AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**EFEITOS DO COLIMADOR NA QUALIDADE DE IMAGEM EM
TOMÓGRAFIA INDUSTRIAL DE TERCEIRA GERAÇÃO**

DIEGO VERGAÇAS DE SOUSA CARVALHO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações**

Orientadora:

Dra. Margarida Mizue Hamada

SÃO PAULO

2014

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**EFEITOS DO COLIMADOR NA QUALIDADE DE IMAGEM EM
TOMÓGRAFIA INDUSTRIAL DE TERCEIRA GERAÇÃO**

DIEGO VERGAÇAS DE SOUSA CARVALHO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações**

Orientadora:

Dra. Margarida Mizue Hamada

SÃO PAULO

2014

A todos os seres vivos.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Dra. Margarida Mizue Hamada por todo o tempo e empenho a mim dedicados.

O Dr. Carlos Henrique de Mesquita por todo tempo e conhecimento de ciência e vida que me passou.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN –SP), em especial ao Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) por ter disponibilizado suas instalações para o desenvolvimento deste trabalho.

À Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

A Universidade Federal de Pernambuco em especial a Prof. Dr. Carlos Costa Dantas, MSc. Eric Ferreira de Oliveira e colaboradores pelo fornecimento do conhecimento na área e software de reconstrução de imagens.

Aos funcionários do Centro de Tecnologia das Radiações, Dr. Wilson Calvo, Dr. Fabio Costa, Dra. Maria Elisa Rostelato, Dra. Maria Conceição, Tec. Vagner Fernandes, Dr. Carlos Zeituni, Dr. Nelson Omi, Dr. Leornado Gondim, Dr. Pablo Salvador, e outras pessoas.

Aos amigos e colegas do Centro de Tecnologia das Radiações pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, João Trencher, Robinson Alves, Adriano Oliveira, Cauê de Mello, Fernando Peleias, Fenando Kondo, Carla de Souza, Alexandre Velo, Luana Andrades e outras pessoas.

Ao Beatriz Ribeiro Nogueira pelo apoio, auxílio e tempo a mim dedicados.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Naquele momento surpreendente, eu não
entendia não só como a vida se
transformou em morte... mas como a morte
poderia ser transformada em vida.”*

Dr. Victor Frankenstein

Mary Shelley

EFEITOS DO COLIMADOR NA QUALIDADE DE IMAGEM EM TOMÓGRAFO INDUSTRIAL DE TERCEIRA GERAÇÃO

Diego Vergaças de Sousa Carvalho

RESUMO

O estudo do efeito da colimação nos detectores de radiação sobre a qualidade de imagem do tomógrafo industrial de terceira geração desenvolvido no IPEN/CNEN-SP é descrito neste trabalho. Três conjuntos de colimadores de chumbo foram projetados e confeccionados, sendo um com janelas retangulares de 2 x 5 x 50 mm e outro com 4 x 10 x 50 mm (largura x comprimento x profundidade) e um terceiro com orifício circular de 5 mm de diâmetro x 40 mm de profundidade. Os colimadores foram projetados para poderem ser facilmente substituídos entre si nos detectores de radiação. Paralelamente, foram confeccionados e utilizadas a eletrônica associada, constituída de analisadores de sinais tipo multicanal de 8 bits contendo a unidade de alta tensão e o amplificador. Dentre as vantagens deste sistema destaca-se a sua capacidade de análise multicanal rápida e possuir uma eletrônica mais simples. Valores de resolução energética comparável com a da literatura foram encontrados utilizando a eletrônica desenvolvida acoplada ao detector de radiação de NaI(Tl). Os efeitos dos colimadores foram avaliados pelas medidas tomográficas em um fantom de polimetilmetacrilato contendo componentes multifásicos estáticos (ferro, alumínio e ar). Fontes de radiação com energias de das fontes de ^{75}Se (97 keV, 121 keV, 136 keV, 265 keV, 279 keV e 400 keV), de ^{137}Cs (662 keV) e de ^{192}Ir (317 keV, 468 keV e 602 keV) observou-se que a melhor imagem do fantom foi obtida com os colimadores de janelas retangulares (fendas) de 2 x 5 x 50 mm. Na avaliação dinâmica da formação de bolhas em coluna simuladora de processos industriais, a melhor imagem foi obtida com a fonte de ^{192}Ir .

