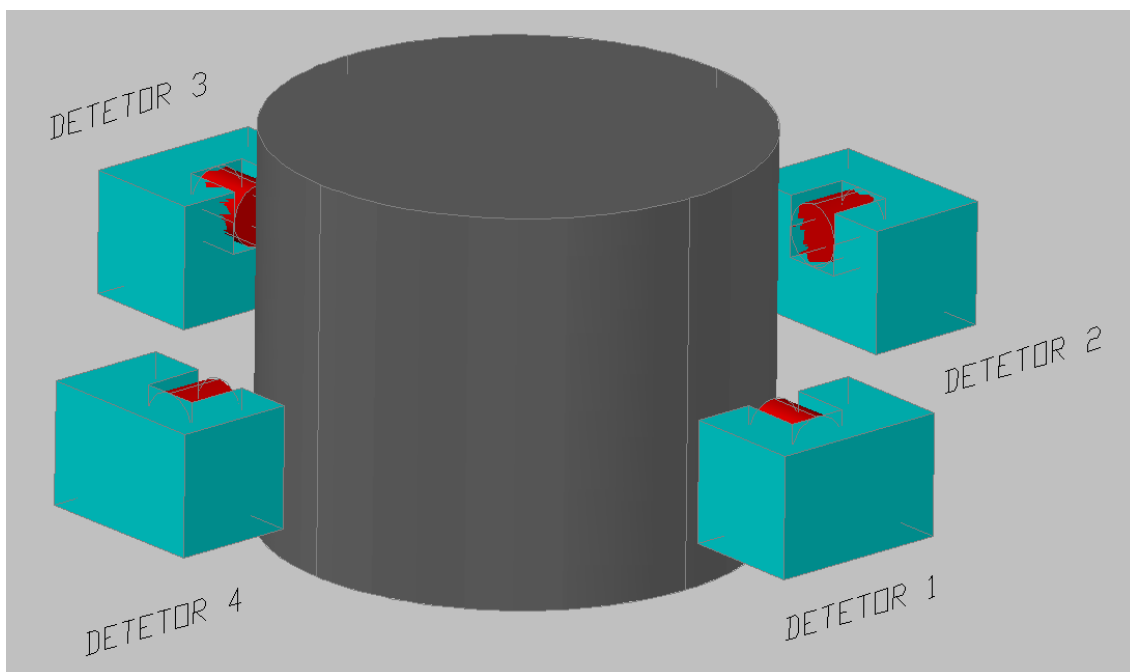


Figura III.2 Detectores dispostos na geometria anel em torno da unidade cilíndrica do LTR.

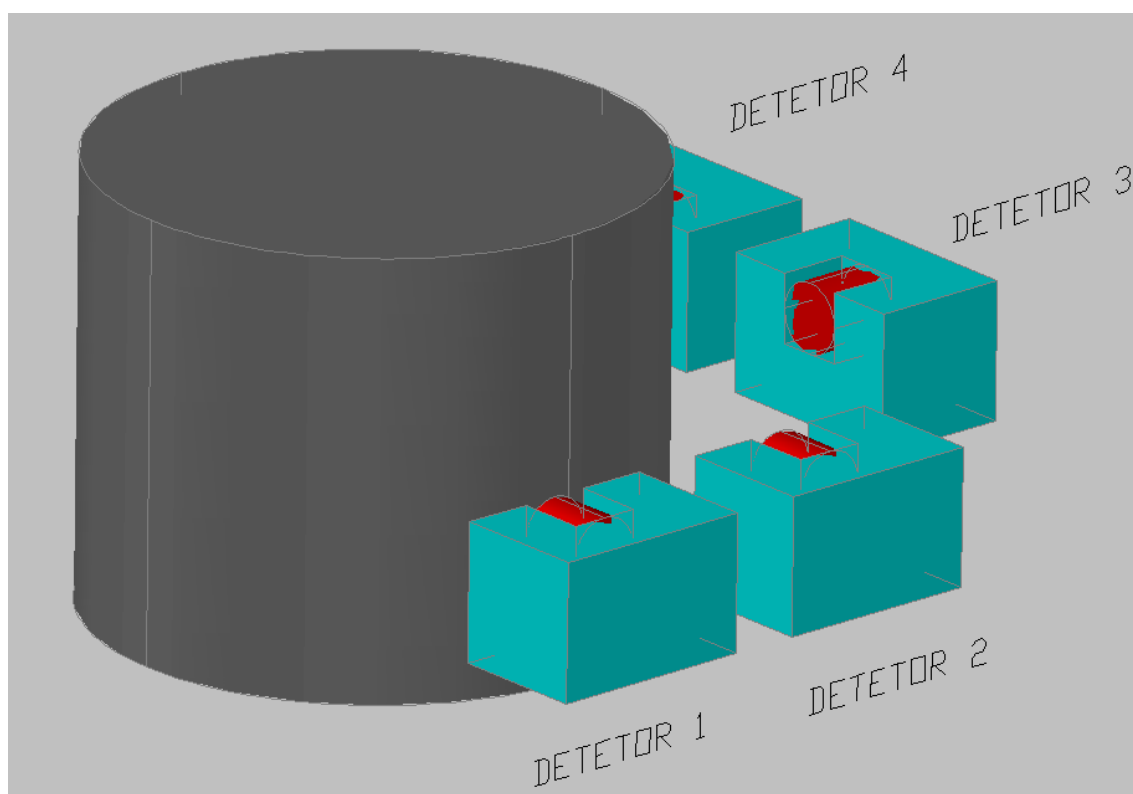


Figura III.3 Detectores dispostos na geometria L em torno da unidade cilíndrica do LTR.

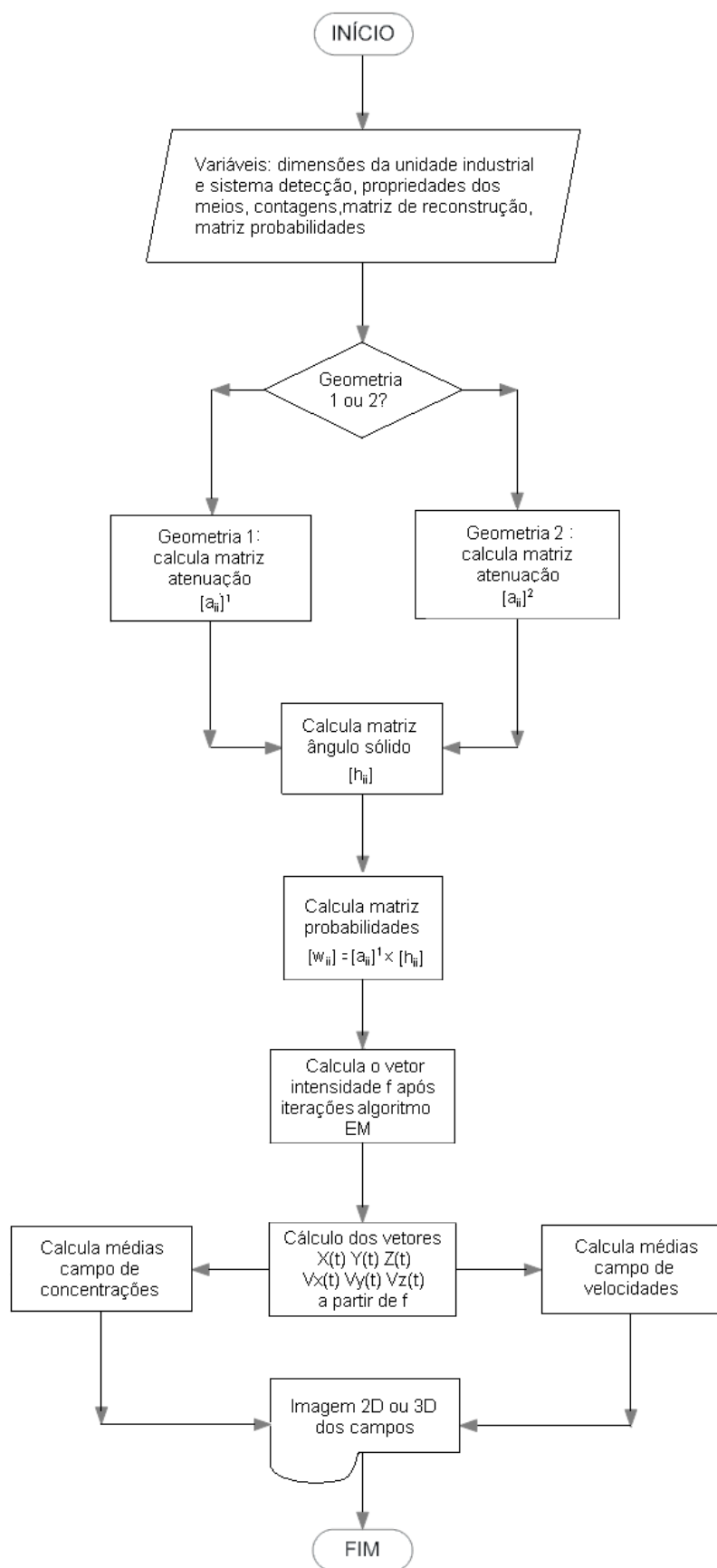


Figura III.4. Diagrama de fluxo do algoritmo.

O diagrama de fluxo montado na figura III.4 contém as principais operações do algoritmo. Os dados e variáveis de entrada mostrados no início do fluxograma estão na função principal do arquivo fonte, impressa no Anexo I, que foi escrito na linguagem C.

O primeiro desvio condicional do fluxograma é necessário porque a matriz de atenuação selecionada ($[a_{ij}]^1$ ou $[a_{ij}]^2$) deve ser específica para uma das duas geometrias de distribuição dos detectores de radiação em torno do tanque (anel ou L). Os elementos a_{ij} são calculados aplicando-se a cada par detector-voxel a equação III.9.

Para a determinação dos fatores de atenuação $[a_{ij}]^1$ ou $[a_{ij}]^2$ indicados no fluxograma, considere o modelo ilustrado na figura III.1. Se P é a posição da partícula radioativa coincidente com o centro do voxel j, D é o centro da face do detector i e a densidade do meio no interior da unidade cilíndrica (meio1) é diferente da densidade do meio exterior (meio 2), o fator de atenuação da radiação gama quando ela é emitida no ponto P e detectada no ponto D é estimado como sendo o produto dos três termos exponenciais descritos na equação III.16. O primeiro termo refere-se à atenuação da radiação ao longo do meio 1, o segundo é o componente de atenuação no meio 2 e o último termo do fator de atenuação é devido à espessura da parede da unidade cilíndrica.

$$a_{ij} = \exp(-u_1 \times PC) \times \exp(-u_2 \times CD) \times \exp(-u_w \times d_w) \quad \text{III.16}$$

Em seguida, o algoritmo deve montar a matriz ângulo sólido $[h_{ij}]$ indicada no fluxograma. Seus elementos constituem os ângulos sólidos h_{ij} calculados para cada par formado entre a posição do centro do detector i e o centro do elemento j da matriz de reconstrução, com o uso da equação III.10. A solução da integral tripla presente naquela equação não pode ser obtida analiticamente e foi preciso incluir no algoritmo a solução numérica da integral dada pelo Método de Simpson 1/3.

Na próxima etapa do algoritmo, os fatores da matriz $[p_{ij}]$ são calculados com o emprego da equação III.12 e, ao final dos cálculos, os elementos da matriz de probabilidades $[w_{ij}]$ são, na verdade, o produto dos fatores de atenuação $[a_{ij}]$, de ângulo sólido $[h_{ij}]$ e de localização $[r_{ij}]$, como descrito na equação III.13

Na etapa seguinte do algoritmo, a localização de cada posição instantânea da partícula é obtida após a execução de pelo menos dez iterações do algoritmo EM, para a determinação do vetor imagem f com o emprego das equações III.14 e III.15. Como será explicado no Capítulo IV, este número mínimo de iterações foi fixado no programa após um estudo de otimização, sendo suficiente para se obter um vetor

imagem f ($n \times 1$) cujos elementos estão relacionados com os n elementos da matriz de reconstrução, ou seja, a cada voxel tridimensional corresponde um elemento do vetor imagem f cuja intensidade é proporcional à Atividade presente no voxel.

O tempo de processamento dos sinais é fundamental na técnica CARPT porque o número de imagens das posições rastreadas da partícula é muito grande. Isto ocorre porque, geralmente, o intervalo de tempo entre duas contagens sucessivas dos fótons nos detectores é da ordem de centésimos de segundo e o tempo total de rastreamento é superior a duas horas. Então, foi incluído no algoritmo um procedimento para truncar o processo de convergência para a solução visando diminuir o tempo total de cálculo. Como o objetivo do algoritmo é a visualização da partícula radioativa que a cada instante só pode estar, obviamente, em um único elemento da matriz de reconstrução, após decorrido o número otimizado de iterações, o valor do elemento de f com maior intensidade, que é único, foi normalizado para o valor 1 e os demais elementos de f , com intensidades menores foram todos igualados com intensidades nulas.

Em seguida, o novo vetor imagem normalizado f ($n \times 1$) é armazenado, na ordem cronológica das imagens, em uma das nT colunas de uma matriz imagem F ($n \times nT$). Esta matriz F guarda as informações de todas as imagens das posições ocupadas pela partícula radioativa durante todo o tempo de rastreamento da mesma.

Na última parte do algoritmo, também é efetuado o cálculo das posições instantâneas ocupadas pela partícula radioativa. Como visto, a imagem da posição da partícula radioativa é obtida pela associação da posição de cada um dos n voxels com a posição do seu elemento correspondente dentre os n elementos do vetor imagem f . Assim, o valor da Atividade do voxel j é igual ao valor da intensidade do elemento f_j que, após a normalização, pode ser um dos $n-1$ valores nulos ou o valor 1. Então, pode-se obter a posição da partícula em um dado instante através da determinação das coordenadas X , Y e Z do voxel cuja intensidade é igual a 1.

Observando-se novamente a figura III.1, verifica-se que R é o raio da secção transversal da unidade industrial e que $d = BD$ é a menor distância entre o ponto de detecção D e a superfície lateral da unidade. Então, as coordenadas X , Y e Z calculadas da posição instantânea da partícula devem estar nos seguintes intervalos:

- 1) Intervalo $X = [-(R+d), (R+d)]$ (largura da base da matriz de reconstrução);
- 2) Intervalo $Y = [-(R+d), (R+d)]$ (largura da base da matriz de reconstrução);
- 3) Intervalo $Z = [0, 2x(R+d)]$ (altura da matriz de reconstrução);

Se, no instante t , o voxel com intensidade 1 está na posição (i, j, k) da matriz de reconstrução, onde i é a linha, j é a coluna e k é a altura, as coordenadas da partícula são obtidas pelas equações III.17, III.18 e III.19.

A equação III.19 foi escrita de forma que a contagem dos voxels comece na maior altura da matriz de reconstrução.

$$X = -R - d + dp \times (j - 1) \quad \text{III.17}$$

$$Y = -R - d + dp \times (i - 1) \quad \text{III.18}$$

$$Z = (2 \times (R + d)/dp - (k - 1)) \times dp - dp \quad \text{III.19}$$

Por exemplo, supondo que se queira calcular as coordenadas da partícula radioativa localizada no centro de um voxel que pertença a uma matriz de reconstrução circunscrita à unidade cilíndrica do LTR, onde $R=20,0$ cm, e $d= 10,0$ cm. Se o comprimento do voxel for $dp=0,4$ cm e ele estiver situado na posição $(31,41,51)$, as coordenadas da partícula são :

$$X = (-20 - 10 + 0,4 \times (41 - 1)) \text{ cm} = -14,0 \text{ cm};$$

$$Y = (-20 - 10 + 0,4 \times (31 - 1)) \text{ cm} = -18,0 \text{ cm};$$

$$Z = ((2 \times (20 + 10)/0,4 - (51 - 1)) \times 0,4 - 0,4) \text{ cm} = 39,6 \text{ cm}.$$

Como o número de voxels da matriz de reconstrução é inteiro, uma condição básica para não haver erro de computação é que o diâmetro da unidade seja divisível pela dimensão do voxel, ou seja, a soma $R + d$ deve ser divisível por dp .

O conjunto de todas as posições calculadas durante o tempo total do rastreamento da partícula é armazenado em uma matriz $P(nT \times 3)$. O conteúdo da matriz P vai permitir o cálculo dos valores das concentrações da partícula em cada posição, bastando para isto efetuar, para cada voxel, a divisão da frequência das ocorrências da partícula nele pela soma das frequências da partícula em todos os voxels.

Pode-se obter também o conjunto das velocidades instantâneas da partícula ao longo do tempo de rastreamento. As componentes cartesianas de cada vetor velocidade, denominado $\mathbf{V}(t) = V_x(t)\mathbf{i} + V_y(t)\mathbf{j} + V_z(t)\mathbf{k}$, são determinadas pela divisão entre a distância percorrida pela partícula ao longo de cada coordenada e o respectivo intervalo de tempo, como expresso nas equações III.20 a III.22 para um deslocamento hipotético da partícula entre dois instantes t_1 e t_2 quando a mesma se move do voxel 1 para o voxel 2, definindo-se a origem do vetor velocidade no voxel 1.

$$V_x = (X_2 - X_1)/(t_2 - t_1) \quad \text{III.20}$$

$$V_y = (Y_2 - Y_1)/(t_2 - t_1) \quad \text{III.21}$$

$$V_z = (Z_2 - Z_1)/(t_2 - t_1) \quad \text{III.22}$$

Além disso, pode-se obter os valores médios da velocidade da partícula na posição de cada voxel dividindo-se a soma vetorial de todas as velocidades instantâneas no voxel durante o tempo total do rastreamento pela frequência de ocorrência da partícula no voxel. O conjunto dos valores médios da concentração é armazenado em um vetor específico (vetor campo de concentrações) e o conjunto dos valores médios das velocidades pode ser armazenado em outro vetor (vetor campo de velocidades). Finalmente, estes vetores de campo são gravados em arquivos ASCII ou de texto e pode-se obter uma imagem da concentração média da partícula radioativa (ou da velocidade média da mesma no interior do cilindro) utilizando-se as ferramentas gráficas 2D ou 3D de um dos vários programas de computação gráfica de uso gratuito (como, por exemplo, o programa OpenDX) para a visualização do campo vetorial no interior da unidade industrial.

III.4 A seleção do radioisótopo e a preparação da partícula radioativa

Nesta seção, descreve-se como foi realizada a seleção do radioisótopo utilizado na terceira etapa da pesquisa (fase experimental).

As propriedades físico-químicas de um grupo pré-selecionado de isótopos que seriam submetidos a um feixe de nêutrons térmicos foram comparadas, levando-se em conta o valor final da Atividade do radioisótopo formado ao final da irradiação. Neste caso, para o cálculo aproximado do valor final da Atividade adquirida por uma amostra do radioisótopo, foi utilizada a equação III.23 (IAEA,1990), que atende à condição citada na secção II.2.

$$A(t_0) = \left(\frac{1,128 \times 10^{13} \times a \times \frac{\sigma_A}{\langle W_i T_B \rangle} \times \Phi}{\frac{0,693}{T_B} + \Phi \times \sigma_B - \Phi \times \sigma_A} \right) \times \left(\exp(-\Phi \times \sigma_A \times t_0) - \exp(-\frac{0,693}{T_B} \times t_0 - \Phi \times \sigma_B \times t_0) \right) \quad \text{III.23}$$

A equação III.23 possui um fator de correção multiplicativo para o caso de auto-ativação do radioisótopo durante a irradiação.

Nas tabelas III.1 e III.2, encontram-se as propriedades do grupo de isótopos pré-selecionados e os valores de fluxo de nêutrons, variáveis com a posição da amostra no Reator Argonauta, que podem ser utilizados nas irradiações dos isótopos.

Nesta seleção, as propriedades dos isótopos pai e filho, foram parâmetros importantes para a exclusão dos isótopos que não atenderam às condições mínimas para a confecção da partícula. As condições consideradas foram:

- 1) o radioisótopo deve ser monoenergético para fins de calibração;
- 2) A partícula radioativa, em qualquer posição do meio, deve produzir uma quantidade de pulsos nos pontos de detecção que sejam bem discriminados em relação aos correspondentes às radiações de fundo e espalhada;
- 3) o diâmetro da partícula deve ser o menor possível para que seu movimento como traçador no fluido, devido às forças de arraste, seja semelhante ao das partículas próprias do meio;
- 4) quando o meio traçado é um fluido, a partícula radioativa deve possuir fluabilidade neutra para que seu comportamento seja semelhante ao das partículas do próprio meio;

Para a avaliação da condição 2, foram estimadas as Atividades mínimas de cada radioisótopo necessárias para a discriminação dos pulsos. Para este fim, foi utilizada a técnica de Monte Carlo para a determinação das taxas de fluência de fótons em um ponto localizado no ar a uma distância de 10 cm de fontes pontuais constituídas por cada radioisótopo listado na tabela III.1. Em seguida, a partir dos valores das taxas de fluência de fótons, foram calculados os tempos de exposição da fonte para a produção de pelo menos vinte contagens naquele mesmo ponto do ar. Enfim, os valores de Atividade foram divididos em grupos de acordo com o tempo de exposição da fonte, como apresentado na tabela III.3.

Para atender a condição 3, é preciso compensar a dependência da Atividade com o valor limitado do fluxo de nêutrons térmicos do reator nuclear. A estratégia adotada foi priorizar a escolha dos isótopos-pai cujas secções de choque de absorção de nêutrons térmicos e abundância na amostra fossem altas o suficiente para garantir a produção do isótopo-filho com um valor de Atividade por unidade de massa suficiente para a realização dos experimentos, o que permite a fabricação de uma partícula com o menor volume possível.

Para a seleção do radioisótopo, foram marcadas em negrito na tabela III.1 as propriedades dos radioisótopos consideradas adequadas e marcadas em itálico aquelas consideradas insatisfatórias. Associando-se estas propriedades com os valores mínimos de Atividade calculados na tabela III.3, foi possível concluir que o radioisótopo ^{198}Au era a melhor opção para ser a fonte emissora de radiação gama na parte experimental da tese.

Tabela III.1 – Propriedades físico-químicas dos isótopos pré-selecionados

Isótopo pai	^{45}Sc	^{45}Sc	^{48}V	^{75}Se
Secção de choque ⁽¹⁾	$2,75 \times 10^{-27}$	$2,75 \times 10^{-27}$	art	art
Massa atômica	44,96	44,96	-	-
Forma química	Sc	$\text{Sc}^{2+}\text{O}^{3-}$	-	-
Abundância (%)	1,000	1,000	-	-
densidade (g/cm ³)	2,98	3,8	6,1	4,79

Tabela III.1 (continuação)

Isótopo pai	^{139}La	^{55}Mn	^{23}Na	^{152}Sm
Secçãochoque ⁽¹⁾	<i>9×10^{-28}</i>	$1,33 \times 10^{-27}$	<i>$5,3 \times 10^{-29}$</i>	<i>$2,06 \times 10^{-29}$</i>
Massa atômica	<i>138,91</i>		22,9	<i>151,92</i>
Forma química	$\text{La}^{2+}\text{O}^{3-}$	MnO^{2-}	$\text{Na}^{+}\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Sm}^{2+}\text{O}^{3-}$
Abundância (%)	0,999		1,000	<i>0,268</i>
densidade (g/cm ³)	<i>6,51</i>		2,53	<i>7,9</i>

Tabela III.1 (continuação)

Isótopo pai	^{153}Eu	^{154}Eu	^{111}In	^{197}Au	$^{110\text{m}}\text{Ag}$
Secçãochoque ⁽¹⁾	$3,12 \times 10^{-26}$	$3,1 \times 10^{-26}$	art	$9,9 \times 10^{-27}$	$9,1 \times 10^{-27}$
Massa atômica	-	196,97	107,9		22,9
Forma química	$\text{Eu}^{2+}\text{O}^{3-}$	Eu^{2+}O_3	-	^{197}Au	^{109}Ag
Abundância (%)	<i>0,522</i>	<i>0,522</i>	-	1,000	<i>0,482</i>
densidade (g/cm ³)	<i>7,3</i>	<i>7,3</i>	<i>8,65</i>	<i>19,3</i>	<i>10,49</i>

(1)– secção de choque microscópica de absorção de nêutrons térmicos

Tabela III.2 – Fluxos de nêutrons no Reator Argonauta -Potência de operação = 340 W

Nêutrons térmicos (núcleo)	Nêutrons epitérmicos (canal J9)
$4,2 \times 10^9$ nêutrons/cm ² .s	2×10^5 nêutrons/cm ² .s

Tabela III.3 – Valores mínimos da Atividade em função do tempo de exposição para a obtenção de mais de 20 contagens no ar, a 10 cm de distância da fonte.

Isótopo pai	⁴⁵ Sc	⁴⁵ Sc	⁴⁸ V	⁷⁵ Se	¹³⁹ La
Radioisótopo	⁴⁶ Sc	⁴⁶ Sc	⁴⁸ V	⁷⁵ Se	¹⁴⁰ La
Intervalo de tempo (s)	0,05				
Atividade(Bq)	3,2E+07	3,2E+07	2,5E+07	6,4E+07	8,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,1				
Atividade(Bq)	1,6E+07	1,6E+07	1,3E+07	3,2E+07	4,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,15				
Atividade(Bq)	1,1E+07	1,07E+07	8,3E+07	2,1E+07	2,7E+07
Intervalo de tempo (s)	0,2				
Atividade(Bq)	8,0E+06	8,0E+06	6,3E+06	1,6E+07	2,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,25				
Atividade(Bq)	6,4E+06	6,4E+06	5,0E+06	1,28E+07	1,6E+06
Intervalo de tempo (s)	0,30				
Atividade(Bq)	5,3E+06	5,3E+06	4,2E+07	1,1E+07	1,3E+07
Intervalo de tempo (s)	0,35				
Atividade(Bq)	4,6E+06	4,6E+06	3,6E+06	9,1E+06	1,1E+06
Intervalo de tempo (s)	0,40				
Atividade(Bq)	4,0E+06	4,0E+06	3,1E+06	8,0E+06	1,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,45				
Atividade(Bq)	3,6E+06	3,6E+06	2,7E+06	7,1E+06	8,9E+05

Tabela III.3 (continuação)

Isótopo pai	²³ Na	¹⁵² Sm	¹⁵³ Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁹⁷ Au	^{110m} Ag
Radioisótopo	²⁴ Na	¹⁵³ Sm	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	¹⁹⁸ Au	^{110m} Ag
Intervalo de tempo (s)	0,05					
Atividade(Bq)	2,5E+07	3,2E+08	6,0E+07	3,2E+07	1,3E+08	3,2E+07
Intervalo de tempo (s)	0,1					
Atividade(Bq)	1,3E+07	1,6E+08	3,0E+07	1,6E+07	6,4E+07	1,6E+07
Intervalo de tempo (s)	0,15					
Atividade(Bq)	8,3E+07	1,1E+08	2,0E+07	1,1E+07	4,3E+07	1,1E+07
Intervalo de tempo (s)	0,2					
Atividade(Bq)	6,3E+06	8,0E+07	1,5E+07	8,0E+06	3,2E+07	8,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,25					
Atividade(Bq)	5,0E+06	6,4E+07	1,2E+07	6,4E+06	2,6E+07	6,4E+06
Intervalo de tempo (s)	0,30					
Atividade(Bq)	4,2E+06	5,3E+07	1,0E+07	5,3E+06	2,1E+07	5,3E+06
Intervalo de tempo (s)	0,35					
Atividade(Bq)	3,6E+06	4,6E+07	8,6E+06	4,6E+06	1,8E+07	4,6E+06
Intervalo de tempo (s)	0,40					
Atividade(Bq)	3,1E+06	4,0E+07	7,5E+06	4,0E+06	1,6E+07	4,0E+06
Intervalo de tempo (s)	0,45					
Atividade(Bq)	2,8E+06	3,6E+07	6,7E+06	3,6E+06	1,4E+07	3,6E+06

A condição 4 exige que o empuxo do fluido sobre a partícula e o seu peso tenham módulos iguais. O cálculo direto do empuxo foi realizado para se obter uma estimativa do raio externo da partícula radioativa usada nos experimentos. Na prática,

esta condição de equilíbrio é perturbada por diversos fatores extrínsecos e o raio final da partícula só foi conhecido após sua fabricação. A condição de equilíbrio na água da partícula esférica feita exclusivamente de ^{198}Au , com diâmetro aproximadamente igual a 1mm, não é satisfeita devido à densidade relativa deste elemento químico. O procedimento para a confecção da partícula foi o seguinte: primeiro, um fio de ouro (^{197}Au) com grau de pureza igual a 99,99% e massa igual à determinada no cálculo direto do empuxo, foi derretido e transformado em uma esfera por um profissional especialista na confecção de jóias e, em seguida, a solução encontrada para a garantia da flutuação da partícula de ^{198}Au naquele meio foi resisti-la com sucessivas camadas de poliuretano expandido, utilizado na forma de aerossol, porque permitiu maior controle da espessura do revestimento. Deste modo, foram fabricadas três partículas para a realização dos experimentos, doravante denominadas esferas 1, 2 e 3 e discriminadas na tabela III.4., sendo que a última foi designada apenas para a determinação de alguns parâmetros do sistema de detecção, como o tempo de ativação do ^{197}Au .

Tabela III.4 As características das partículas fabricadas para os ensaios

Partícula	Cor	Massa (mg)	Diâmetro (cm)
Esfera 1	Verde	66,0	0,4
Esfera 2	Azul	65,0	0,4
Esfera 3	Vermelha	17,0	0,3

III.5 Aplicação do método utilizando valores simulados das contagens

Foram simuladas, com um programa de cálculo baseado no Método de Monte Carlo, as contagens da radiação gama nas posições hipotéticas ocupadas por quatro detectores, se eles fossem montados na geometria anel ao redor de um fantoma de água com o formato cilíndrico. As contagens foram devidas a uma fonte pontual estática de ^{198}Au colocada no interior da água, fixando-se sua Atividade (com base nos cálculos da secção III.3) , posição e o meio externo ao fantoma (ar).

A geometria simulada foi concebida de modo que os quatro centros de detecção estão posicionados em torno da secção transversal do cilindro que representa a unidade industrial. Este cilindro está contido em um arranjo tridimensional de células fixas, ou voxels, denominado matriz de reconstrução, de

modo que o comprimento linear de cada célula seja igual ao diâmetro da partícula radioativa.

As posições escolhidas para a fonte radioativa estão listadas na tabela III.5 e os parâmetros da simulação, juntamente com as dimensões do fantoma, estão descritos na tabela III.3. Verificou-se a necessidade de se diferenciar a coordenada Z de pelo menos um detector em relação a dos outros para evitar ambiguidade na localização da fonte radioativa em relação ao eixo Z. Com uma geometria contendo apenas quatro detectores situados na mesma cota Z do centro do cilindro, não há como distinguir, com os quatro valores de contagens, se a fonte pontual está, por exemplo, na posição (0,0,15) ou na posição (0,0,-15). Assim, na tabela III.6, a coordenada Z dos detectores 2 e 4 difere em 5 cm da mesma coordenada dos detectores 1 e 3.

Tabela III.5 Posições simuladas da partícula radioativa

Posição	X (cm)	Y(cm)	Z(cm)
P1	0	15	10
P2	-12	14	10
P3	-10	5	10
P4	-10	-5	10
P5	-12	-14	10
P6	0	-15	10
P7	12	-14	10
P8	10	-5	10
P9	10	5	10
P10	12	14	10

Tabela III.6. Os principais parâmetros da avaliação

1	Altura do tanque (cm)		32,0 ± 0,05	
2	Diâmetro da secção transversal (cm)		40 ± 0,05	
3	Meio		Água	
4	Radioisótopo/geometria da fonte/Atividade (Bq)		¹⁹⁸ Au/pontual/3,1471 x10 ⁶	
5	Comprimento do voxel (cm)		0,3 ± 0,05	
6	Coeficiente de atenuação linear (cm ⁻¹)		0,1061	
7	Energia do fóton (Mev)		0,412 (97%)	
8	Distância centro face detector-eixo Z (cm)		35	
9	Diâmetro face detector (cm)		2,54 ± 0,005	
10	Coordenadas (cm)			
	Detector 1	Detector 2	Detector 3	Detector 4
	(0,-35,30)	(35,0,25)	(0,35,30);	(-35,0,25)

III.6 Otimização das coordenadas do sistema de detecção

O ângulo sólido subentendido entre a fonte radioativa e o detector e o fator de atenuação do meio contido no interior da unidade industrial são os principais fatores relacionados com as taxas de contagens registradas pelo sistema de aquisição de dados. A determinação do melhor conjunto de coordenadas dos detectores para a configuração do arranjo experimental também deve levar em conta a influência desses fatores, de preferência com o emprego de um método de otimização.

Para a otimização da configuração dos detectores, foram consideradas duas geometrias básicas: uma na forma de anel, que se assemelha à distribuição de detectores ao redor do objeto nas aplicações da tomografia convencional - figura III.5 - e a outra na forma da letra “L”, como apresentado na figura III.6, que pode ser conveniente em situações onde apenas parte da superfície lateral da unidade industrial é acessível, como no caso em que outras unidades ou barreiras estejam posicionadas ao redor dela e não possam ser removidas.

Os detectores NaI:TI podem ser dispostos nas geometrias básicas, doravante denominadas, geometria anel e geometria L, em um número ilimitado de coordenadas X,Y,Z. Então, para simplificar o método de otimização, foram selecionados oito grupos de coordenadas, levando-se em conta a simetria da distribuição dos detectores: quatro na geometria anel e quatro na geometria L. As coordenadas dos detectores 1 a 4 correspondentes à geometria anel estão reproduzidos na tabela III.7 e aquelas correspondentes à geometria L estão na tabela III.8.

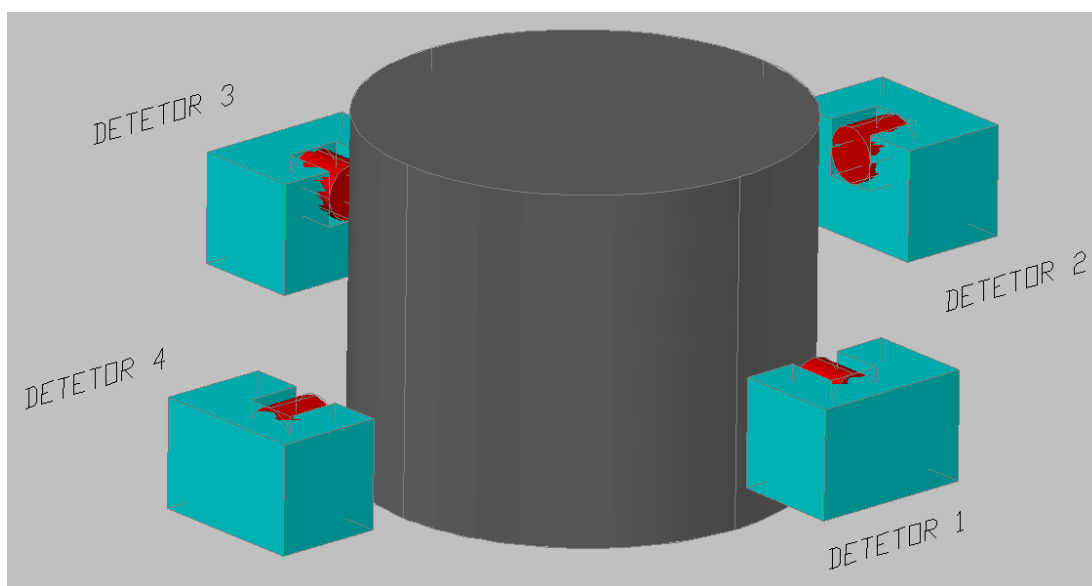


Figura III.5 Arranjo experimental dos detectores 1 a 4 na geometria anel (3D).

Tabela III.7 Coordenadas dos detectores na geometria anel. A unidade é o centímetro.

	Detector 1			Detector 2			Detector 3			Detector 4		
Geometria	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
A1	0	-30	16	30	0	21	0	30	16	-30	0	21
A2	0	-30	16	30	0	21	0	30	16	-30	0	11
A3	0	-30	21	30	0	21	0	30	11	-30	0	11
A4	0	-30	21	30	0	11	0	30	21	-30	0	11

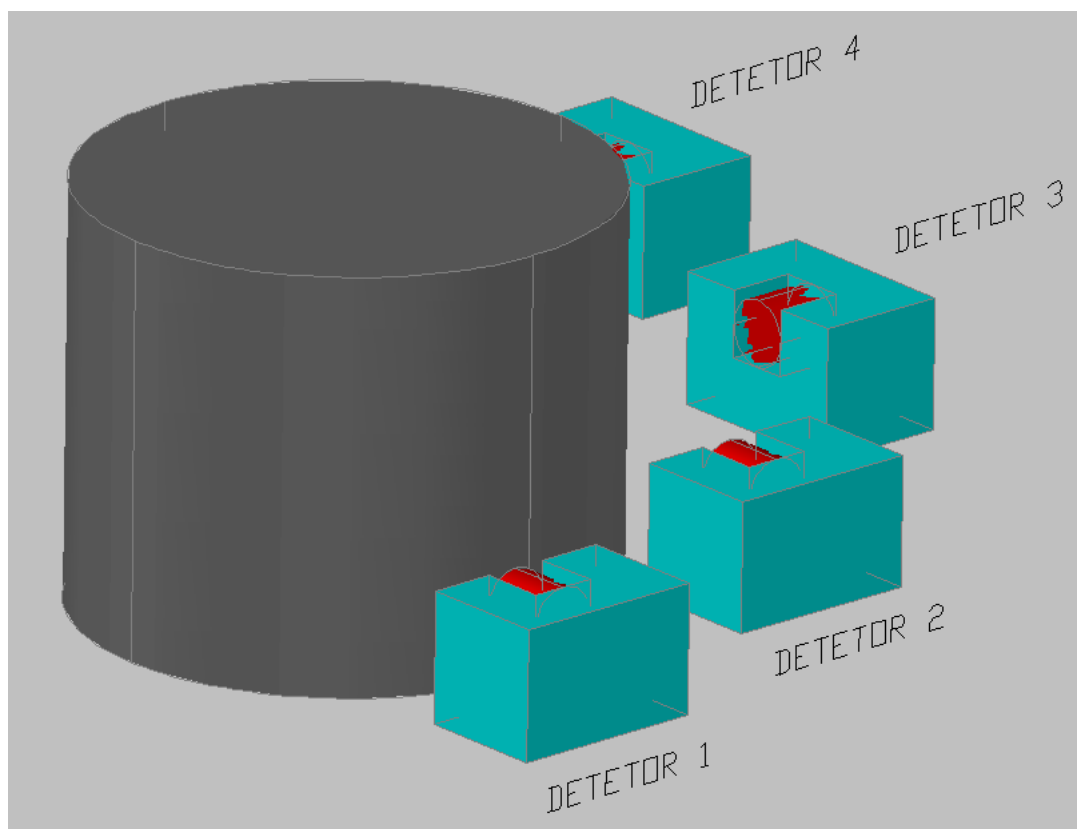


Figura III.6 arranjo experimental dos detectores 1 a 4 na geometria L (3D).

Tabela III.8 Coordenadas dos detectores na geometria L. A unidade é o centímetro.

	Detector 1			Detector 2			Detector 3			Detector 4		
Geometria	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
L1	-10	-30	16	10	-30	21	30	-10	16	30	10	21
L2	-10	-30	16	10	-30	21	30	-10	16	30	10	11
L3	-10	-30	11	10	-30	16	30	-10	16	30	10	21
L4	-10	-30	21	10	-30	11	30	-10	21	30	10	11

Para a escolha das coordenadas dos detectores em cada geometria, foi estabelecido o seguinte critério de seleção.: primeiro, foi escolhida uma forma de distribuir simetricamente no interior do cilindro, sobre um plano perpendicular ao seu eixo vertical (plano X'Y'), quatro fontes radioativas pontuais com a mesma Atividade;

em seguida, através de um programa baseado na técnica de Monte Carlo, foi simulada a taxa de fluência de fótons devida àquela distribuição radioativa na posição de cada detector. Continuando, a configuração ótima para uma dada geometria, foi aquela que mais se aproximou das condições ideais 1 e 2 descritas assim:

- 1) A soma das taxas de fluência de fótons nas posições dos detectores deve ser máxima;
- 2) A soma definida pela condição 1 independe da altura do plano X'Y' onde as fontes radioativas foram distribuídas

Os planos X'Y' escolhidos foram: o plano que contém a base superior do cilindro, o plano que passa pelo seu centro e o plano da base inferior.

Foi conveniente a adoção, para as medições de taxa de fluência, a convenção de se fazer coincidir a origem do sistema de coordenadas com o centro da face de cada detector. O valor escolhido para a Atividade das esferas foi igual a 7MBq.

Na tabela III.9, as linhas 2, 6, 10 e 14 contêm as coordenadas dos quatro detectores na geometria anel, as colunas 6, 7 e 8 contêm as coordenadas das fontes radioativas em relação a cada detector, quando colocadas em quatro posições no plano perpendicular ao cilindro passando pela altura igual a 30 cm e a última coluna contêm os valores calculados da taxa de fluência de fótons nas posições dos detectores. A soma dessas taxas de fluência (como definida na condição 1) está na última linha da tabela.

Analogamente, foram calculadas as somas das taxas de fluência de fótons de todas as configurações nos planos $Z = 0$ e $Z = 30,0$ cm e os resultados da seleção se encontram no capítulo IV.

Tabela III.9. Geometria anel: detetores na configuração A1 e distribuição radioativa no plano $z = 30$ cm. A unidade das coordenadas é o centímetro

Detector	Xd	Yd	Zd	Fonte	Coordenadas da fonte			Φ fóton/cm ² .s
					xf	yf	zf	
1	0	-30	16	1	-12	14	30	1
				2	12	14	30	1
				3	-12	-14	30	77
				4	12	-14	30	77
2	30	0	21	1	-12	14	30	2
				2	12	14	30	73
				3	-12	-14	30	2
				4	12	-14	30	73
3	0	30	16	1	-12	14	30	77
				2	12	14	30	77
				3	-12	-14	30	1
				4	12	-14	30	1
4	-30	0	21	1	-12	14	30	73
				2	12	14	30	2
				3	-12	-14	30	73
				4	12	-14	30	2
SOMA DAS TAXAS DE FLUÊNCIA								612

III.7 Otimização do sistema de aquisição e tratamento de dados

Na figura III.7, está apresentado o esquema de cada um dos quatro sistemas de detecção da radiação gama montados para as medições das contagens nos detetores e registro dos dados experimentais. Os módulos componentes de cada sistema são:

- 1) Uma fonte calibrada de ^{137}Cs ou a partícula de ^{198}Au ;
- 2) um detector NaI(Tl) com diâmetro igual a 2,54cm e fotomultiplicadora acoplada;
- 3) um pré-amplificador ;
- 4) amplificador;
- 5) analisador monocal ;
- 6) contador e temporizador;
- 7) fonte de alta tensão;
- 8) um osciloscópio

A instrumentação utilizada encontra-se no Laboratório de Radiotraçadores do Instituto de Engenharia Nuclear, onde foram realizados, na segunda etapa da pesquisa, os seguintes procedimentos:

- 1) A determinação do ponto de operação das fotomultiplicadoras dos quatro detetores NaI(Tl) utilizados na pesquisa;
- 2) a otimização dos quatro sistemas de detecção em relação ao ^{137}Cs e ao ^{198}Au ;
- 3) a determinação da eficiência na energia do fotopico do ^{198}Au e da Atividade das esferas 1 e 2;
- 4) a determinação da resposta do detector NaI(Tl) em função da distância entre o detetor e a fonte (distâncias sobre os eixos X, Y e Z, onde a origem das coordenadas é o centro da face do detector) ;
- 5) medição e o registro das contagens durante o movimento da partícula radioativa imersa no tanque, utilizando quatro sistemas de aquisição completos.

Os procedimentos 1 e 2 acima descritos estão detalhados na literatura sobre Técnicas Nucleares de Medidas (KNOLL, 1999) (TSOULFANIDIS, 1995). As contagens foram realizadas com o conjunto detector-fotomultiplicadora blindado por uma parede de chumbo com cerca de 5cm de espessura para reduzir a contribuição da radiação de fundo.

Ao final do procedimento 2, foram localizadas e fixadas as janelas dos quatro analisadores tipo monocanal correspondentes à faixa de energia do ^{198}Au (canal de máxima contagem obtido com os espectros diferenciais do ^{198}Au).

No procedimento 3, a eficiência de cada um dos quatro detectores para a energia do fotopico do ^{198}Au , igual a 412 keV, foi calculada por interpolação em uma curva de eficiência em função da energia. Esta curva foi construída com um ajuste matemático, realizado com o método de mínimos quadrados não linear, dos valores de eficiência calculados para as energias descritas na tabela III.10 (RAMOS, 2006).

Após as esferas 1 e 2 terem sido irradiadas no Reator Argonauta durante dez e quatro horas, respectivamente, foram realizadas uma série de contagens com as mesmas posicionadas a uma distância igual a 10,3 cm da face de um detector NaI:TI (2"x2") que foi montado em um contador de Atividade Total (RAMOS, 2006). Os valores das Atividades das esferas 1 e 2 foram obtidos isolando-se a variável A na equação II.12 (Capítulo II).

Tabela III.10 As fontes-padrão utilizadas na determinação da eficiência de fotopico dos detectores (RAMOS, 2006)

Radioisótopo	^{241}Am	^{137}Cs	^{22}Na		^{152}Eu		^{60}Co	
Energia(keV)	59,54	661,65	1274,50	244,69	344,27	1408,0	1173,20	1332,50

O erro no cálculo da Atividade das esferas de ^{198}Au foi estimado como sendo inferior a 5%. Este é o valor calculado do erro percentual na determinação da Atividade Média em função da área sob o fotopico de energia de uma fonte radial plana calibrada de ^{137}Cs , onde as contagens são realizadas no contador de Atividade Total do Laboratório de Radiotraçadores (RAMOS,2006).

No procedimento 4, as saídas dos contadores dos sistemas estão direcionadas para quatro canais de uma placa de aquisição capaz de efetuar o registro das contagens com temporização igual a 0,01 s.

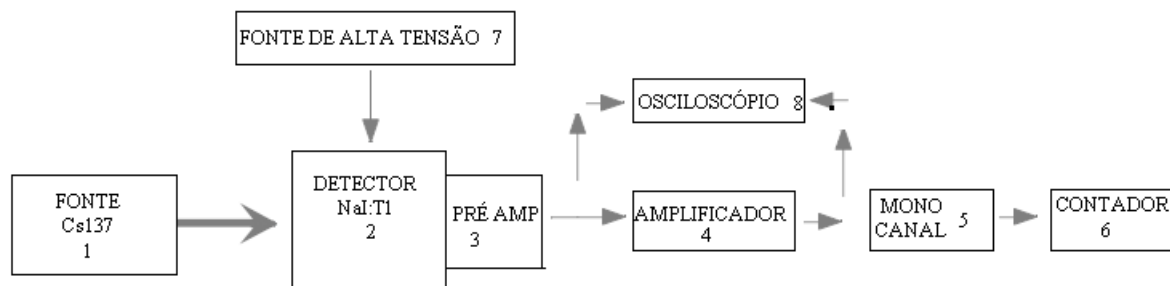


Figura III.7 Esquema simplificado para a montagem de cada um dos sistemas de detecção.

III.8 Ensaios

Para a avaliação do método em escala reduzida, foram realizados experimentos para a localização da partícula radioativa em processos de agitação da água em um tanque com forma cilíndrica. O radioisótopo utilizado foi o ^{198}Au na forma das esferas produzidas para este fim.

Quatro sistemas de aquisição de dados, típicos do estudo de processos com radiotraçadores, foram preparados para a contagem e gravação dos pulsos relativos ao decaimento gama da partícula de ^{198}Au durante os experimentos. Os detectores foram montados ao redor de um tanque de mistura rápida para a reprodução das duas geometrias selecionadas - os formatos anel e L.

As séries de contagens medidas em cada ensaio foram gravadas em arquivos ASCII. Estes arquivos constituem o conjunto de dados de entrada do algoritmo que, por sua vez, fornece os vetores que contêm as variáveis de interesse para o rastreamento da partícula radioativa (posições, concentrações, etc.)

III.8.1 Experimentos utilizando a geometria anel

A figura III.8 apresenta o arranjo experimental montado para a realização dos ensaios para o rastreamento da trajetória da partícula. A descrição dos parâmetros físicos experimentais está resumida na tabela III.11 e a identificação dos ensaios realizados com diferentes valores médios do período de rotação das pás está na tabela III.12. A partícula radioativa utilizada foi a esfera 1, com massa igual a 65 mg e Atividade igual a $9,00 \times 10^5 \pm 6300$ Bq. As pás são movimentadas por um motor elétrico e a velocidade angular do eixo onde elas estavam fixadas foi alterada de acordo com o ensaio. A medição dos períodos de rotação das pás foi realizada com um cronômetro analógico.

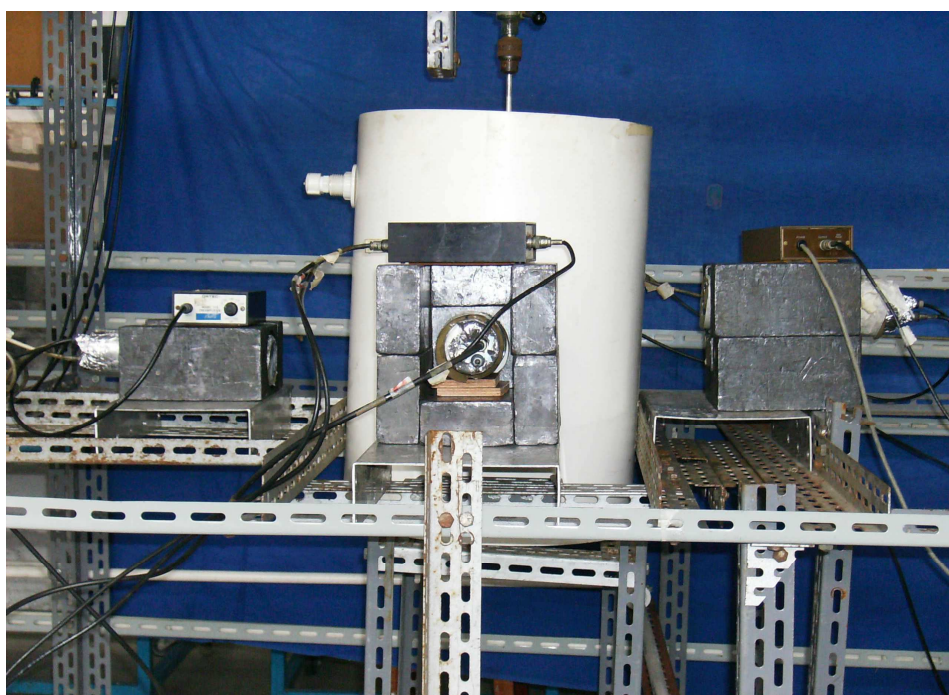


Figura III.8 Arranjo detectores montado para a realização dos ensaios - geometria A2

Tabela III.11 Principais parâmetros dos ensaios realizados com a geometria anel

Nível da água no tanque (cm)	32,0±0,05		
Diâmetro do tanque (cm)	40,0±0,05		
Radioisótopo/partícula radioativa/Atividade (Bq)	¹⁹⁸ Au/esfera 1/(9,0 x10 ⁵)±6300		
Coeficiente de atenuação linear água(cm ⁻¹)	0,1061 ¹		
Coeficiente de atenuação linear ar (cm ⁻¹)	0,0001053 ¹		
Coeficiente de atenuação linear parede(cm ⁻¹)	0,20424 ¹		
Energia do fóton (Mev)	0,412 (95,56%) ²		
Distância centro tanque-face detector (cm)	30,0 ±0,05		
Diâmetro face detector (cm)	5,08±0,005		
Comprimento do colimador (cm)	10,0±0,05		
Abertura do colimador (cm)	5,09±0,05		
Coordenadas A2 (cm)			
Detector 1	Detector 2	Detector 3	Detector 4
(0,-30,16)	(30,0,21)	(0,30,16)	(-30,0,11)

(1) (NIST, 2002)

(2) (IAEA ,2003)

Tabela III.12 Ensaios realizados com a geometria anel

Ensaio	Arquivo dados	meio a	meio b	T(s)	ω (rad/s)
A	W_ar_base	ar	ar	-	-
B	W_agua_rot1	água	ar	5,5	1,1
C	W_agua_rot2	água	ar	2,3	2,7
D	W_agua_rot3	água	ar	1,8	3,5
E	W_agua_livre1	água	ar	0,8	7,9
F	W_agua_livre 2	água	ar	2,0	3,0
G	W_agua_ZM1	água	ar	2,0	3,0
H	W_agua_ZM2	água	ar	2,0	3,0
I	W_agua_ZM3	água	ar	2,0	3,0

III.8.1.1 Descrição dos ensaios com a geometria anel

Ensaio A - Este foi um ensaio preparatório durante o qual foi realizada uma série de contagens para a medição da radiação de fundo no local, sem a presença de fontes radioativas. Esta série de contagens foi utilizada para a correção das contagens dos demais ensaios.

Ensaios B, C e D - A esfera 1 foi fixada na extremidade de uma das pás, a 9,5±0,05 cm de distância do eixo central do tanque e na altura Z = 12,5 ± 0,05 cm e, em seguida, foram adicionados cerca de 40 l de água no interior do tanque. Finalmente, ajustou-se a potência do motor para alterar a velocidade angular do conjunto pá-esfera de acordo com o teste e iniciou-se o rastreamento do movimento da esfera com o sistema de detecção da radiação gama.

Ensaio E e F - Em ambos, a esfera 1 foi abandonada no interior do tanque, onde a água já estava em movimento devido à rotação das pás com velocidades angulares distintas.

Ensaio G, H e I - Em cada ensaio, a esfera 1 foi solta no tanque, onde a água já estava em movimento com as pás em rotação, mas agora o meio possui uma região de zona morta criada pela presença de uma placa de PVC que fora encaixada em uma secção longitudinal do tanque.

III.8.2 Experimentos utilizando a geometria L

A figura III.9 apresenta o segundo arranjo experimental montado em torno do mesmo tanque para a realização de novos ensaios. A partícula radioativa utilizada foi a esfera 2, com Atividade igual a $4,66 \times 10^5 \pm 3262$ Bq. O volume utilizado de água no tanque foi o mesmo usado nos testes com a geometria anel. Os principais parâmetros físicos estão descritos na tabela III.13 e a discriminação dos ensaios, assim como os valores calculados da velocidade angular média (ω) estão na tabela III.14.

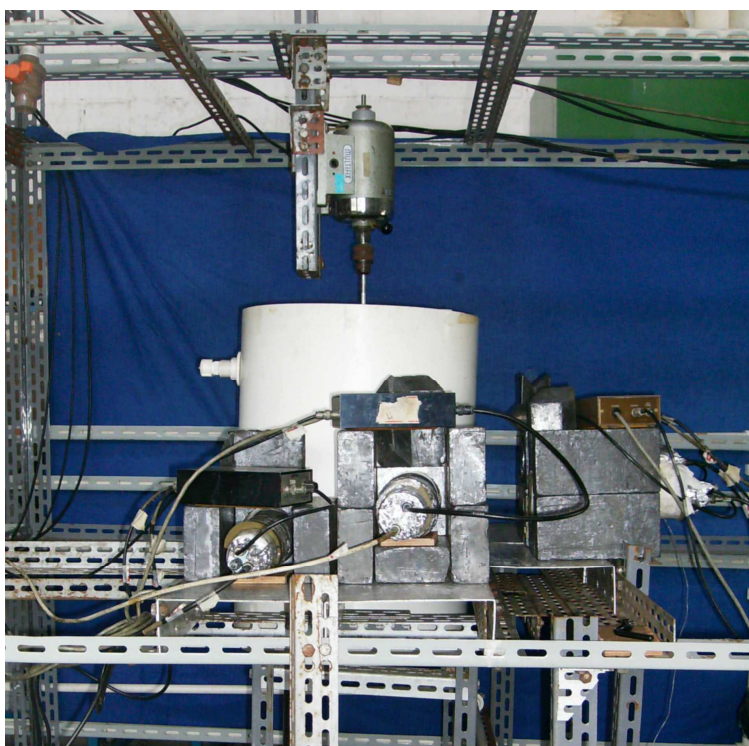


Figura III.9 Arranjo detectores montado para a realização dos ensaios - geometria L2

Tabela III.13 Principais parâmetros dos ensaios realizados com a geometria L

Nível da água no tanque (cm)	32,0±0,05		
Diâmetro do tanque (cm)	40,0±0,05		
Radioisótopo/partícula radioativa/Atividade (Bq)	¹⁹⁸ Au/esfera 2/(4,66 x10 ⁵)±3262		
Coeficiente de atenuação linear água(cm ⁻¹)	0,1061 ¹		
Coeficiente de atenuação linear ar (cm ⁻¹)	0,0001053 ¹		
Coeficiente de atenuação linear parede(cm ⁻¹)	0,20424 ¹		
Energia do fóton (Mev)	0,412 (95,56%) ²		
Distância centro tanque-face detector (cm)	30,0±0,05		
Diâmetro face detector (cm)	5,08±0,005		
Comprimento do colimador (cm)	10,0±0,05		
Coordenadas L2 (cm – incerteza = 0,1 cm)			
Detector 1	Detector 2	Detector 3	Detector 4
(-10,-30,11)	(10,-30,16)	(30,-10,16)	(30,10,21)

(1) (NIST, 2002)

(2) (IAEA, 2003)

Tabela III.14 Ensaios realizados com a geometria L

Ensaio	Arquivo dados	meio a	meio b	T(s)	ω(rad/s)
J	W_test2_rot2	água	ar	1,4	4,7
K	W_test2_rot3	água	ar	1,0	6,3
L	W_test2_rot4	água	ar	0,6	10,5
M	W_test2_ZM1	água	ar	1,4	4,7
N	W_test2_ZM2	água	ar	0,9	7,0
O	W_test2_ZM3	água	ar	2,0	3,0

III.8.2.1 Descrição dos experimentos para o rastreamento da trajetória da partícula

Ensaios J, K e L – Em cada teste, a água no interior do tanque já estava em movimento, agitada pelas pás em rotação com uma determinada velocidade angular, quando a esfera 2 foi liberada na água para o início do rastreamento. As velocidades angulares nos testes foram diferentes entre si.

Ensaios M, N e O – Foi inserida uma placa de PVC ao longo de uma secção vertical do tanque, o que criou uma região de zona morta em uma parte do mesmo durante o movimento das pás com três velocidades angulares distintas. Em cada teste, a esfera 2 foi lançada na água após o início do movimento de rotação das pás, como nos testes G,H,I da geometria anel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1 Aplicação do método utilizando valores simulados das contagens

Na tabela IV.1, estão apresentados os valores teóricos das coordenadas de cada posição da fonte (como descrito no capítulo III), os valores correspondentes calculados pelo algoritmo e os erros associados.

Tabela IV.1 Valores das coordenadas de P1 a P10 avaliados pelo algoritmo

Posição teórica (Pt)	X (cm)	Y(cm)	Z(cm)
P1	0	15	10
P2	-12	14	10
P3	-10	5	10
P4	-10	-5	10
P5	-12	-14	10
P6	0	-15	10
P7	12	-14	10
P8	10	-5	10
P9	10	5	10
P10	12	14	10
Posição calculada(Pc)	X (cm)	Y(cm)	Z(cm)
P2	-11,6	12,95	8,4
P3	-10,2	5,3	10,9
P4	-10,2	-5,3	10,9
P5	-11,9	-13,3	8,4
P6	0,0	-15,1	11,6
P7	11,9	-13,3	10,9
P8	10,2	-5,6	10,9
P9	10,2	5,6	8,4
P10	11,9	13,3	11,6
Erro médio(%) = $100 \cdot (Pt - Pc) / Pt$			
P2	7,8		
P3	5,6		
P4	4,6		
P5	5,9		
P6	5,6		
P7	0,3		
P8	6,3		
P9	4,3		
P10	1,5		

Pelo que pode ser observado na tabela IV.1, o maior erro encontrado foi igual a 7,8% sendo irrelevante para fins de diagnóstico porque, em uma escala real, as diferenças encontradas entre os valores calculados e os reais, inferiores a 3 cm, podem ser desprezadas quando comparadas com as dimensões lineares reais da unidade real, que estão na faixa de dezenas de metros.

IV.2 Otimização da geometria do sistema de detecção

A análise dos resultados das tabelas do Anexo III possibilitou resumir as informações sobre as somas das taxas de fluência nas tabelas IV.2 e IV.3. Agora, aplicando o critério de seleção adotado no capítulo 3, verifica-se que as configurações A2 e A3 da geometria anel e as configurações L1 e L2 da geometria L atendem as condições 1 e 2 daquele critério e podem ser escolhidas para a realização dos testes experimentais.

Tabela IV.2 Comparação das somas das taxas de fluência na geometria anel

	Configuração			
Nível do tanque	A1	A2	A3	A4
30 cm	612	526	546	653
0	447	526	546	492

Tabela IV.3 Comparação das somas das taxas de fluência na geometria L

	Configuração			
Nível do tanque	L1	L2	L3	L4
30 cm	2911	2825	2184	2614
0	2845	2623	3184	3191

IV.3 Otimização do sistema de aquisição de dados

IV.3.1 Otimização dos quatro sistemas de detecção em relação ao ^{137}Cs e ao ^{198}Au

Os espectros de emissão de radiação gama dos sistemas com detectores cintiladores NaI:TI, para o ^{137}Cs , estão ilustradas na figura IV.1, as suas propriedades estão na tabela IV.4. As curvas correspondentes aos espectros do ^{198}Au podem ser vistas nas figura IV.2 a IV.5. Os valores calculados da eficiência destes detectores na energia do fotopico do ^{198}Au (412 keV) estão na tabela IV.4 .

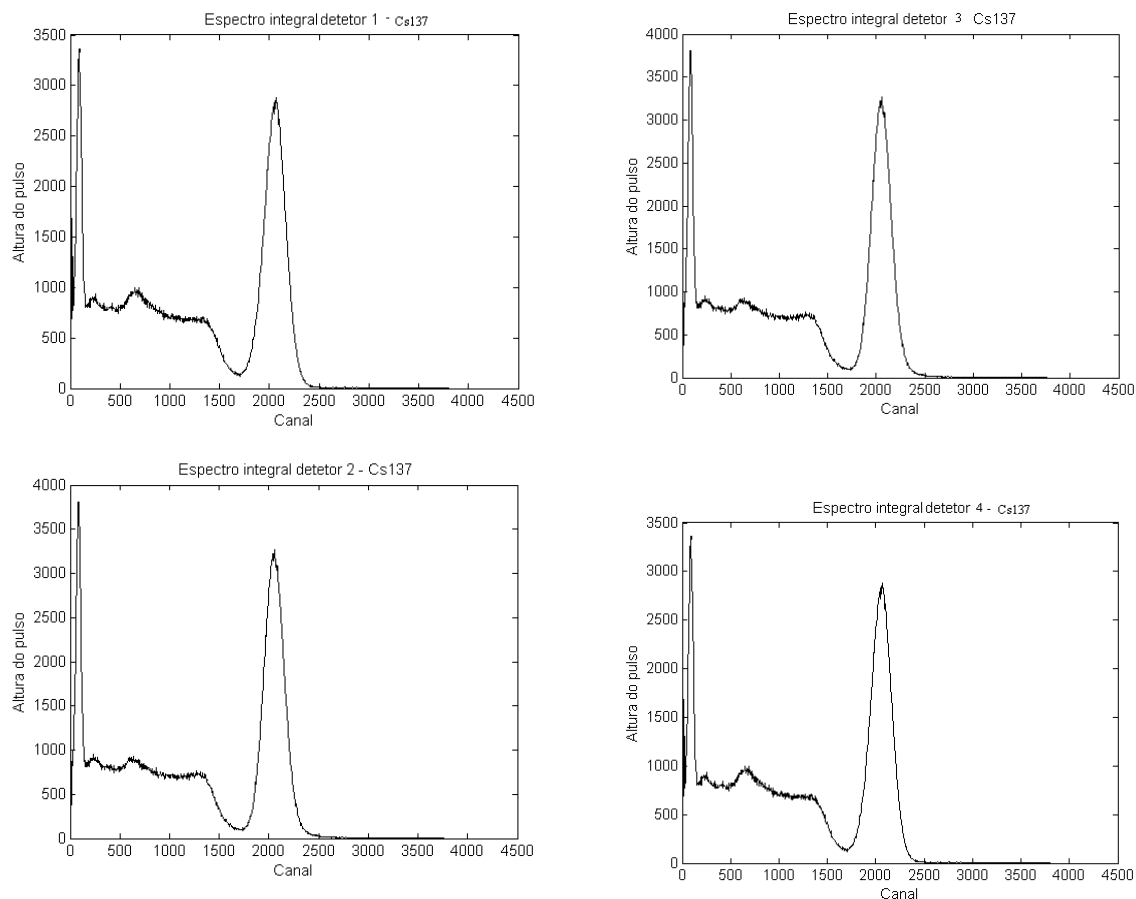


Figura IV.1 Espectros dos detectores 1 a 4 para uma fonte de calibração padrão de ^{137}Cs .

Tabela IV.4 Propriedades dos quatro detectores cintiladores utilizados nos ensaios

Detector	Tensão de operação (V)	Resolução ⁽¹⁾ (%)	Eficiência ⁽²⁾ (%)
1	1090 +/- 20	9,88	11,68
2	1067 +/- 20	10,09	11,75
3	1115 +/- 20	9,73	12,3
4	1135 +/- 20	9,51	12,4

(1) Resolução média no fotopico de 0,662 MeV do ^{137}Cs

(2) Eficiência medida no fotopico de 0,412 MeV do ^{198}Au

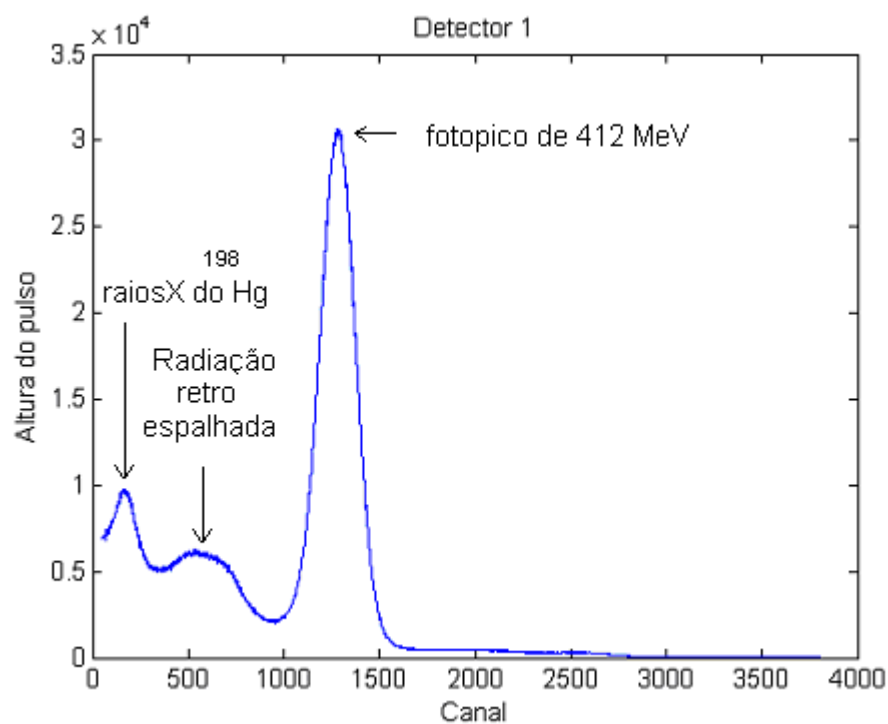


Figura IV.2 Espectro integral do detector 1 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)

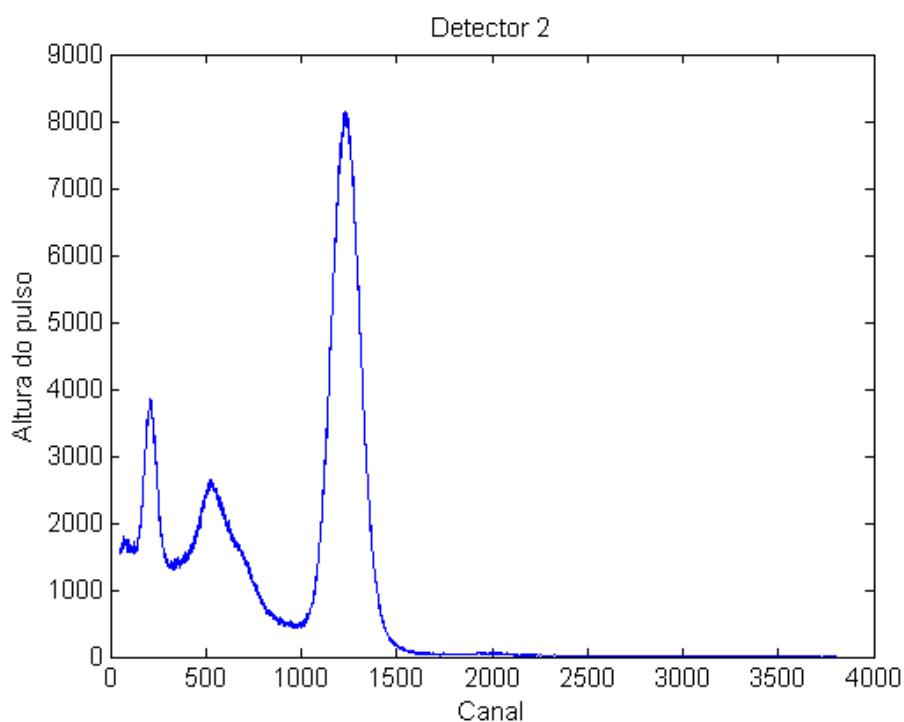


Figura IV.3 Espectro integral do detector 2 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)

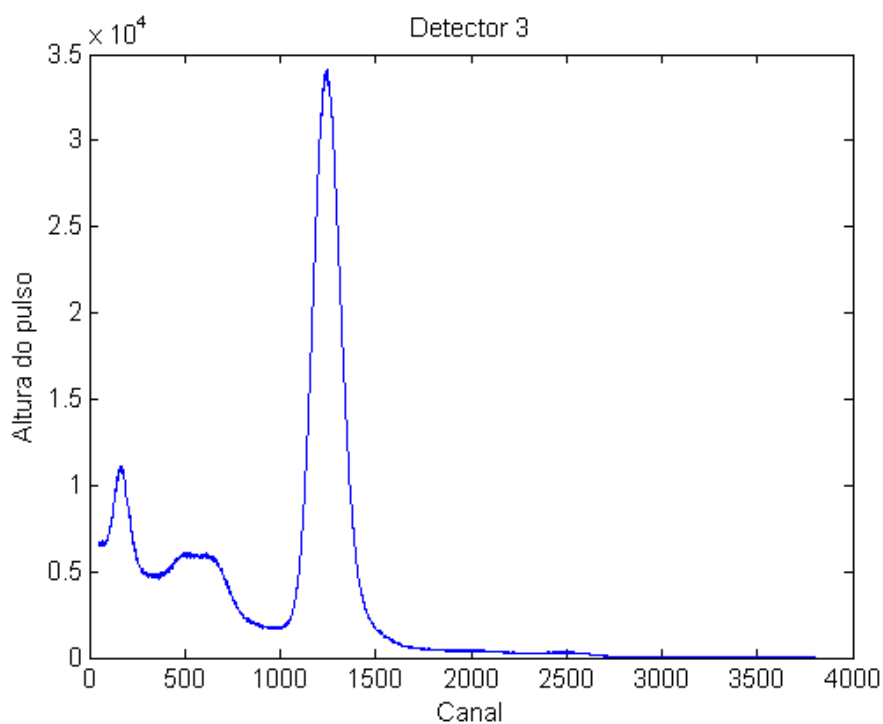


Figura IV.4 Espectro integral do detector 3 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)

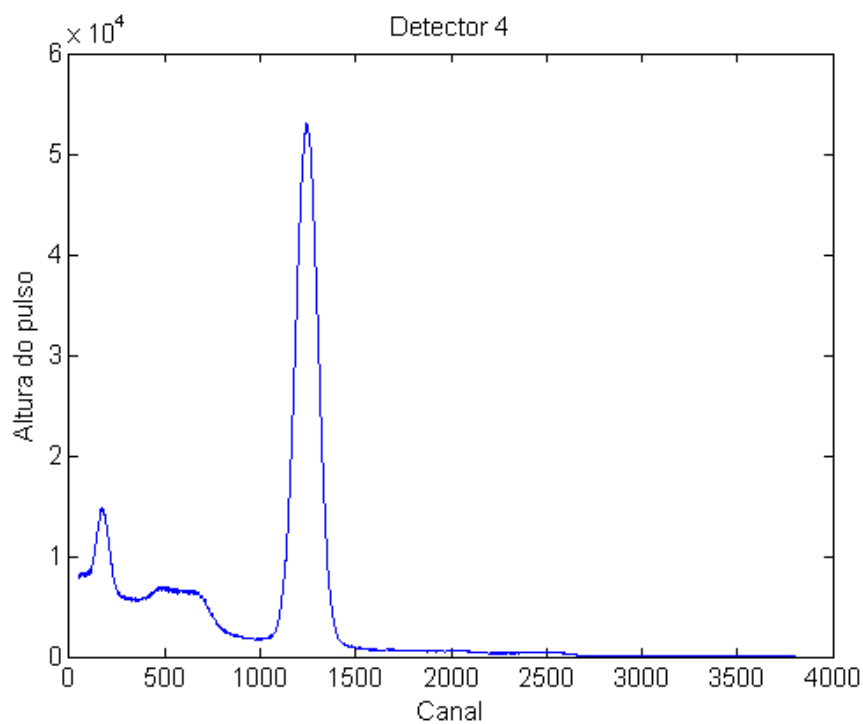


Figura IV.5 Espectro integral do detector 4 obtido com a esfera 3 (^{198}Au)

Os quatro detectores foram bem ajustados para a realização dos ensaios e possuem respostas muito semelhantes, como pode ser constatado na comparação dos seus espectros diferenciais e de suas propriedades constantes na tabela IV.4.

IV.3.2 Determinação da resposta do detetor em função da distância e do ângulo

A esfera 3 foi irradiada durante 4 horas no núcleo do reator Argonauta e adquiriu uma Atividade igual a $7,04 \times 10^6$ Bq. A esfera foi usada nas medidas da resposta do detector NaI:TI, com dimensões iguais a 5,08 cm x 5,08 cm, em função de sua posição ao longo dos eixos X, Y e Z de um sistema de referência cuja origem coincide com o centro da face do detetor. O meio onde a fonte foi inserida é o ar.

A variação angular da resposta do detector, para uma distância fonte-detector fixada em 15 cm está ilustrada nas figuras IV.5 e IV.6. A distância máxima entre as posições das medidas foi igual ao diâmetro do tanque, isto é, 40 cm (correspondente a uma variação angular de, aproximadamente, 2 radianos).

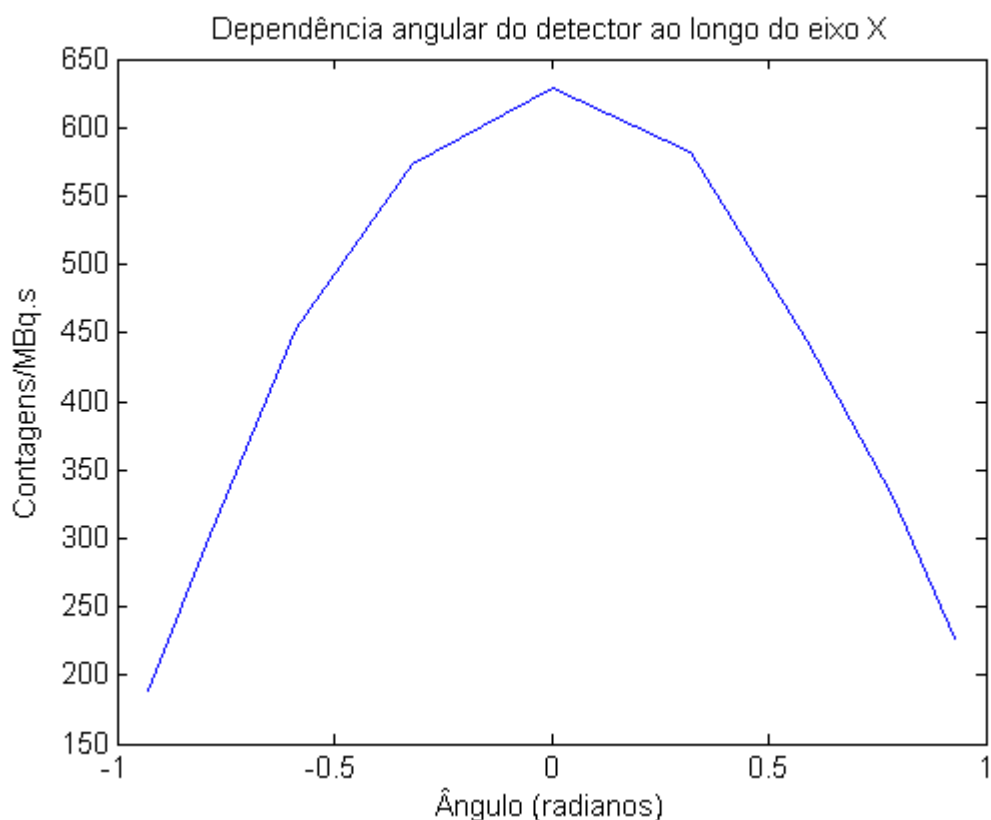


Figura IV.6 A dependência angular, ao longo do eixo X, de um dos detectores NaI:TI (5,08 cmx5,08 cm) utilizado nos ensaios.

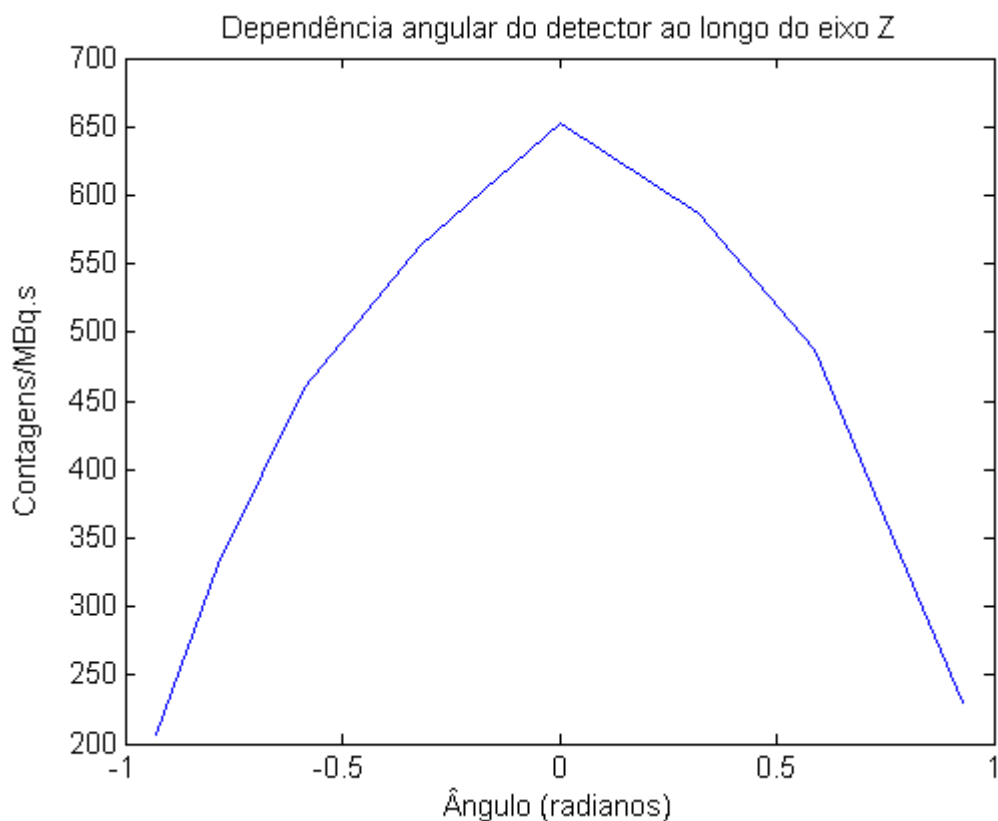


Figura IV.7 A dependência angular, ao longo do eixo Z, de um dos detectores NaI:TI (5,08 cmx5,08 cm) utilizados nos ensaios.

Da análise das curvas de resposta do detector, foi possível verificar experimentalmente que os detectores são sensíveis à radiação gama emitida pela menor das partículas de ^{198}Au construídas (esfera 3 – vermelha) quando esta é irradiada no Reator Argonauta nas mesmas condições da preparação dos ensaios. Os valores das contagens por segundo, devidos ao posicionamento de uma partícula de ^{198}Au com Atividade igual 1×10^6 Bq nas extremidades dos eixos X e Z, são superiores a 200, ou seja, os sinais são facilmente discriminados em relação aos da radiação de fundo, o que viabiliza o rastreamento desta partícula no ar utilizando o mesmo sistema de detecção gama.

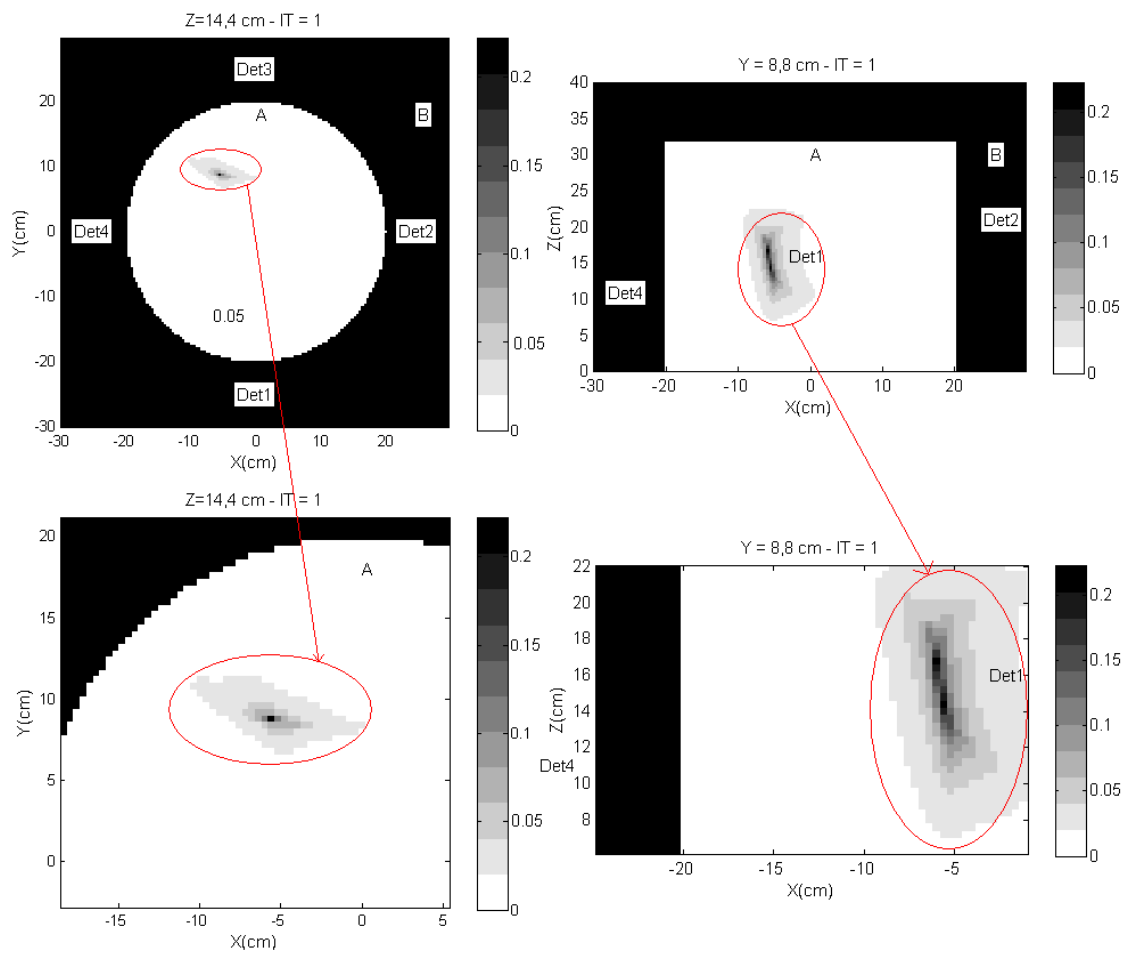
IV.4 Ensaios

IV.4.1 Exames preliminares

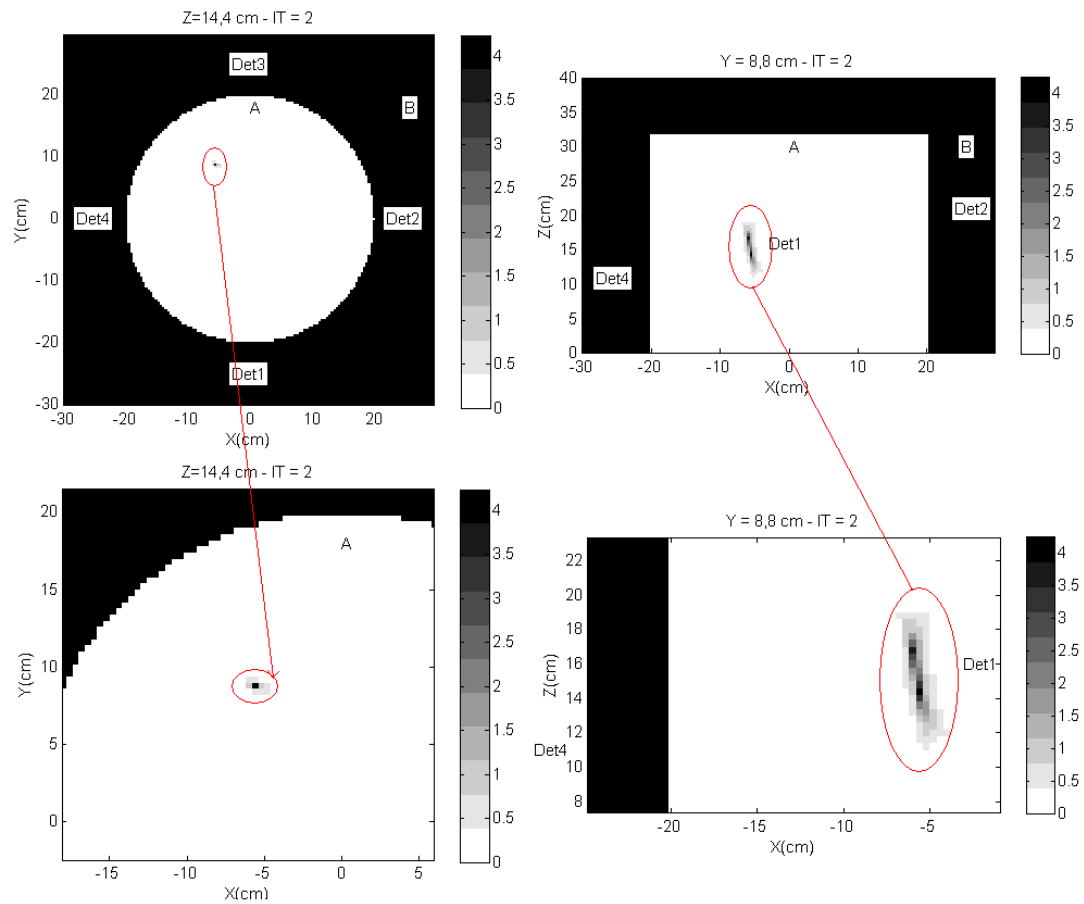
Antes de se analisar os resultados dos ensaios, serão apresentados alguns exames que foram realizados para a avaliação da qualidade das imagens reconstruídas das posições da partícula radioativa.

O primeiro exame foi o da convergência da solução em função das iterações do algoritmo. Ele foi realizado para a otimização do número de iterações antes da reconstrução de imagens nos ensaios.

As imagens presentes nas figuras IV.8 a IV.10, foram obtidas com os valores das contagens nos detectores obtidas no ensaio B, em que a esfera 1 girava em torno do eixo do tanque com período médio igual a 5,5 s. As contagens correspondem ao instante de tempo igual a 24,5 s. e as imagens reproduzidas no lado (a) estão no plano XY e as do lado (b) estão no plano XZ. Quanto maior o nível de cinza, medido na barra de cores à direita de cada figura, maior é a Atividade do elemento da matriz de reconstrução. Teoricamente, após um número infinito de iterações, o valor limite da Atividade do elemento da matriz de reconstrução correspondente à posição mais provável da partícula radioativa deve ser igual ao valor verdadeiro da Atividade da esfera 1 em $t=24,5$ s.

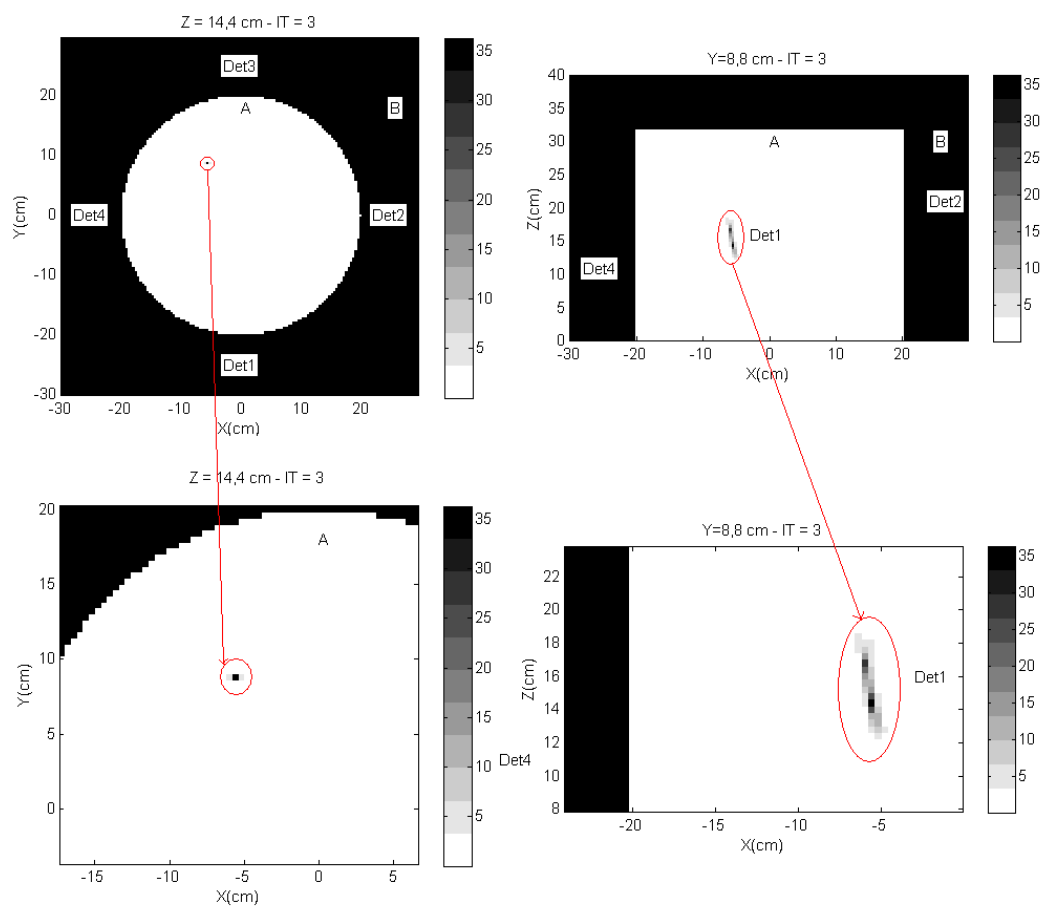


(a) (b)
 Figura IV.8 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s com apenas 1 iteração.

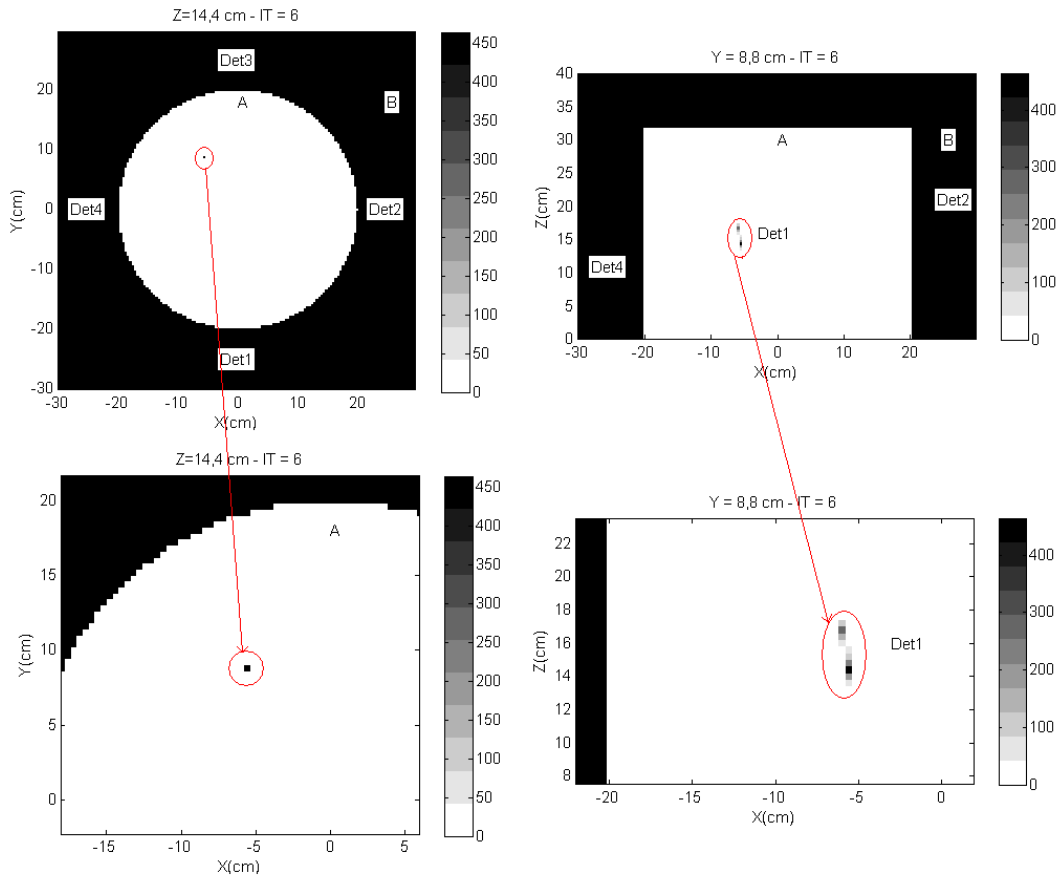


(a) (b)
 Figura IV.9 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5 \text{ s}$ após 2 iterações.

Com base na análise das figuras IV.8 e IV.9, verificou-se que, com até duas iterações, a imagem projetada nos planos XY e XZ é muito difusa. Se o rastreamento do movimento da partícula neste ensaio fosse realizado nestas condições, as incertezas associadas a sua trajetória seriam muito elevadas, tanto no plano XY quanto no plano XZ e não seria possível determinar com precisão os pontos de maior concentração da mesma no interior do tanque.



(a) (b)
 Figura IV.10 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5 \text{ s}$ após 3 iterações.



(a) (b)
 Figura IV.11 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 6 iterações.

Verifica-se claramente, com a observação das figuras IV.10 e IV.11, que as imagens da posição da esfera 1 obtidas com três iterações também são muito imprecisas nos dois planos de projeção. Porém, a partir da iteração 6, a projeção da imagem da posição da esfera 1 no plano XY é única, o que pode permitir a realização de um rastreamento neste plano, mas o mesmo não ocorre no plano XZ, em que há duas regiões distintas (cujos elementos possuem coordenadas Z que variam, aproximadamente, de 13 cm a 17 cm) nas quais os valores de Atividade dos elementos não são bem distintos. Então, seis iterações ainda foram insuficientes para a determinação precisa do elemento onde se localizava a partícula radioativa no instante $t = 24,5$ s.

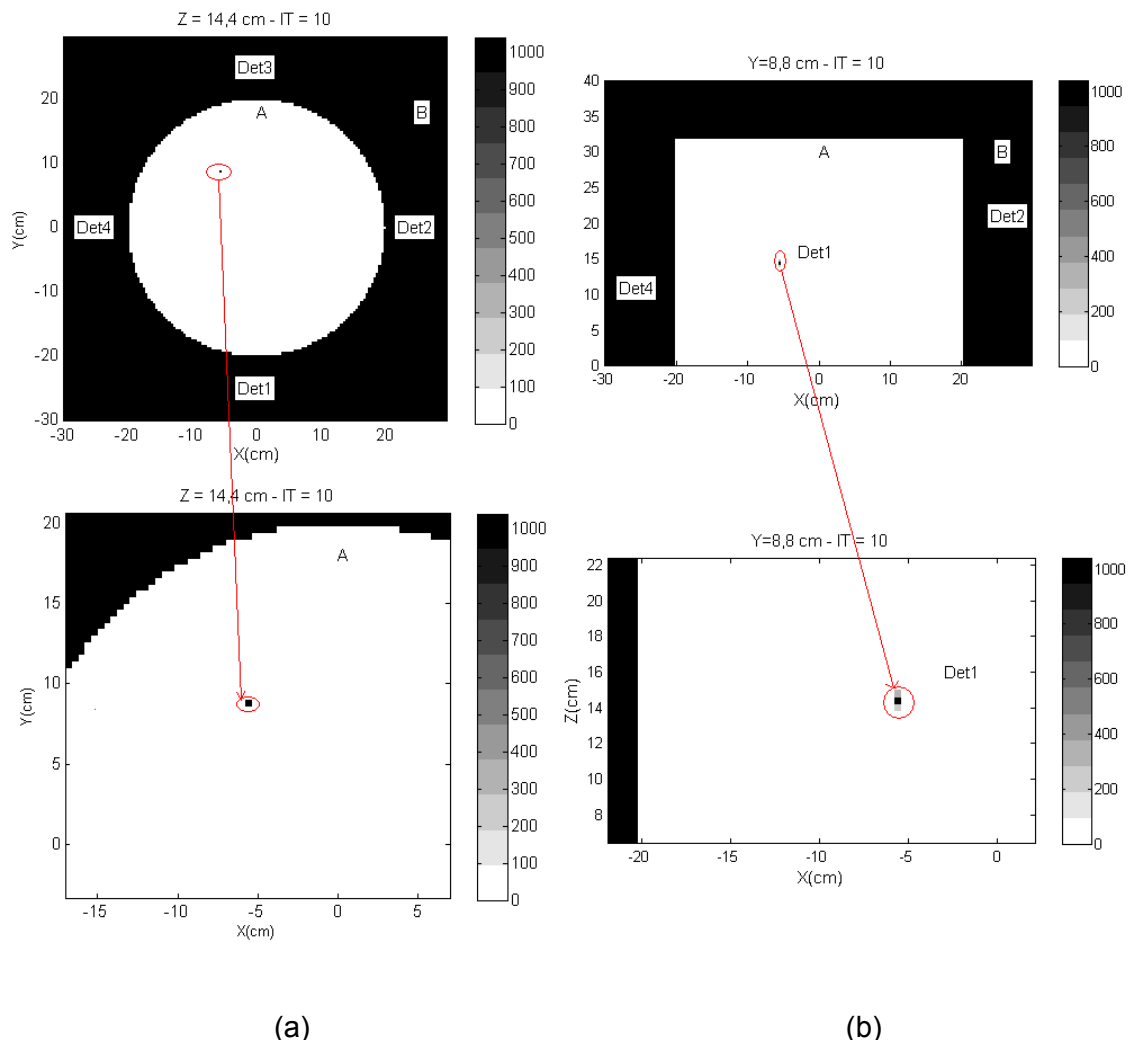


Figura IV.12 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 10 iterações.

Finalmente, após 10 iterações, observa-se na figura IV.12 que a Atividade do elemento da matriz de reconstrução situado nas coordenadas $(-5,2;8,8;14,4)$, em $t=24,5$ s, é a maior dentre todas as dos outros elementos porque as imagens deste elemento, quando projetadas nos planos XY e ZX, são as que possuem o maior nível de cinza.

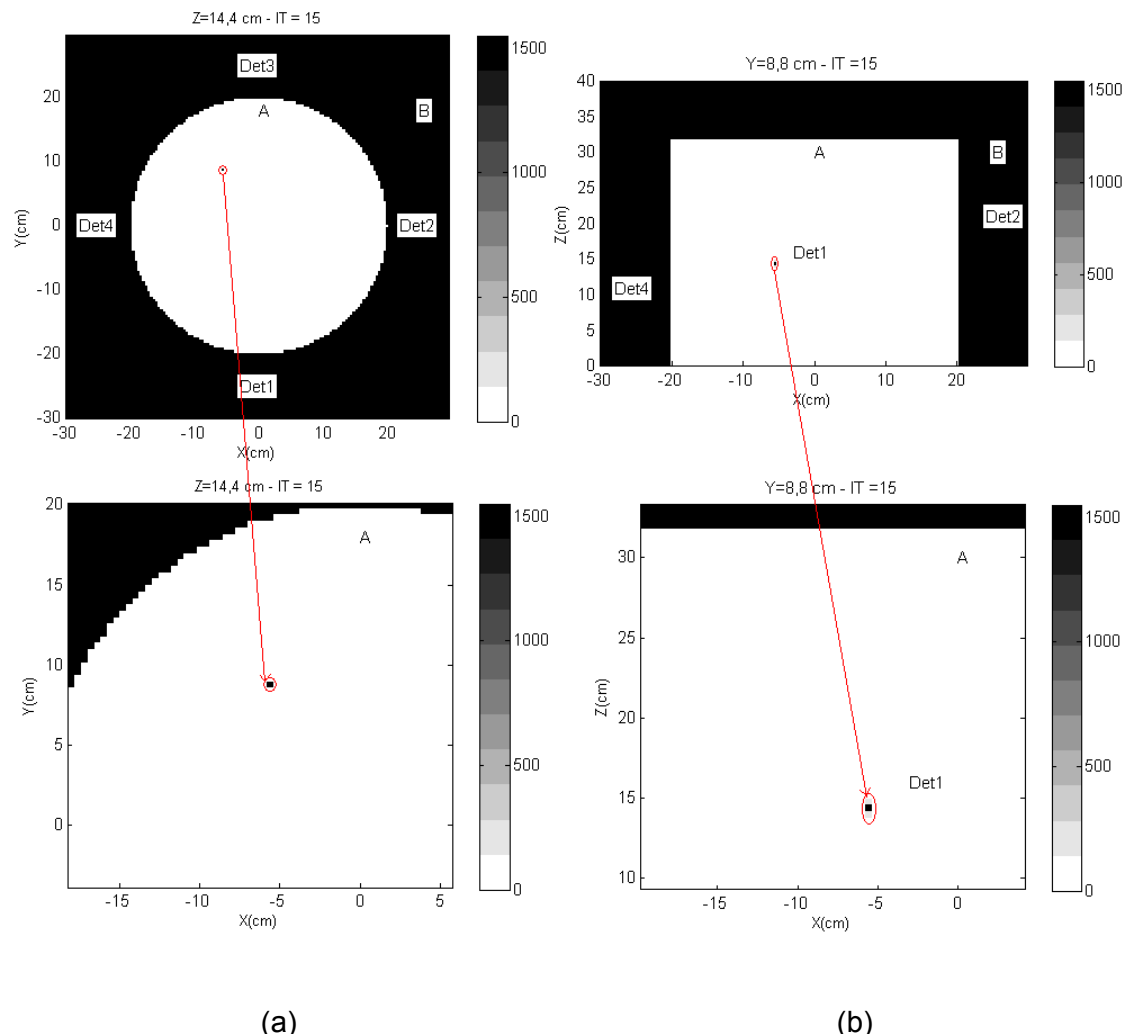


Figura IV.13 Reconstrução da imagem da posição da partícula em $t = 24,5$ s após 15 iterações.

Outro resultado verificado é que a convergência do algoritmo para a solução cuja imagem, no instante $t=24,5$ s, está nas coordenadas $(-5,2;8,8;14,4)$ (em cm) continua nas reconstruções realizadas com quinze ou mais iterações, como visto na figura IV.13. Isto significa que o elemento de matriz que identifica a posição mais provável da partícula independe do número de iterações se esta for maior ou igual a dez. Pode ser constatado também que, como prova adicional da convergência do algoritmo, à medida que se aumenta o número de iterações, o valor da Atividade naquele elemento continua aumentando e se aproximando cada vez mais do valor real da Atividade da partícula. Então, nestas condições, a posição da partícula de ^{198}Au fica perfeitamente identificada pelo algoritmo com apenas dez iterações.

Para a avaliação de como a variação da velocidade da partícula de ^{198}Au afeta a convergência do algoritmo para a solução pretendida, o mesmo exame foi repetido,

no ensaio C, para localizar as coordenadas da esfera 1 no instante $t = 27,9$ s. Neste ensaio, o valor médio do período de rotação da esfera foi igual a 2,3 s e as imagens geradas se encontram nas figuras IV.13 a IV.1.

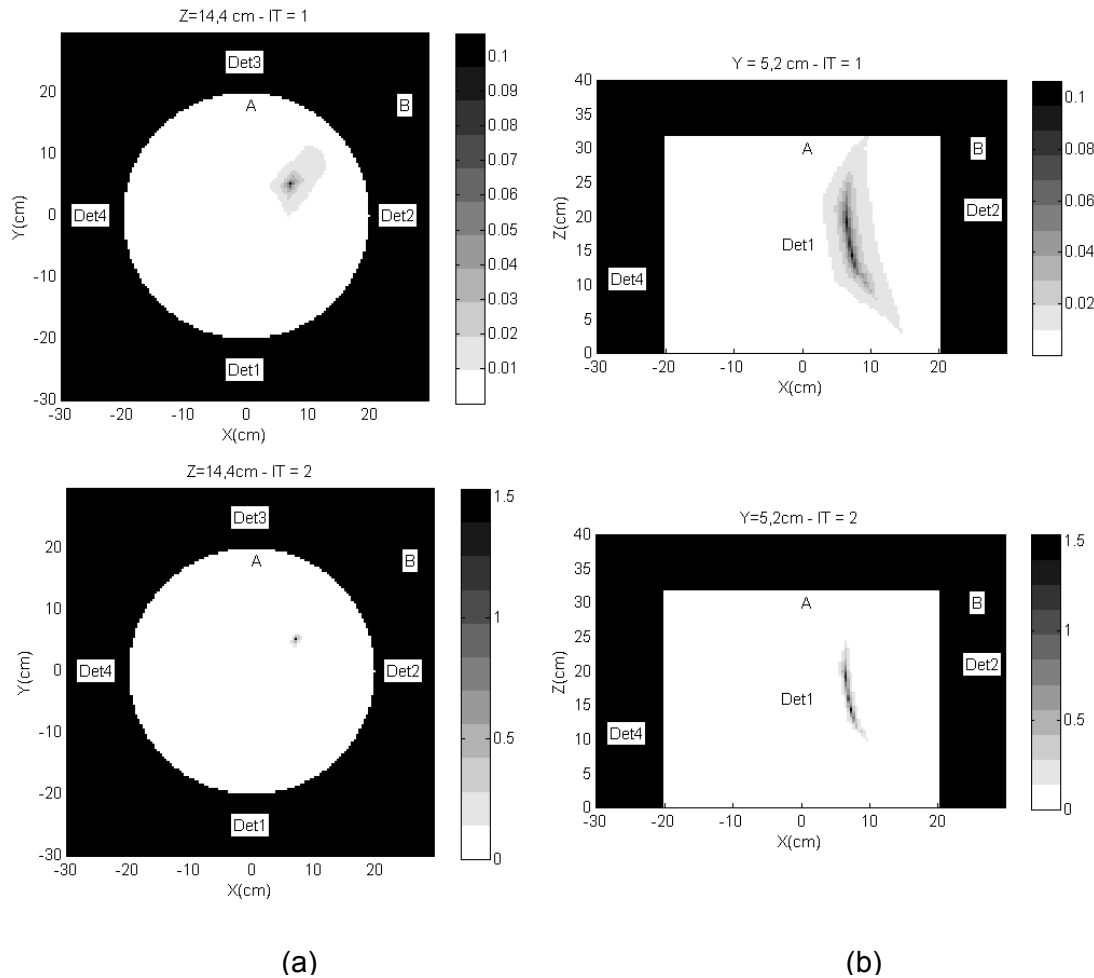
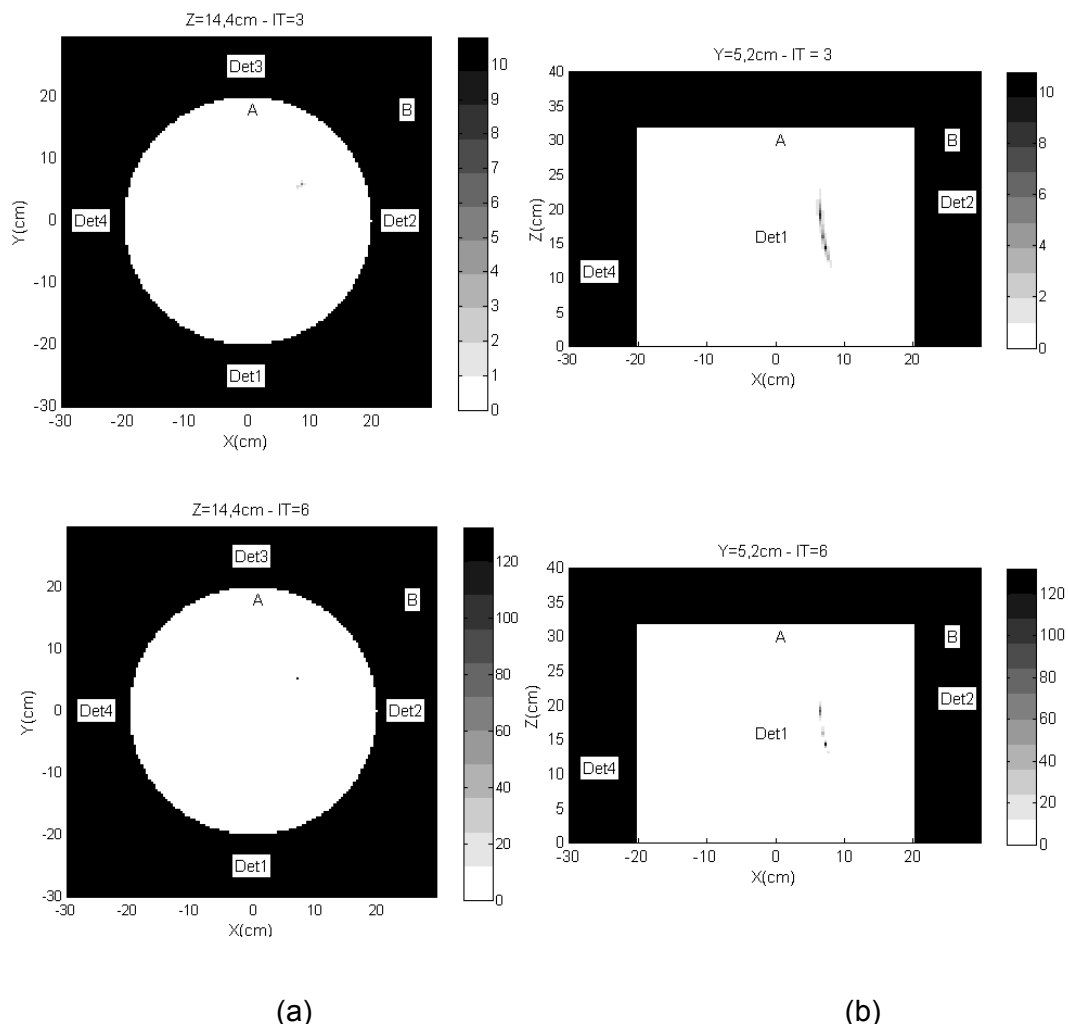


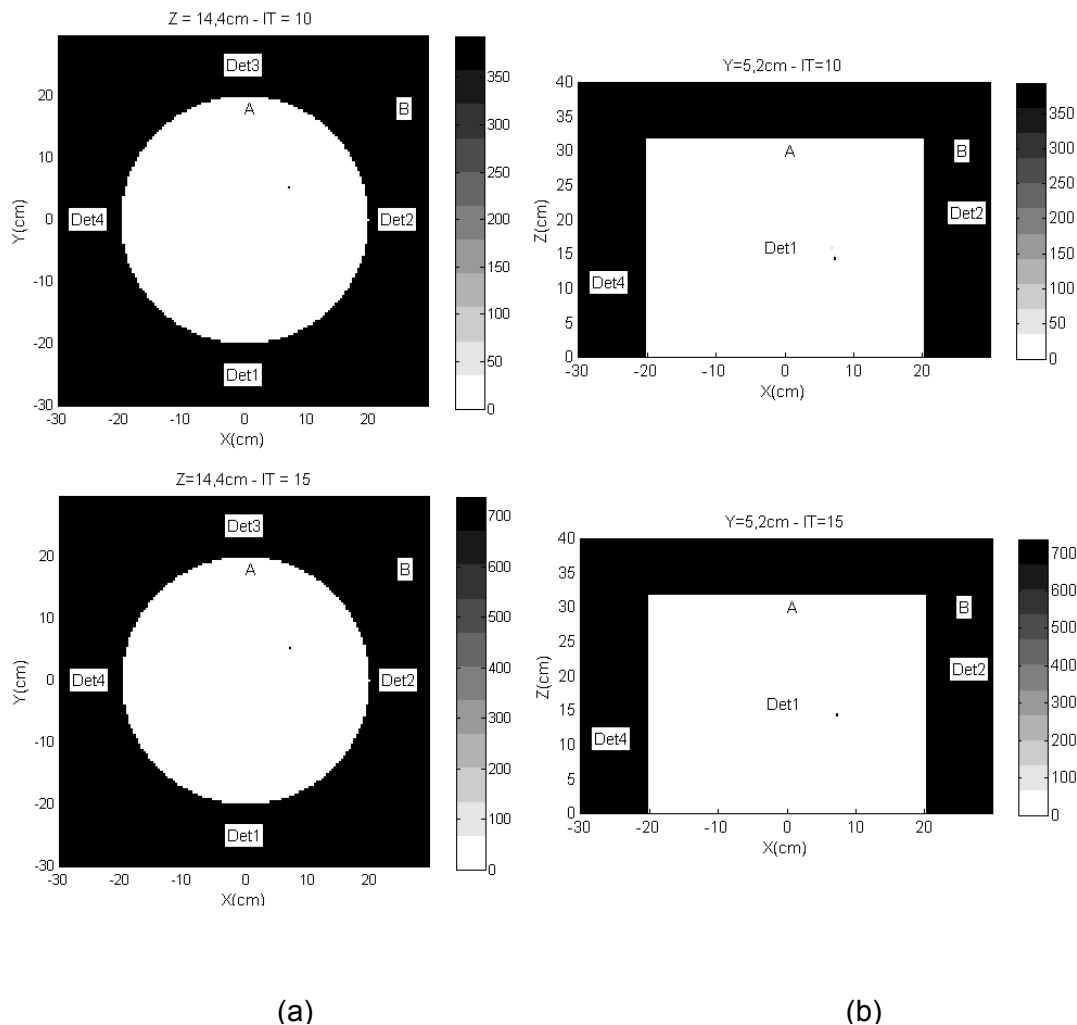
Figura IV.14 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 1 e 2 iterações.

Verifica-se na figura IV.14 que, como no ensaio B, apenas duas iterações não são suficientes para identificar a localização da partícula porque a projeção das imagens no plano XZ é ainda muito difusa devido à presença de muitos elementos com Atividades semelhantes.



(a) (b)
 Figura IV.15 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 3 e 6 iterações.

Agora, analisando-se a figura IV.15, nota-se que, após seis iterações, a imagem no plano XY do elemento com maior Atividade já é única mas, no plano XZ, ainda não se visualiza com precisão o elemento com esta mesma propriedade.



(a) (b)
 Figura IV.16 Reconstruções da imagem da posição da esfera 1, em $t = 27,9$ s, após 10 e 15 iterações.

Na figura IV.16, a convergência do algoritmo continuou após 10 iterações e agora o elemento da matriz de reconstrução com maior Atividade é aquele situado nas coordenadas (em cm) (7,2;5,2;14,4), que foi avaliada pelo algoritmo no instante $t = 27,9$ s. A convergência do algoritmo para esta solução continua após 15 iterações e foi verificado que este fato se repete mesmo após duzentas iterações. Com relação ao valor da Atividade do elemento da matriz de reconstrução associado às coordenadas (7,2;5,2;14,4), foi confirmado que tal valor se aproxima do valor nominal da Atividade da esfera 1 à medida que o número de iterações aumenta.

O segundo exame realizado foi o da resolução espacial das imagens geradas. Para isto, foi selecionada a posição da esfera 1, durante o ensaio B, em $t = 25$ s, como visto na figura IV.17. Pela análise da figura, a dimensão linear do elemento da matriz de reconstrução correspondente àquela posição é igual a 4 mm, igual ao valor de entrada desta variável no algoritmo, o que comprova que a resolução pretendida foi

alcançada, independentemente do erro máximo associado aos valores calculados das posições, que foi verificado na etapa de simulação como sendo igual a 7,8%.

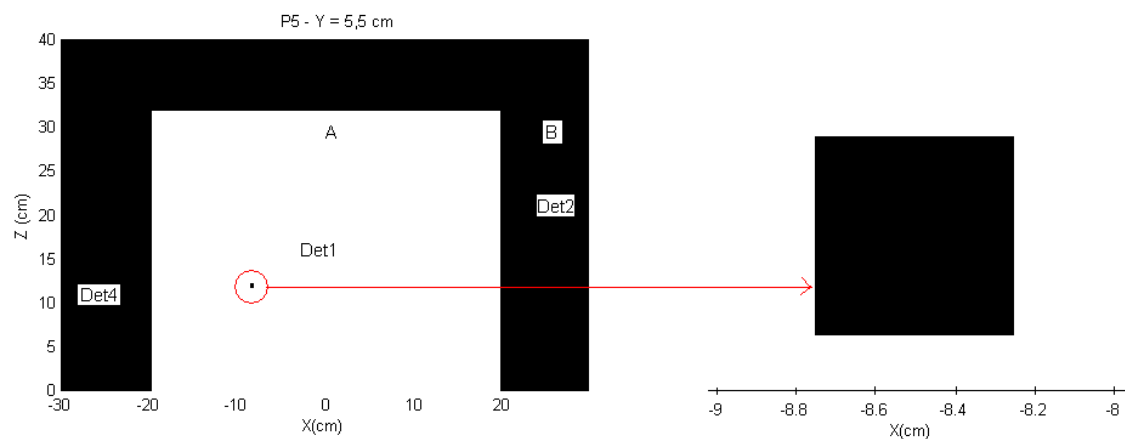


Figura IV.17 Vista ampliada da imagem da superfície do voxel no plano XZ . Esta é a posição calculada da esfera 1 em $t = 25$ s.

IV.4.2 Ensaios realizados com a geometria anel

Como descrito no capítulo III, nos ensaios B, C e D, a esfera 1 foi fixada na extremidade de uma das pás, a $9,5 \pm 0,05$ cm de distância do eixo central do tanque e na altura $Z=12,5 \pm 0,05$ cm e, em seguida, foram adicionados cerca de 40 l de água no seu interior . Ao longo da seqüência de ensaios, a potência do motor foi ajustada para aumentar a velocidade angular da haste em relação à velocidade do ensaio anterior. Os dados da tabela III.12 estão repetidos nesta secção, para fins didáticos, na tabela IV.5

Tabela IV.5 Seleção dos ensaios realizados - geometria anel

Ensaio	Arquivo dados	meio a	meio b	T(s)	W(rad/s)
A	W_ar_base	ar	ar	-	-
B	W_agua_rot1	água	ar	5,5	1,1
C	W_agua_rot2	água	ar	2,3	2,7
D	W_agua_rot3	água	ar	1,8	3,5
E	W_agua_livre1	água	ar	0,8	7,9
F	W_agua_livre 2	água	ar	2,0	3,0
G	W_agua_ZM1	água	ar	2,0	3,0
H	W_agua_ZM2	água	ar	2,0	3,0
I	W_agua_ZM3	água	ar	2,0	3,0

IV.4.2.1 Ensaio B

O gráfico da figura IV.18 ilustra como as contagens registradas nos quatro detectores variaram durante o intervalo de tempo de 20s a 27s, que compreende o valor médio do período do movimento de rotação da haste onde a esfera 1 foi fixada ($T = 5,5 \pm 0,05s$). Nota-se que a alternância dos picos das curvas dos detectores deve-se à passagem da esfera pelos pontos do tanque que se situam mais próximos ou mais distantes de cada detector.

Para a avaliação da resolução temporal das imagens das posições da esfera 1, elas foram reconstruídas, numeradas de P1 a P6 na ordem crescente do tempo, e exibidas nas figuras IV.19 e IV.20. Cada imagem P_i ($i=1::6$) corresponde a um dos instantes de tempo assinalados no gráfico da figura IV.4 com uma linha vertical. As projeções no plano XY estão na coluna (a) e as projeções no plano XZ estão na coluna (b). A resolução espacial da imagem pode ser avaliada na figura IV.7.

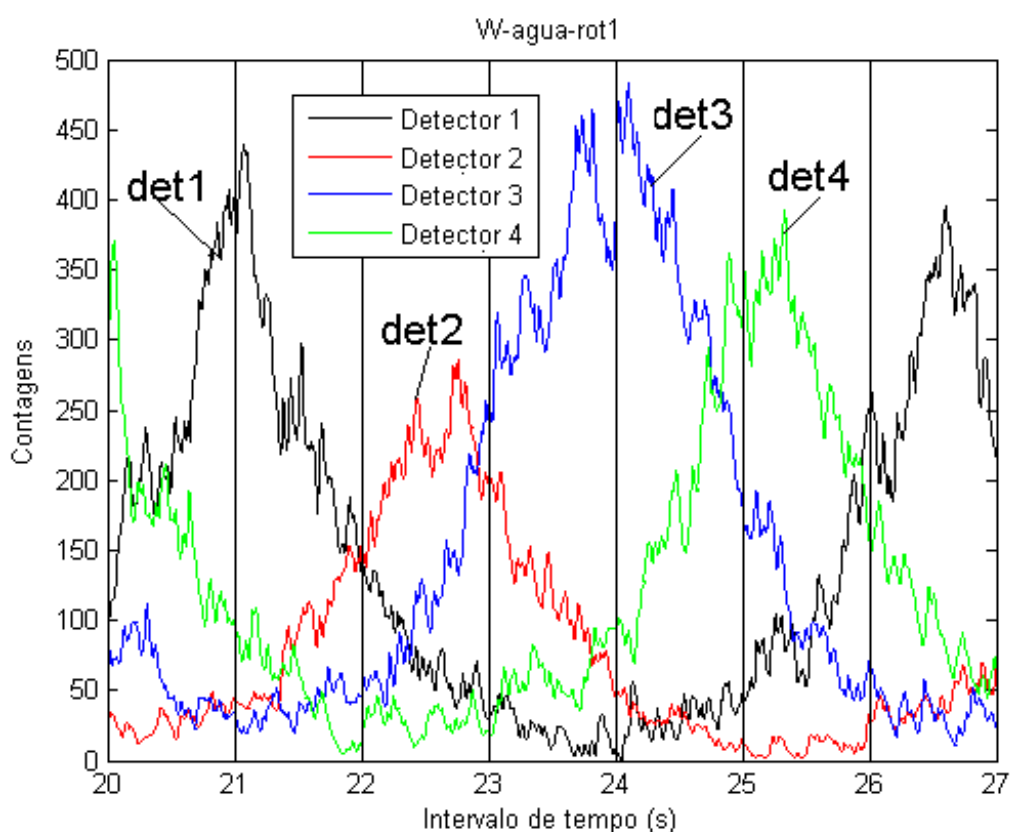
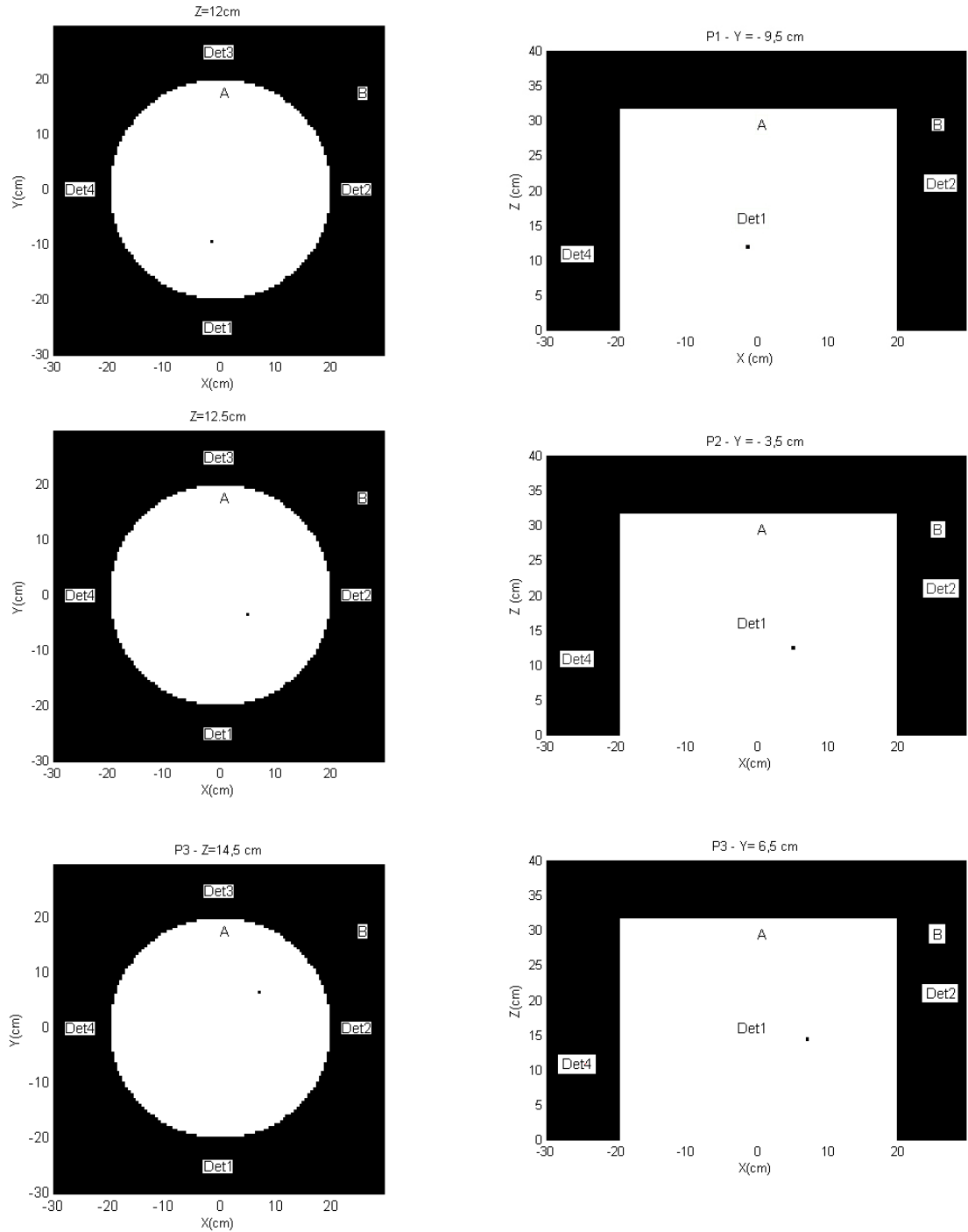


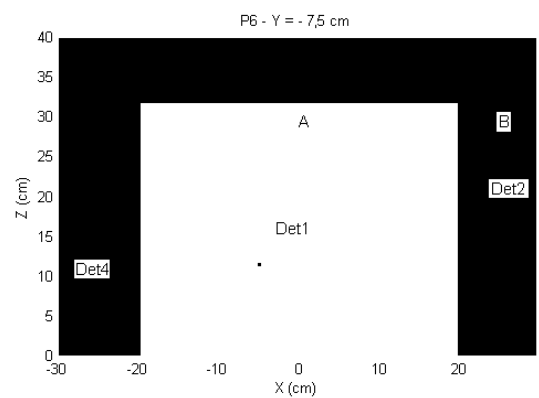
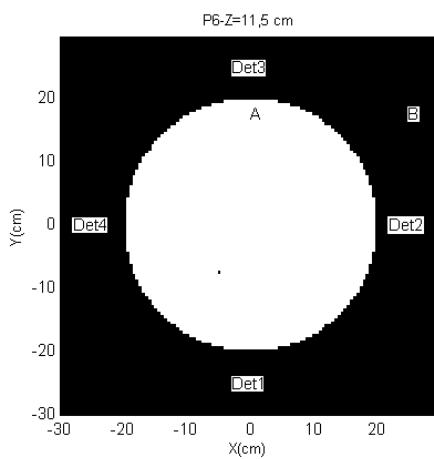
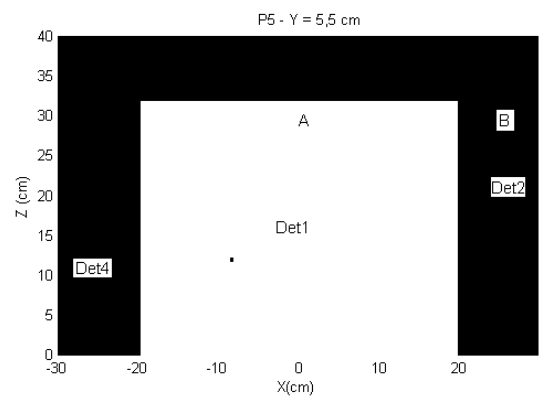
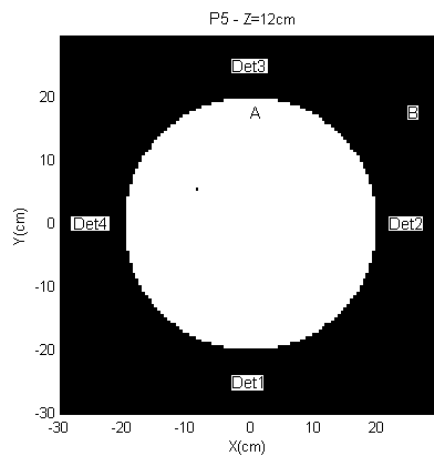
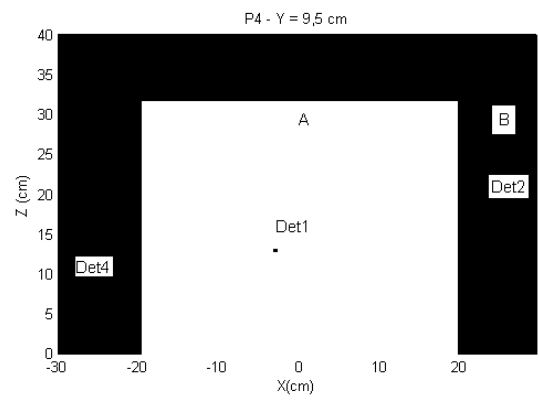
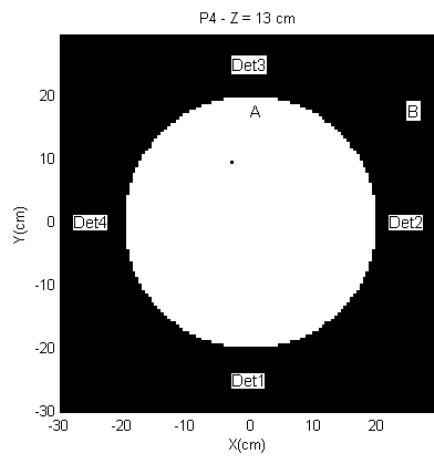
Figura IV.18 Variação periódica das contagens registradas nos detectores 1 a 4, durante o ensaio B, acompanhando o movimento de rotação da esfera 1.

Na figura IV.18, verifica-se que as contagens nos detectores estão bem discriminadas em relação à radiação de fundo. Desprezando-se as incertezas devidas à natureza da radiação gama, os valores máximos das contagens em cada detector

variam em função da menor distância entre a esfera 1 e cada um deles. Assim, considerando que a altura da esfera 1 em relação à base do tanque é próxima de 13 cm, o detector 2, que está no maior nível em relação aos outros detectores, possui os picos de menor altura.



(a) (b)
 Figura IV.19. Posições da esfera 1 de $t = 21,00$ s a $t = 23,00$ s. As imagens no plano XY estão na coluna (a) e as imagens no plano XZ estão na coluna (b).



(a) (b)
 Figura IV.20 Posições da esfera 1 de $t = 24,00$ s a $t = 26,00$ s. As imagens no plano XY estão na coluna (a) e as imagens no plano XZ estão na coluna (b).

Analisando-se a seqüência de imagens nas figuras IV.19 e IV.20, verificou-se que a trajetória delineada pelas posições sucessivas da esfera 1 assemelha-se a um círculo, como era de se esperar, e que o sentido de rotação é o anti-horário.

IV.4.2.2 Ensaio C

Neste ensaio, o período de rotação da esfera 1 foi igual a 2,3s e, na figura IV.21, está apresentado o gráfico da variação das contagens registradas nos quatro detectores durante o intervalo de tempo de 20,5 s a 24,5 s.

Para a avaliação da resolução espacial e temporal das imagens geradas pelo algoritmo, foram reconstruídas e exibidas nas figuras IV.22 e IV.23 as imagens das posições da esfera 1 nos instantes de tempo iguais a 20,5s, 21,0s, 21,5s, 22,0s, 22,5s e 23,0s, sendo que as imagens no plano XY estão na coluna (a) e as imagens no plano XZ estão na coluna (b).

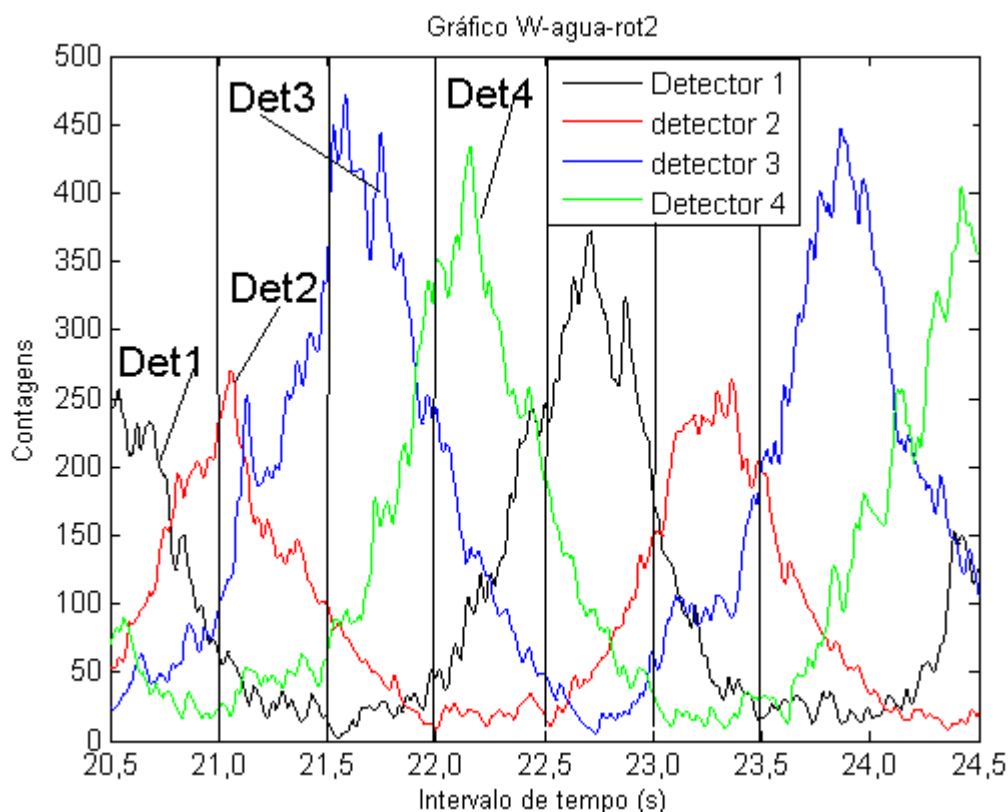
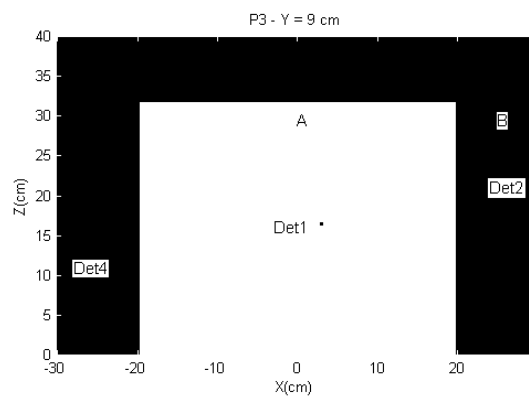
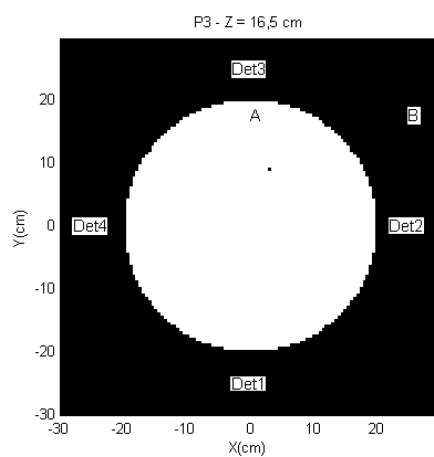
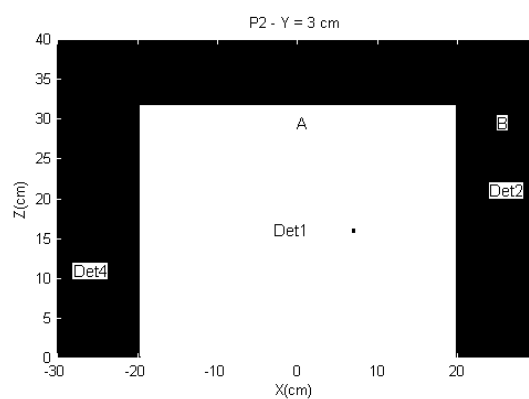
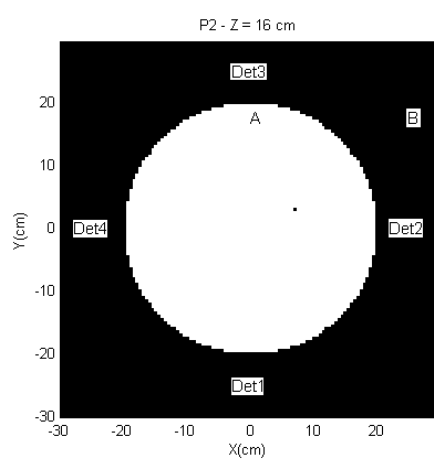
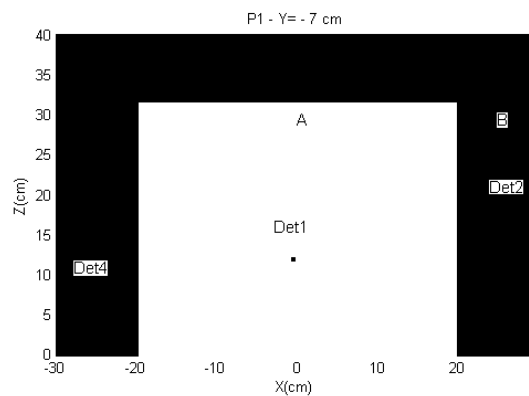
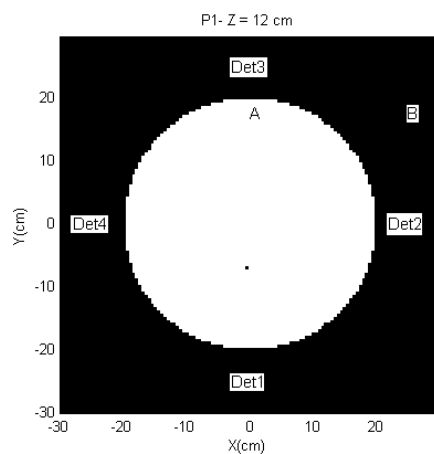
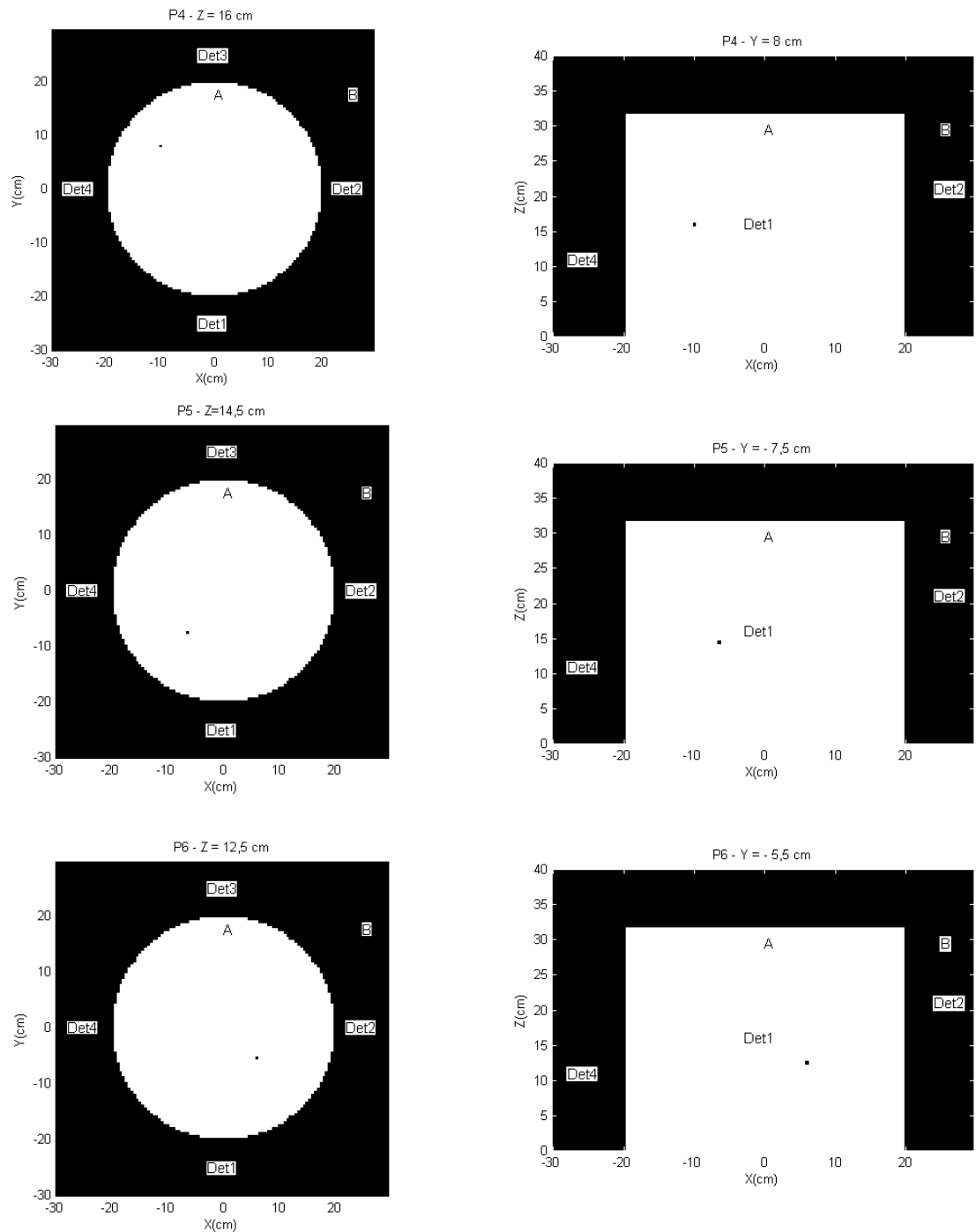


Figura IV.21 A variação periódica no tempo das contagens registradas nos detectores 1 a 4 durante o teste C.



(a) (b)
 Figura IV.22. Posições da esfera 1 de $t = 20,50$ s a $t = 21,50$ s (intervalo de $0,50$ s).



(a) (b)
 Figura IV.23 Posições da esfera 1 de $t = 22,00$ s a $t = 23,00$ s (intervalo de 0,50 s).

Analisando-se a sequência de imagens apresentadas nas figuras IV.22 e IV.23, verifica-se que a trajetória delineada possui a mesma forma e sentido de rotação daquela encontrada no ensaio anterior, ou seja, houve reprodutibilidade da solução encontrada, apesar do aumento da velocidade da esfera 1.

IV.4.2.3 Ensaio D

Neste ensaio o valor médio do período do movimento da esfera 1 na água, fixada sobre a haste, foi igual a 1,8 s .

A análise das imagens reconstruídas das posições da esfera 1 neste ensaio foi realizada como nos ensaios prévios. Foi construído um gráfico com a variação das contagens registradas nos quatro detetores que está exibido na figura IV.24 para subsidiar as avaliações.

As posições sucessivas exibidas nas figuras IV.25 e IV 26 referem-se aos seguintes instantes de tempo: 25,0s, 25,4s,25,8s ,26,2s, 26,6s e 27,0s.

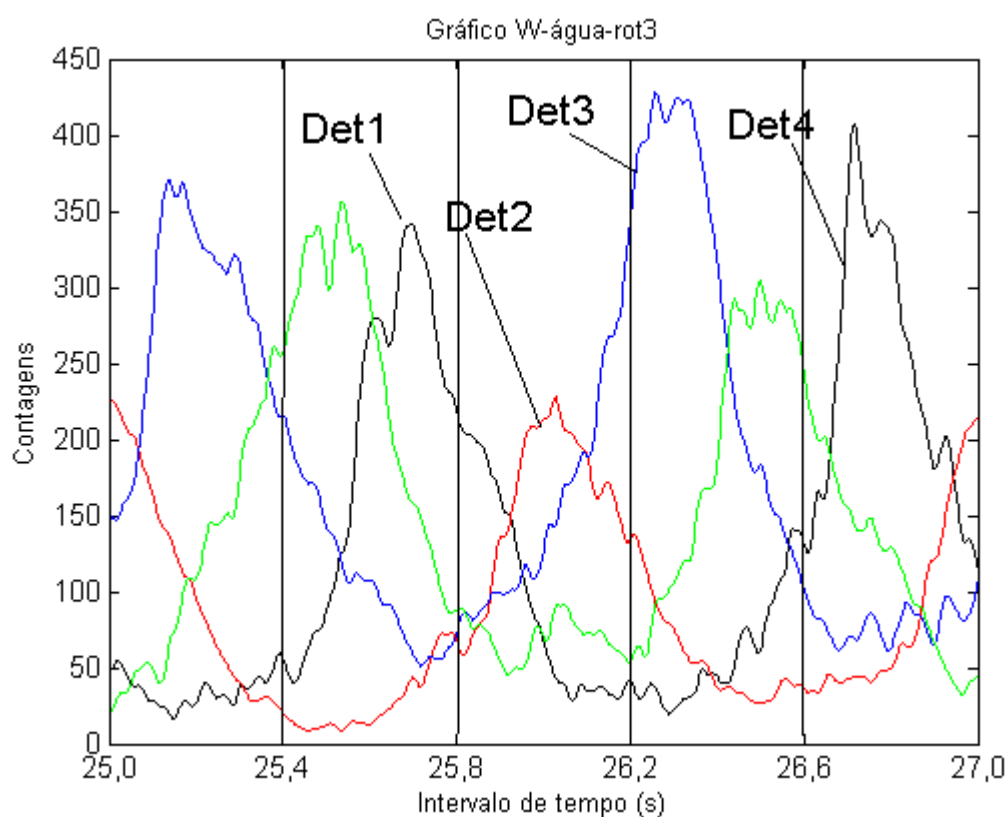
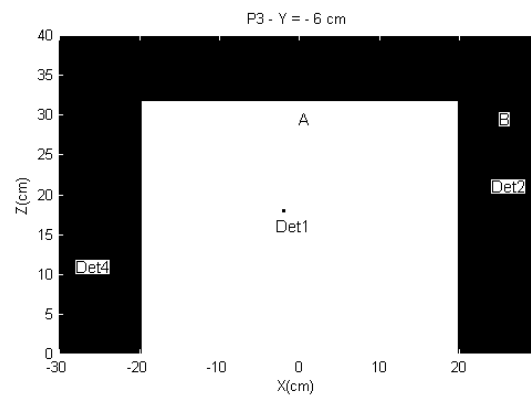
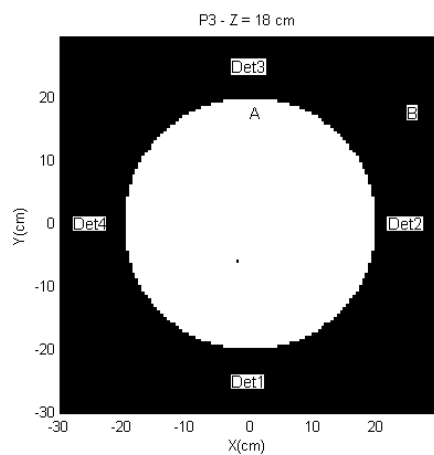
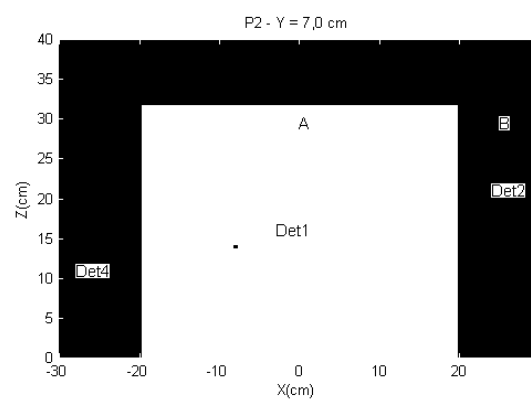
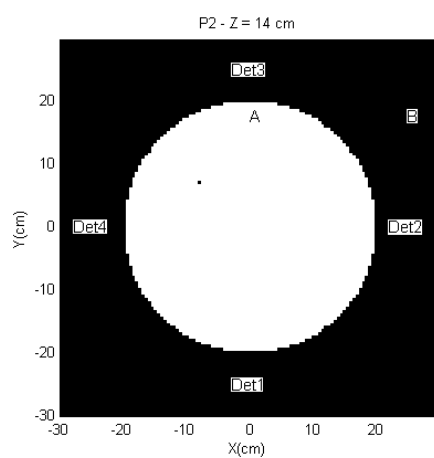
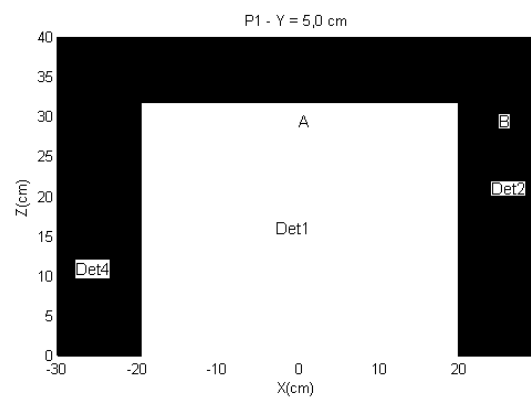
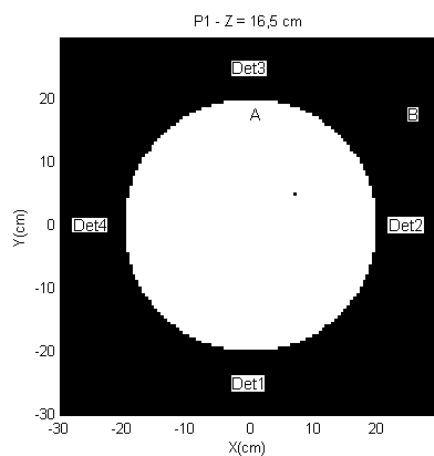
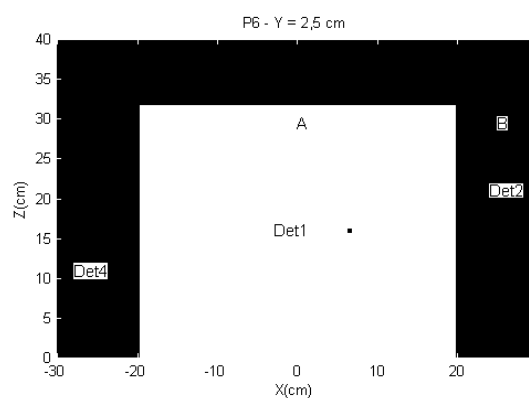
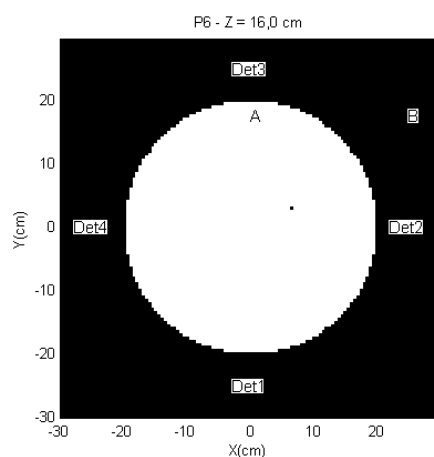
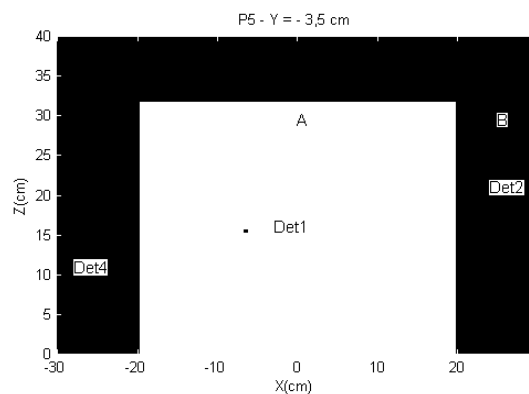
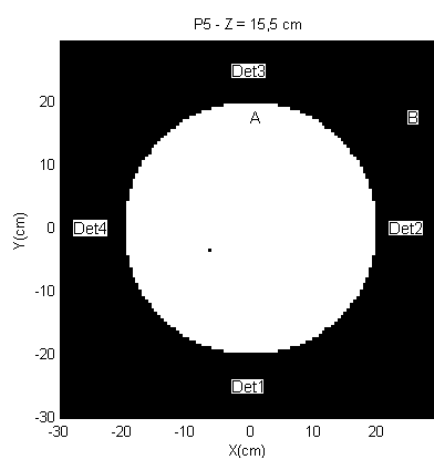
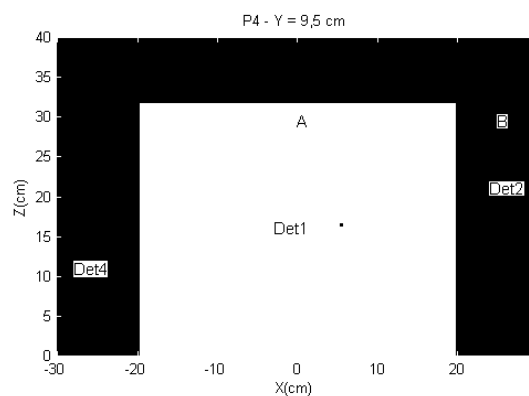
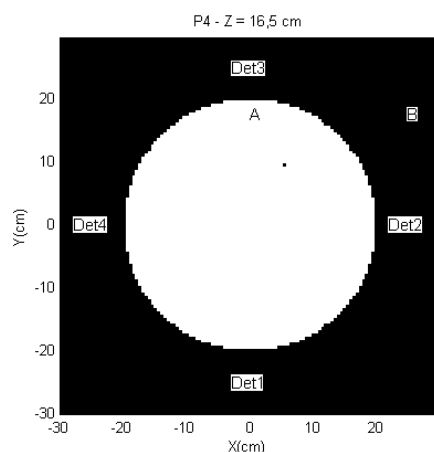


Figura IV. 24 Ensaio D: a variação nas contagens registradas nos detectores 1 a 4 de acordo com o movimento de rotação da esfera 1.



(a) (b)
 Figura IV.25 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 1 de $t=25,00s$ a $t=25,80s$ (intervalo igual a $0,40s$).



(a) (b)
 Figura IV.26 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 1 de $t=26,20$ a $t=27,00$ s (intervalo igual a $0,40$ s).

Neste ensaio, também foi constatado que as soluções obtidas com o algoritmo são pouco afetadas pela alteração da velocidade da esfera no meio e o padrão circular da trajetória foi repetido.

O algoritmo pode ser aplicado para a avaliação do movimento da esfera em um intervalo de tempo maior que um período para fornecer perfis de concentração ou de velocidade, dependendo da aplicação.

Como exemplo, a figura IV.27 apresenta um perfil de concentrações do movimento circular da partícula de ^{198}Au que foi montado a partir dos dados das contagens medidas no ensaio C. O intervalo de tempo considerado foi de 20,0 s a 35,0 s, com frequência de aquisição das contagens igual a 0,20 s. Em seguida, foram calculadas as coordenadas de 75 posições da esfera 1, mas as respectivas imagens individuais destas posições não foram geradas antes de se levar em conta suas ocorrências neste intervalo de tempo. Então, o algoritmo determinou a posição que apareceu com maior frequência, cujo valor foi usado como referência para normalizar as frequências das outras posições, possibilitando assim a diferenciação dos níveis de cinza das imagens das posições em função da frequência relativa individual. A barra de cores ao lado da figura IV.27 contém os valores normalizados das frequências relativas encontradas.

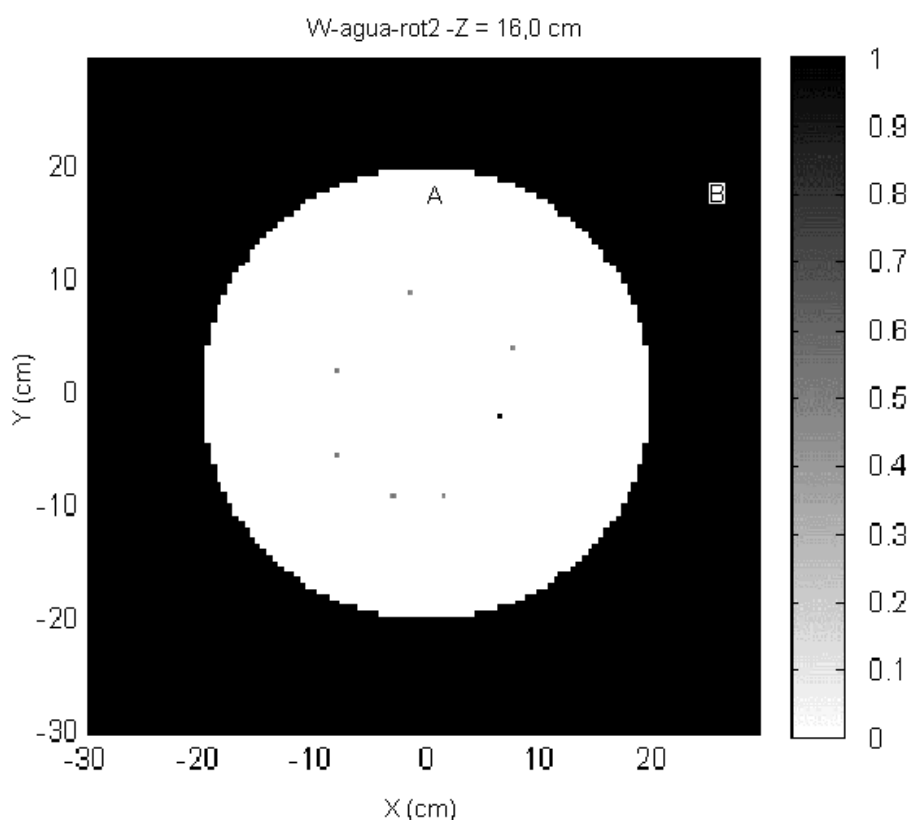


Figura IV.27 O perfil de concentrações no plano XY e na altura Z = 16,0 cm gerado para o movimento da esfera 1 no ensaio C durante o intervalo de 20,0 s a 35,0 s.

No perfil mostrado na figura IV.27, uma das posições possui frequência máxima e sua imagem possui intensidade 1 e cor preta. As demais posições possuem imagens com níveis de cinza diretamente proporcionais à frequência, sendo a frequência nula representada pela cor branca.

IV.4.2.4 Ensaio F

Neste experimento, o valor médio da velocidade angular das pás foi igual a 3,0 rad/s e a esfera 1 se deslocou livremente em qualquer parte do volume do tanque preenchido com água. A figura IV.28 apresenta a taxa de variação das contagens nos detectores e os instantes de tempo escolhidos para o rastreamento da esfera 1, assinalados por linhas verticais: 210 s , 213 s , 216 s, 218 s, 221 s e 223 s. Nas figuras IV.29 e IV.30, estão ilustradas as imagens das posições rastreadas.

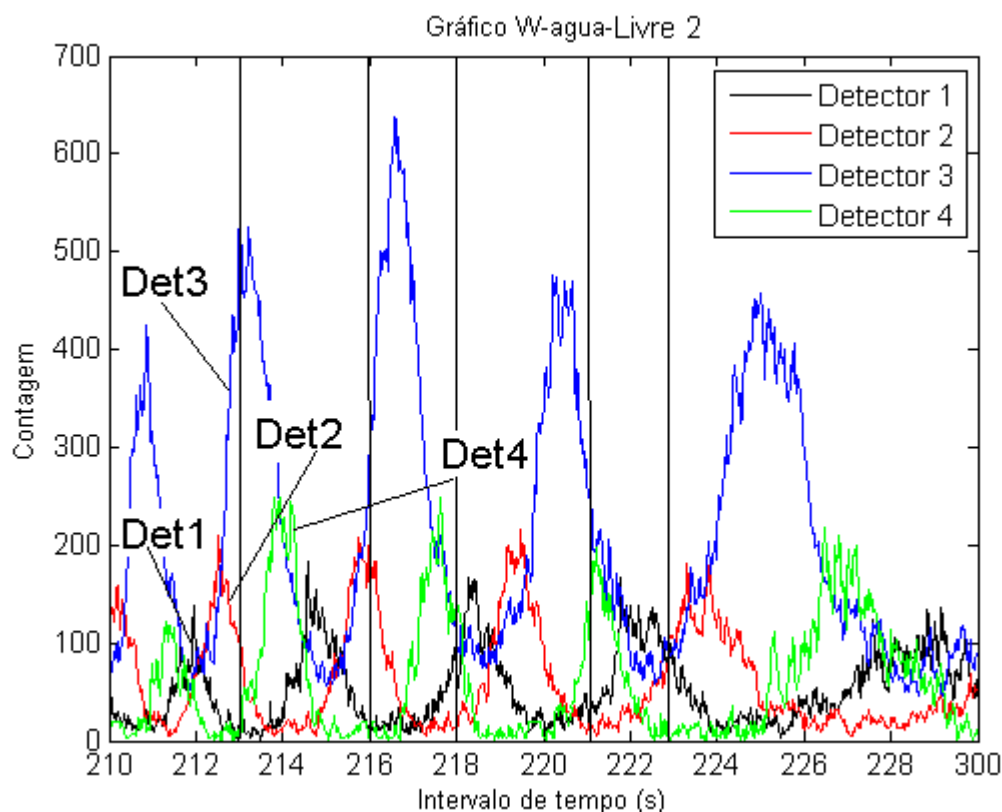
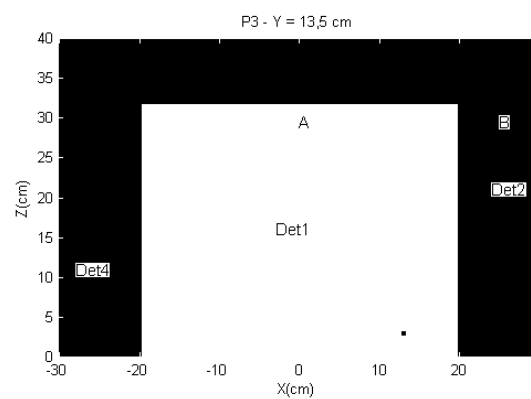
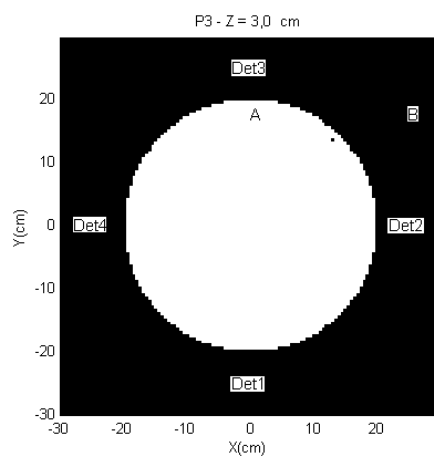
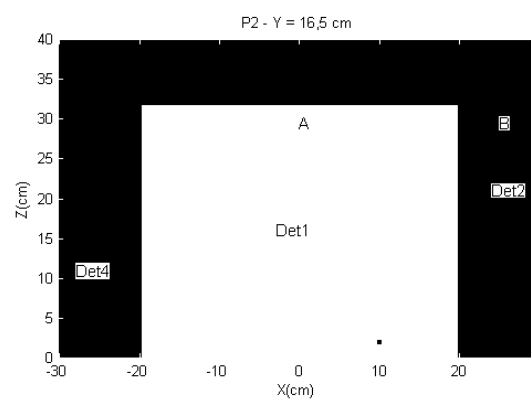
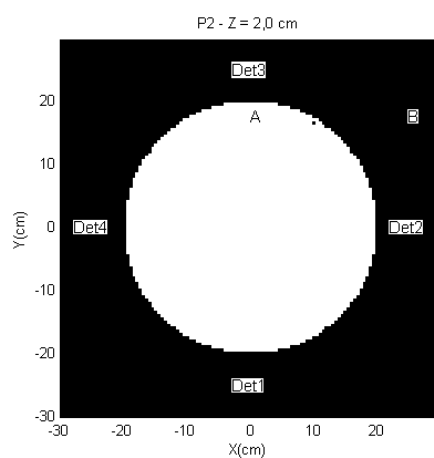
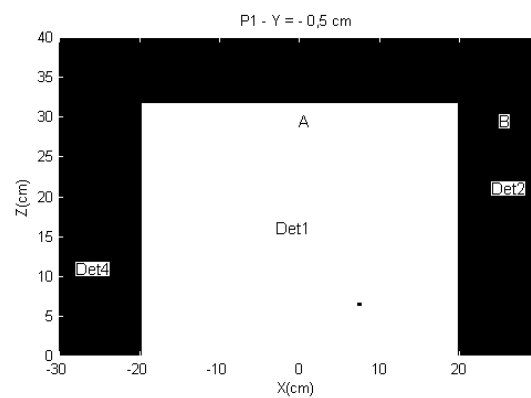
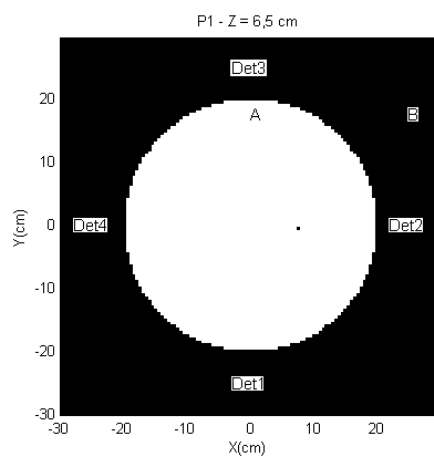
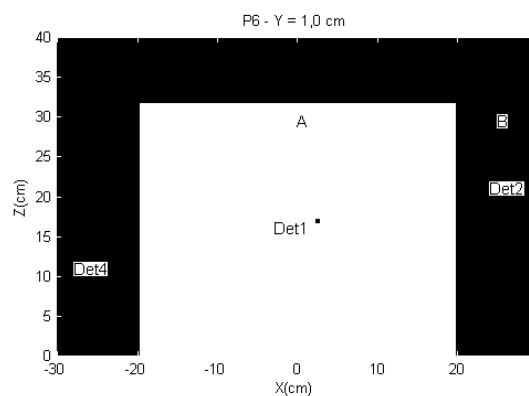
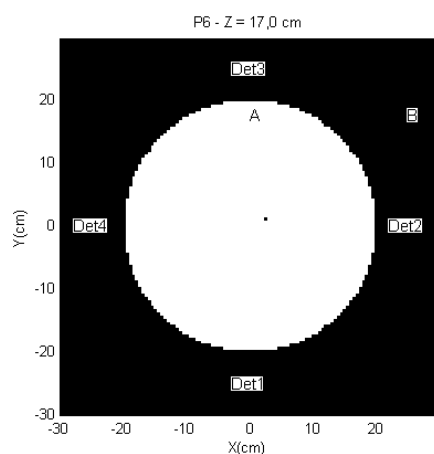
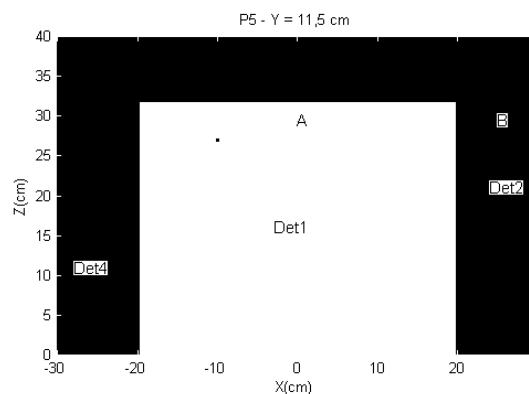
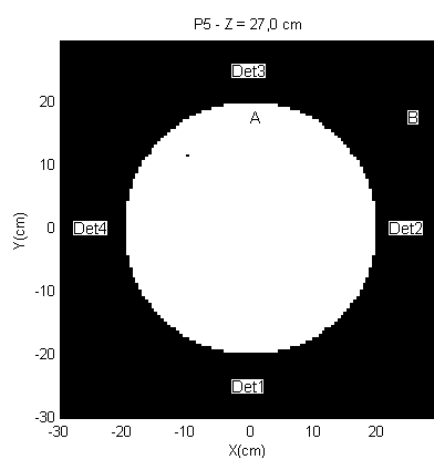
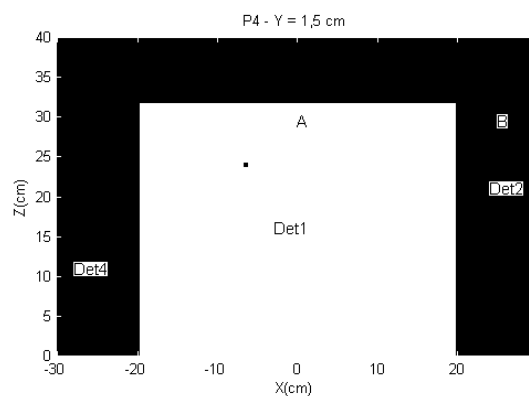
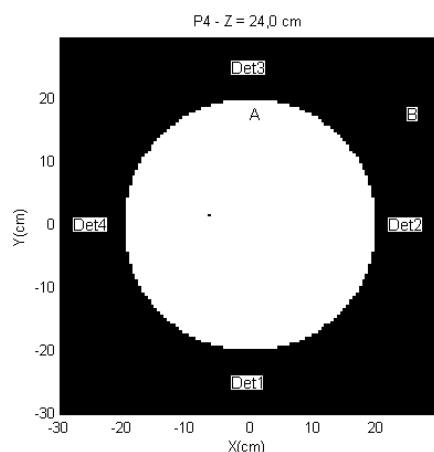


Figura IV.28 A variação das contagens nos detectores em função do tempo durante o teste F.



(a) (b)
 Figura IV.29 Posições da esfera 1 em $t = 210$ s, $t = 213$ s e $t = 216$ s. Projeções nos planos XY e XZ



(a) (b)
 Figura IV.30 Posições da esfera 1 em $t = 218$ s, $t = 221$ s e $t = 223$ s. Projeções nos planos XY e XZ

As imagens das posições da esfera 1 exibidas nas figuras IV.29 e IV.30 apresentam conformidade com os valores das contagens registradas no gráfico da figura IV.28. Isto pode ser confirmado analisando-se, por exemplo, o instante $t = 213$ s,

onde a imagem da partícula se encontra mais próxima do detector 3, assim como, no instante $t = 223s$, ela se encontra a uma distância intermediária entre os detectores 1 e 3, isto é, próxima ao centro do tanque.

IV.4.2.5 Ensaio G

Neste experimento, onde a esfera 1 foi abandonada no tanque com as pás girando com velocidade angular média igual a $3,0 \text{ rad/s}$, há uma zona morta montada com uma placa de PVC. Na figura IV.31, foram selecionados com linhas verticais os seis instantes de tempo onde a posição da esfera 1 foi localizada pelo algoritmo. Nas figuras IV.32 e IV.33 estão ilustradas as imagens do rastreamento da esfera 1 naqueles instantes.

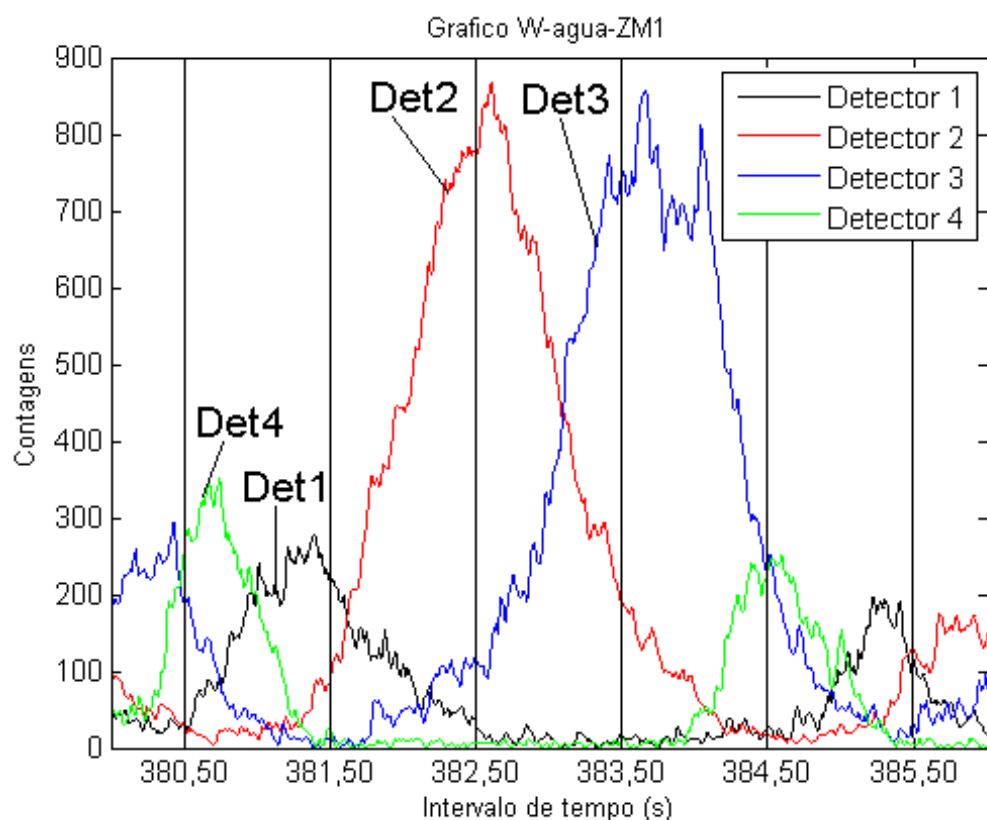
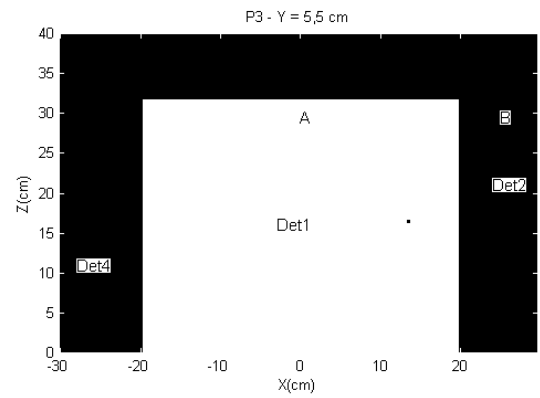
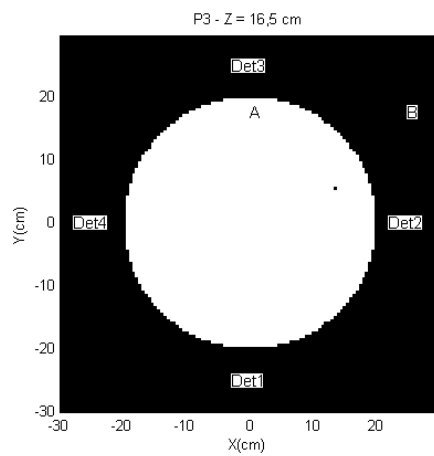
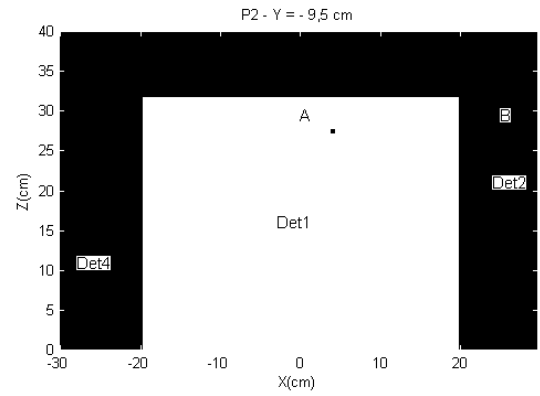
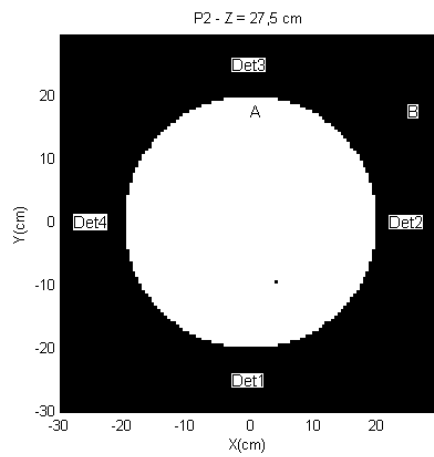
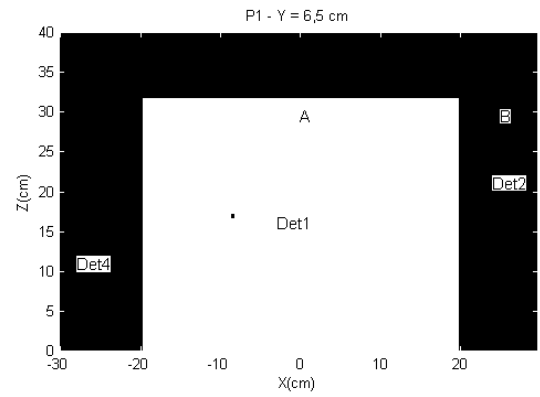
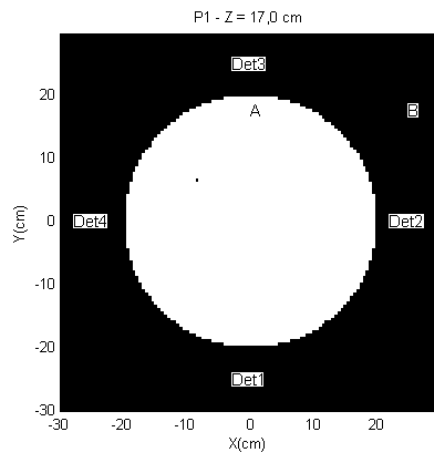
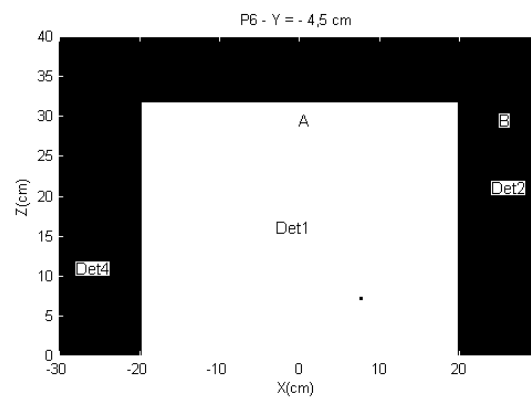
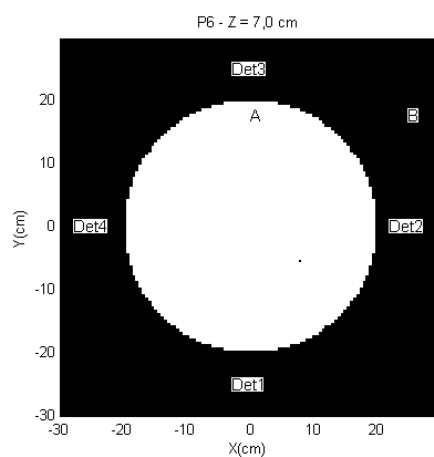
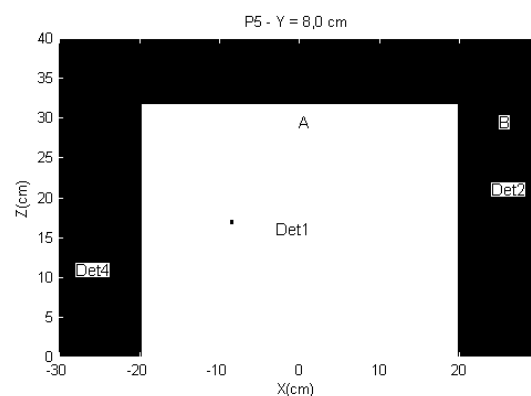
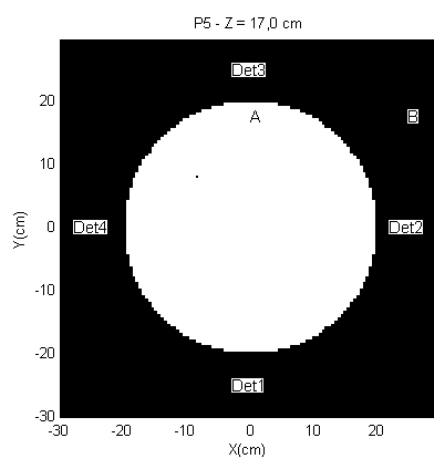
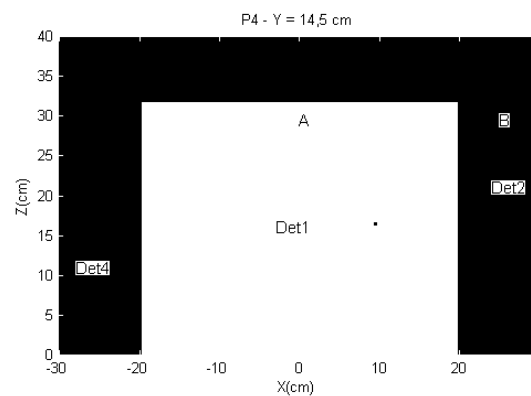
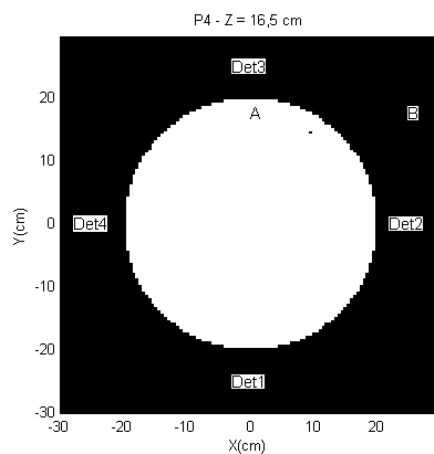


Figura IV.31 A variação das taxas de contagens registradas nos detectores durante o teste G.



(a) (b)
 Figura IV.32 Posições da esfera 1 em $t = 380,50$ s, $t = 381,50$ s e $t = 382,50$ s projetadas nos planos XY e XZ.



(a) (b)
 Figura IV.33 Posições da esfera 1 em $t = 383,50$ s, $t = 384,50$ s e $t = 385,50$ s projetadas nos planos XY e XZ.

Na análise das figuras, percebe-se a conformidade entre os valores das contagens exibidos nas curvas da figura IV.31 e as imagens apresentadas nas figuras IV.32 e IV.33. Por exemplo, no instante $t = 380\text{s}$, em que as contagens no detector 3 são um pouco maiores que as do detector 4, sendo muito baixas as contagens nos detectores 1 e 2, a imagem da posição da partícula se encontra no plano XY em um ponto intermediário entre os detectores 3 e 4 mas a sua altura Z naquele instante está mais próxima da do detector 3 ($Z=16,0\text{ cm}$). Em nenhum instante a partícula se aproximou do ponto do tanque mais próximo do detector 1 porque a placa de PVC, colocada junto à parede em frente a este detector, gerou uma zona morta.

IV.4.3 Ensaios realizados com a geometria L

IV.4.3.1. Ensaio O

Este experimento foi realizado com a presença de uma zona morta no interior do tanque, construída com a colocação de uma placa de PVC na mesma posição do ensaio G da geometria anel. O valor medido do período do movimento das pás foi igual a $2,0\text{s}$ e para verificar as imagens de sucessivas posições ocupadas pela partícula, foram escolhidos os seguintes instantes de tempo: $398,00\text{ s}$, $399,00\text{ s}$, $400,00\text{ s}$, $401,00\text{ s}$, $402,00\text{ s}$ e $403,00\text{ s}$ como apresentado na figura IV.34. As posições instantâneas da partícula de ^{198}Au estão apresentadas nas figuras IV.35 e IV.36, onde o lado (a) contém as projeções no plano XY e o lado (b) contém as projeções no plano XZ. Para consulta imediata, os dados da tabela III.14 estão repetidos na tabela IV.5.

Tabela IV.5 Ensaios realizados com a geometria L

Ensaio	Arquivo dados	meio a	meio b	T(s)	W(rad/s)
J	W_test2_rot2	água	ar	1,4	4,7
K	W_test2_rot3	água	ar	1,0	6,3
L	W_test2_rot4	água	ar	0,6	10,5
M	W_test2_ZM1	água	ar	1,4	4,7
N	W_test2_ZM2	água	ar	0,9	7,0
O	W_test2_ZM3	água	ar	2,0	3,0

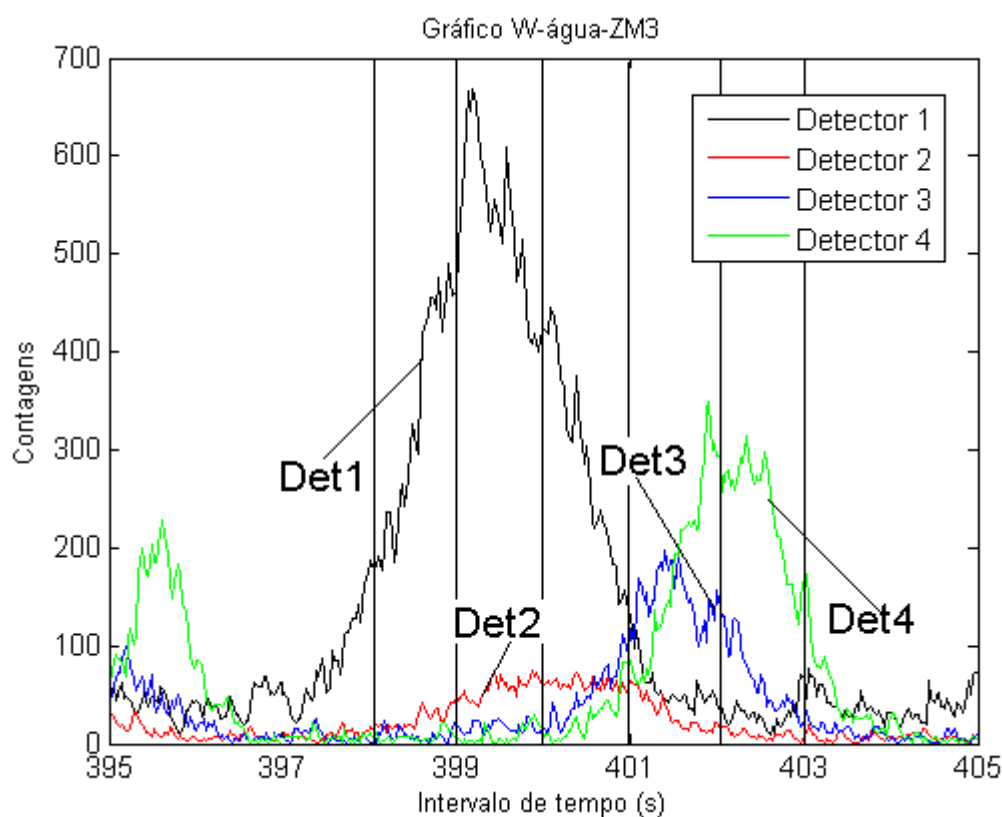
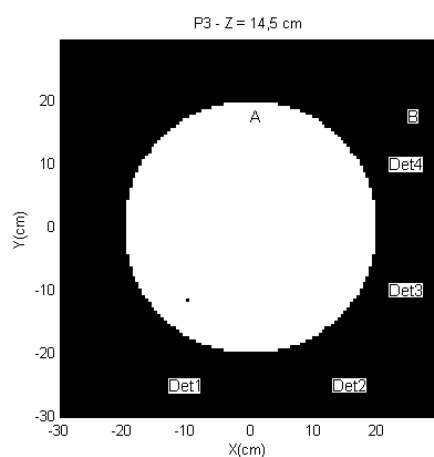
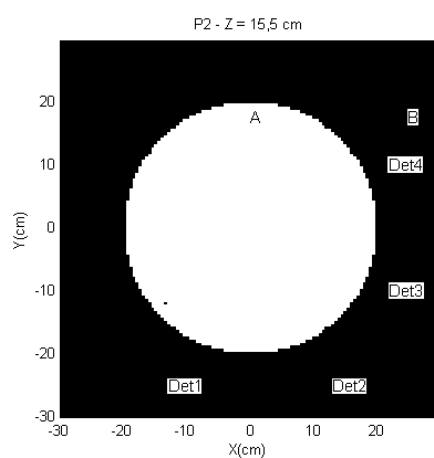
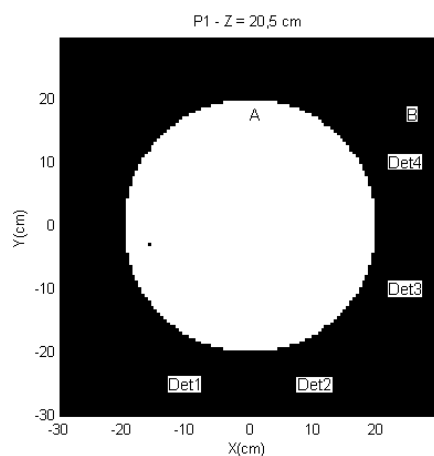
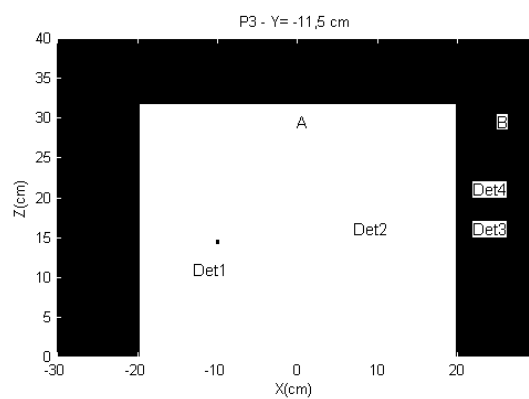
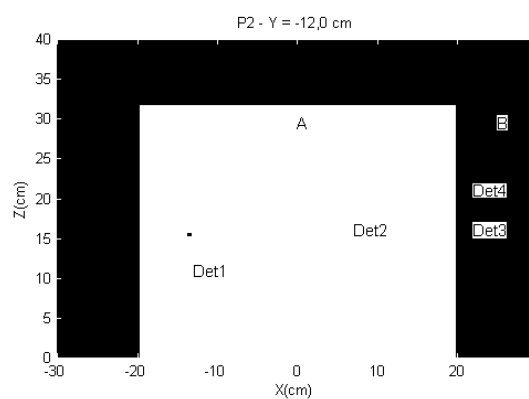
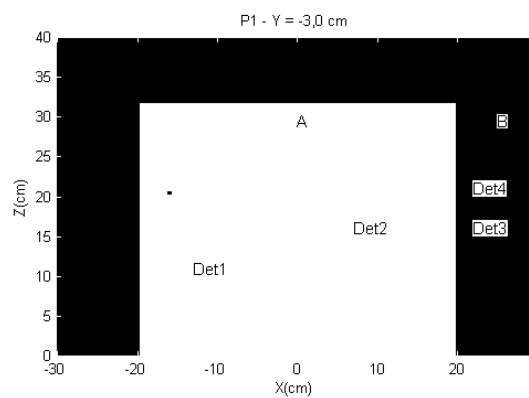


Figura IV.34. A variação das contagens registradas nos detectores em função da posição instantânea da esfera 2.

Na figura IV.34, verifica-se que as contagens registradas no detector 1, de 399 s a 400 s, são bem maiores que as nos demais detectores, apesar do fato da placa de PVC isolar a região do tanque em frente aos detectores 1 e 2. Então, as imagens das posições da esfera 2 entre aqueles instantes, vistas nas figuras IV.35 e IV.36, devem explicar este fenômeno.

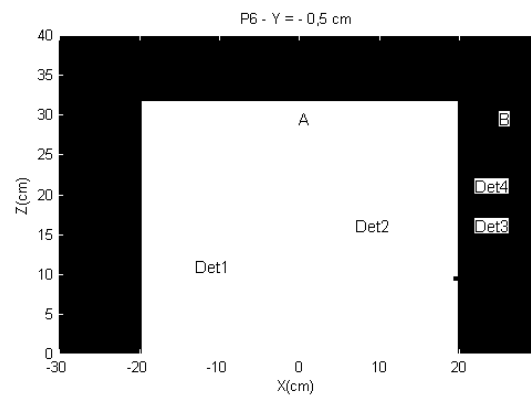
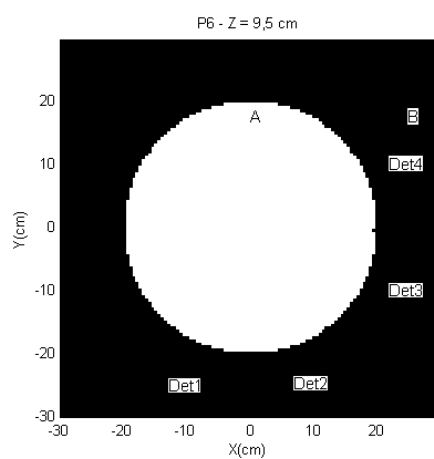
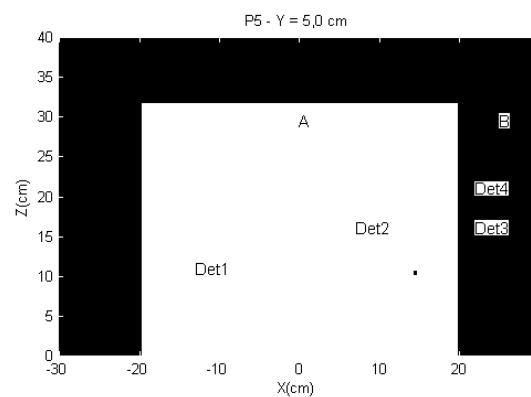
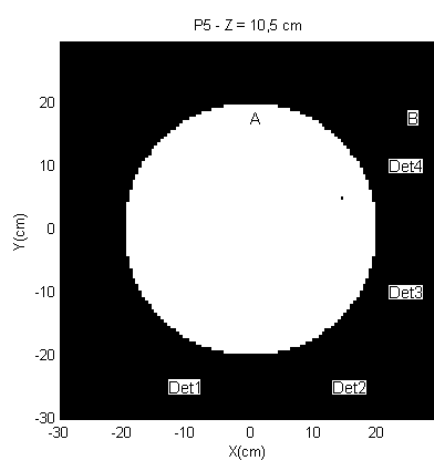
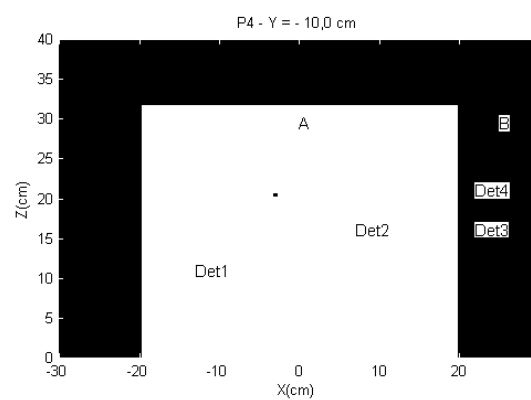
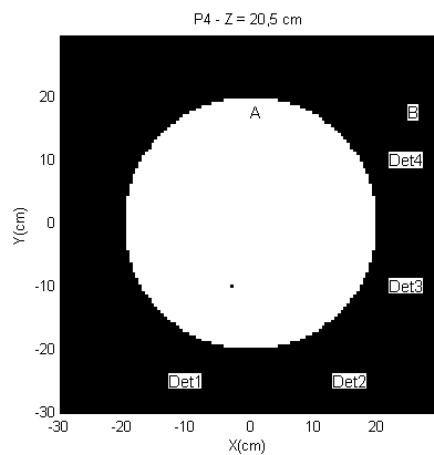


(a)



(b)

Figura IV.35 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 2 de $t = 398,00$ s a $t = 400,00$ s (intervalo de 1 s).



(a) (b)
 Figura IV.36 Projeções nos planos XY e XZ das posições da esfera 2 de $t = 401,00$ s a $t = 403,00$ s (intervalo de 1 s).

Observando-se as imagens das posições da esfera 2 nas figuras IV.35 e IV.36, verifica-se que, entre os instantes de tempo 399 s e 400 s, a esfera entrou no início da região de zona morta, quase em frente ao detector 1, e permaneceu em torno da posição (-11,-11, 15) durante mais de 1 s, o que explica as altas contagens registradas pelo detector 1 vistas no gráfico da figura IV.34. Na seqüência das imagens, verifica-se que, após 400 s, a esfera se afastou da entrada da zona morta, aumentou seu nível em relação ao fundo do tanque gradativamente, indo na direção do detector 4, e depois inverteu o sentido vertical, abaixando seu nível até chegar, em $t = 403$ s, junto à parede do tanque mais próxima dos detectores 3 e 4. Esta trajetória da esfera 2 aqui descrita está em conformidade com a variação das contagens nos detectores ocorrida no mesmo período de tempo.

Capítulo V

CONCLUSÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões da tese e sugeridas propostas para trabalhos futuros.

O método de localização da partícula radioativa foi testado experimentalmente em um meio líquido, em escala reduzida, para as duas geometrias do arranjo de detectores. O modelo de unidade industrial utilizado foi um tanque típico de estações de tratamento de esgotos montado no Laboratório de Radiotraçadores do IEN e o meio escolhido foi a água. Na análise preliminar realizada na secção IV.5, verificou-se que bastam dez iterações do algoritmo para que a posição instantânea da partícula seja encontrada e que o valor da Atividade do elemento da matriz de reconstrução situado nesta posição continua aumentando e se aproximando cada vez mais do valor real da Atividade da partícula à medida que se aumenta o número de iterações. Além disso, a resolução espacial das imagens das posições reconstruídas só depende do tamanho selecionado do voxel (ou da partícula).

Todos os ensaios foram realizados com o emprego de apenas quatro detectores NaI:TI, número bem inferior ao comumente utilizado na técnica CARPT, igual a dezesseis, mas as peculiaridades do método, reforçado pelo emprego do algoritmo EM, minimizaram a incerteza final na solução do problema inverso de localização da partícula radioativa.

Pelo que foi demonstrado na análise das imagens do capítulo IV, com o método proposto foi possível rastrear corretamente a partícula de ^{198}Au na água e no ar posicionando-se os detectores NaI:TI nas duas geometrias básicas propostas (anel e L), devidamente otimizadas em função das condições experimentais. A metodologia da pesquisa, que incluiu a fabricação de esferas de ^{197}Au com o tamanho e propriedades adequadas aos ensaios, permitiu que se avaliasse o comportamento da partícula radioativa constituída de ^{198}Au quando imersa no fluido durante três tipos de movimentos: o movimento circular (com vínculo), o movimento livre no fluido e o movimento sob a ação de um fenômeno típico de processos com zonas mortas. Neste último, verificou-se que a presença da zona morta foi capaz de aumentar em mais de 50% o tempo médio de residência dos elementos do fluido.

Em relação aos métodos praticados normalmente na técnica CARPT, as principais vantagens do método proposto para um ensaio em tempo real são:

- 1) Não há necessidade da calibração prévia dos detectores através da medição experimental da relação sinal-distância ou de simulação pelo método de Monte Carlo;
- 2) Podem ser utilizados apenas quatro detectores;
- 3) Comparando o método com aquele proposto por SHEHATA (2004), não há necessidade de se acoplar um sistema móvel motorizado para o deslocamento vertical do quarto detector.

As desvantagens ou limitações do método ainda não são totalmente conhecidas porque há uma demanda de novos experimentos para o seu completo conhecimento. A princípio, com os experimentos já realizados, pode-se verificar que, dependendo da relação entre as dimensões da partícula radioativa e da unidade industrial, o número de voxels na matriz de reconstrução (ou de elementos na matriz de probabilidades) pode ser muito elevado, o que pode requerer maiores recursos computacionais.

Enfim, os resultados sugerem que o método proposto para a aplicação da técnica CARPT é capaz de fornecer resultados tão bons quanto àqueles obtidos pelos métodos atuais e que ele pode ser usado para fins de diagnóstico. Contudo, para se realizar corretamente o rastreamento das posições instantâneas da partícula radioativa com este método é preciso que os parâmetros utilizados sejam bem conhecidos. Os parâmetros mais relevantes são: o diâmetro da face de cada detector, a Atividade e a energia do radiotraçador, o tempo de medição dos sinais, a densidade do meio, o diâmetro e o comprimento da unidade industrial. A falta ou inexatidão destes dados inviabilizam a avaliação de um processo.

Como sugestões de trabalhos futuros, temos:

- 1) Aprimorar a tecnologia de produção da partícula radioativa;
- 2) Estudar a aplicação desta metodologia para a marcação de fases sólidas em processos sólido-líquido, sólido-gás ou de misturas de granulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998 *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 2 ed., Rio de Janeiro, Brasil
- BERNE, Ph. BLET, V. et al., 1998. Assesment of the systemic approach using radioactive tracers and CFD. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Air Distribution in Rooms*, Stockholm.
- BERNE, Ph., THERESKA, J., 2003, "Simulation of a radiotracer experiment by flow and detection-chain modeling: a first step towards better interpretation", *Applied Radiation and Isotopes*, Elsevier.
- BLET, V., BERNE, P., LEGOUPIL, S et al., 2000, "Radioactive tracing as aid for diagnosing chemical reactors", *Oil and Gas Science and Technology – Rev. IFP* v.55, n.2, pp 171-183.
- BRANDÃO, L., 2001, *Otimização de unidades e tratamento de águas residuais urbanas e industriais empregando-se traçadores radioativos*, Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CHAOUKI, J., LARACHI, F., DUDUKOVIC, M. et al., 1997, "Non-invasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows", *Industry and Engineering Chemistry Research*, v.11, n.36, pp.4476-4503.
- CROUTHAMEL, C., ADAMS, F. DAMS, R., 1970, "Applied gamma ray spectrometry", 2 ed., Pergamon Press.
- DALEFE, R. *Notas de Aula de OP (2007)*. Disponível em:
<http://daleffe.googlepages.com/op> Acesso em: 05 fev. 2009 00:13
- DANCKWERTS, P., 1953, "Continuous flow systems – Distributions of Residence Times", *Chemical Engineering Science*, v.2, n.1, pp.1-18.
- DEFRISE, M., GULLBERG, G., 2006, "Image reconstruction", *Physics in Medicine and Biology*, v.51, pp. R139-R154.

- DEGALEESAN, S., 1997, *Fluid dynamic measurements and modeling of liquid mixing in bubble columns*. D.Sc. thesis, Washington University, St Louis, MO.
- DUDUKOVIC, M., 2007, "Relevance of Multiphase Reaction Engineering to Modern Technological Challenges". *Industrial Engineering Chemical Research.*, v.46., n.25., pp. 8674-8686.
- DUDUKOVIC, M., DAHHAN, M., BHUSARAPU, S., 2006 "Solids flow mapping in a gas-solid riser: Mean hold up and velocity fields". *Powder Technology*, n.163., pp. 98-123.
- DUDUKOVIC, M., 2005, "Quantification of flow patterns and mixing in multiphase reactors". In: *Proceedings of the International Seminar: The engineering about chemistry and its foundation for human beings' happiness*. pp.III.1-III.25, Tókió.
- DUDUKOVIC, M., 2002, "Opaque multiphase flows: experiments and modeling". *Experimental Thermal and Fluid Science.*, n.26., pp. 747-761.
- DYAKOLWSKI, T., 1996, "Process tomography applied to multi-phase flow measurements", *Measurements in Science and Technology*, n.7, pp.343-353.
- ERWALL, G., FORSBERG, G., LJUNGGREN, K., 1964, *Industrial isotope techniques*, 1ed. New York, John Wiley and Sons.
- GILL, P. et al., 1991, *Numerical Linear Algebra and Optimization*, 1ed., vol.1, Addison Wesley Publishing Company.
- GUHA, D. et al., 2007, "Flow field of suspended solids in a stirred tank reactor by Lagrangian tracking". *Chemical Engineering Science*. v.62 (jun.), pp.6143-6154.
- HIMMELBAU, D., BISCHOFF, K., 1968, *Process Analysis and Simulation in Deterministic Systems*, John Wiley and Sons.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1990, *Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry*, Technical Reports Series No.316, IAEA, Vienna, Austria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2003, *Manual for reactor produced radioisotopes*, Technical Documents No.1340, IAEA, Vienna, Austria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2004, *Integration of tracing with Computational Fluid Dynamics*, 1ed., IAEA, Vienna, Austria.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2004, *Radiotracer applications in industry – a guidebook*, Technical Reports Series No.423, IAEA, Vienna, Austria.

KNOLL, G., 1999, *Radiation Detection and Measurement*, 2ed, Wiley, New York, USA.

KONDUKOV, N., KORNILAE, A., AKHROMEN, A. et al., 1965, "Investigation of parameters of particle motion in a fluidized bed by radioisotopic method", *International Chemical Engineering*, v.5,n.1, pp.83-86.

LANGE, K., CARSON, R., 1984, "EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography", *Journal of Computed Assisted Tomography*, v.8, n.2, pp.306-316.

LARACHI, F. et al., 1994, "A γ ray detection system for 3-D particle tracking in multiphase reactors". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. v.A, n.338 (aug.), p.568-576.

LEGOUPIL, S., PASCAL, G., CHAMBELLAN, D. et al., 1996, "Determination of the detection process in an experimental tomograph for industrial flow visualization using radioactive tracers", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v.43, n.2, pp.751-760.

LEGOUPIL, S., PASCAL, G., CHAMBELLAN, D. et al., 1997, "An experimental single photon emission computed tomograph method for dynamic 2D fluid flow analysis", *Applied Radiation Isotopes*, v.48, n.10-12, pp.1507-1514.

LIN, J., CHEN, M., CHAO, B., 1985, "A novel radioactive particle tracking facility for measurement of solids motion in gas fluidized beds", *AIChE Journal*, v.31,n.3, pp.465-473.

OBLOZINSKY, P., RIBANSKI, I., 1971, "The solid angle at a disk source by a non-parallel disk detector", *Nuclear Instruments and Methods*, n.94, pp. 187-188.

PARKER, D., HAWKESWORTH, M., BEYNON, T. et al., 1995, "Process applications of emission tomography", *The Chemical Engineering Journal*, n.56, pp.109-117.

PARKER, D., HAWKESWORTH, M., BROADBENT, C. et al., 1994, "Industrial positron-based imaging: principles and applications", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v.348, pp.583-592.

PARKER, D., BROADBENT, C., FOWLES, P. et al., 1993, "Positron emission particle tracking – a technique for studying flow within engineering equipment", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v.326, pp.592-607.

PRICE, W., 1958, *Nuclear Radiation Detection*, 1 ed., McGraw-Hill Book Company.

RAMMOHAN, R. et al., 2000 "A Lagrangian description of flows in stirred tanks via computer-automated radioactive particle tracking (CARPT)". *Chemical Engineering Science*. v.56 (nov)., pp. 2629-2639.

RAMOS, R., 2006, *Uso das Técnicas de Radiotraçadoes de Contagem Total em Medidas de Vazão de Sistemas Abertos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

ROSENFELD, K. , 1982, *Digital picture processing*, 1ed. , vol.1, Academic Press.

SEIXAS, R. Visualização Científica (2005). Disponível em:

<http://w3.impa.br/~rbs/pdf/vc.pdf> Acesso em 02 jan 2009 16:10

SEPPANEN, A., 2000, "Correction of Collimator Blurring and Attenuation in Single Photon Emission Computed Tomography" Master in Science Thesis, University of Kuopio, Kuopio, Finland.

SHEHATA, A. *A new method for radioactive particle tracking*. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-12072005-140754/unrestricted/etd.pdf> Acesso em 17 dez 2007 14:36

TSOULFANIDIS, N., 1995, *Measurement and Detection of Radiation*, 2ed, Taylor & Francis

THYN, J., ZITNY, R., 1999, *Analysis and diagnostics of industrial processes by radiotracers and radioisotope sealed sources*, 1ed., John Wiley and Sons, New York.

THYN, J., ZITNY, R., 2004, "Radiotracer applications for the analysis of complex flow structure in industrial apparatuses", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v.213, pp.339-347.

VELZEN, D., FLAMM, J., LANGENK, A., 1974, "Gas-flow patterns in spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering* .v.52.,n.2.,pp.145-149.

VIEIRA, W. "A software for computer automated radioactive particle tracking." 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences - ENCIT, 2008, Belo Horizonte, MG, Brasil CD-ROM.

Anexo I

A função principal do algoritmo

Este algoritmo é capaz de calcular e armazenar os vetores que contém os dados para os perfis de concentração ou de velocidade dos fluidos em três dimensões para a posterior projeção destas grandezas nos planos X-Y, ou X-Z de um sistema de coordenadas cuja origem é fixa no centro da base da unidade industrial.

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
float entrada (float alt,float dp,float raio,float raioT,float intv,float tctg,float dTd,float  
uata,float uatb, float uatc,float vert1,float vert2,float vert3,float vert4,float horiz1,float  
horiz2,float horiz3,float horiz4,float cotz1,float cotz2,float cotz3,float cotz4,float ativ,  
float pk, )
```

```
/*função de entrada das contagens simuladas no programa
```

Nomenclatura :

alt:Altura do tanque (cm);

dp:dimensão linear do voxel;

raio: raio do colimador (cm);

raioT: raio do tanque (cm);

intv:intervalo de tempo entre duas contagens (s);

tctg: duração total do experimento (s);

nT: número total de contagens líquidas na energia do fotopico;

(v,h) : coordenadas dos detectores (cm);

dTd:a menor distância entre o detector e a parede do tanque;

ativ: Atividade total da partícula radioativa,(Bq);

pk: razão pico-total para a determinação da eficiência na energia do fotopico;

p3d:vetor contendo as posições consecutivas da partícula;

prodec:probabilidade de decaimento na enegia do fotopico (%);

q(1,2,...(Alt/dp)-1):número inteiro correspondente à altura z do tanque, onde z varia no intervalo $[-(alt/2)+dp; +(alt/2)-dp]$;

detm:número de detectores localizados no plano XY perpendicular ao eixo vertical do tanque, à altura z;

n:número de células da matriz M no plano XY;

Obs.: alt e (raioT+dTd) devem ser múltiplos de dp!*/

```
{
float p3d,total_alt,lado,c1,c2,c3,c4,NC[100][4];
int num=0;
FILE *contagem;/*declara o ponteiro para o arquivo contagem1.txt*/
contagem=fopen("contagem1.txt","r");

if (contagem==NULL){
printf ("\n Erro na abertura do arquivo\n");
exit(0);
}
else{
    printf("\n Arquivo aberto para operacoes\n");
    /*abre o arquivo contagem1 para leitura ou emite mensagem de erro*/

while (num <100){
    fscanf(contagem,"%f%f%f%f",&c1,&c2,&c3,&c4);
    NC[num][0]=c1;
    NC[num][1]=c2;
    NC[num][2]=c3;
    NC[num][3]=c4;
    ++num;
}
fclose(contagem);
}
/*função principal*/
main(){
/* dados de entrada para a contagem simulada ( geometria em anel)*/

floatAlt=40.00,dl=0.4,r=2.54,R=20.00,t=0.2,T=13.0,d=10.0,ua=0.1061,ub=0.0001053,
uw=0.20424,v1=0.00,v2=30.00,v3=0.00,v4=-30.00,h1=-
30.00,h2=0.00,h3=30.00,h4=0.00,z1=16.00,z2=21.00,z3=16.00,z4=11.00,
No=1880000,pb=0.956,pk=0.210305;

float xyz[ 150] [150 ] [ 150], int n;
short int m=4;
static int lado, total _alt, cont;
```

```

float N ;
N=entrada(Alt,dl,r,R,t,T,d,ua,ub,uc,v1,v2,v3,v4,h1,h2,h3,h4,z1,z2,z3,z4,No);
lado=2*(R+d)/dl;
n=lado*lado*lado;
total_alt=Alt/dl;
/*demais operações da função principal*/
}
printf("\n N = %f \n", xyz);
extern float xyz
/* demais funções do algoritmo*/
printf("\nAperte n para sair ou uma tecla qualquer para continuar\n");
} while (getch()!='n');

getch();
/*nSaindo do laco...*/

}

```