COLLIMATOR EFFECTS ON IMAGE QUALITY IN INDUSTRIAL TOMOGRAPHY THIRD GENERATION

Diego Vergaças de Sousa Carvalho

ABSTRACT

The study of the effect of collimation in radiation detectors on the image quality of the third-generation industrial CT scanner developed at IPEN / CNEN-SP is described in this work. Three sets of lead collimators were designed and manufactured, one with rectangular windows of 2 x 5 x 50 mm and the other with 4 x 10 x 50 mm (width x length x deep) and a third circular hole of 5 mm diameter x 40 mm deep. The collimators were designed to be easily interchanged in radiation detectors. In parallel, were prepared and used the associated electronics, consisting of multi-channel signal analyzers type of 8 bits containing the high voltage unit and the amplifier. Among the advantages of this system stands out for its ability to fast multichannel analysis and possess a simpler electronics. Values in energy resolution comparable with the literature were found using the developed electronics coupled to the radiation detector of NaI (TI). The effects of collimators were evaluated by tomographic measurements in a multiphase phantom polymethyl methacrylate containing static components (iron, aluminum and air). Radiation sources with energies of the sources of ^{75}Se (97 keV, 121 keV, 136 keV, 265 keV, 279 keV and 400 keV), ^{137}Cs (662 keV) and ^{192}Ir (317 keV, 468 keV and 602 keV) observed that the best image was obtained phantom collimators with rectangular windows (slits) 2 x 5 x 50 mm. In the dynamic evaluation of formation of bubbles column in a simulated industrial processes the best image at was obtained with the ^{192}Ir source.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	8
3.	CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	9
3.1.	Tipos de radiações	9
3.2.	Radiação Gama	10
3.3.	Interação da radiação gama com a matéria.....	10
3.4.	Efeito fotoelétrico.....	12
3.5.	Efeito Compton.....	13
3.6.	Produção de pares	14
3.7.	Detectores de radiação	16
3.8.	Tipos de detectores de radiação	16
3.9.	Detector cintilador	17
3.10.	Espectrometria gama	18
3.11.	Resolução energética.....	19
3.12.	Considerações teóricas aplicadas à tomografia.	20
3.12.1.	Resolução espacial	20
3.12.2.	Resolução temporal	20
3.12.3.	Resolução de densidade.....	21
3.12.4.	Eficiência de detecção.	22
3.12.5.	Atenuação da radiação gama	22
3.12.6.	Colimadores	23
4.	METODOLOGIA.....	24
4.1.	Tomógrafo Computadorizado Industrial de 3ª geração (TCi-3ªG).....	24
4.2.	Projeto mecânico.....	25
4.3.	Eletrônica associada para aquisição de dados.....	25
4.4.	Detectores de Radiação.....	28
4.5.	Colimadores	29
4.6.	Fontes Radioativas.....	30
4.7.	Sistema de Aquisição de Dados	31
4.8.	Fantom Multifásico	32
4.9.	Coluna de Bolhas	34
4.10.	Medidas Tomográficas	35
4.11.	Algoritmo de Reconstrução de Imagens	36
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38

5.1.	Espectros de Energia e Resolução	38
5.2.	Colimadores	41
5.3.	Eletrônica de aquisição de dados	54
5.4.	Resolução e o parâmetro FWHM.....	54
5.5.	Tempo de Medida da Tomografia	55
5.6.	Fantom – Objeto padronizado capaz de gerar imagens com aspectos conhecidos	56
5.6.1	Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 2 x 4 x 50mm.....	56
5.6.2	Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 4 x 10 x 50mm.....	57
5.6.3	Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 5 Ø x 40mm.....	57
5.6.4	Inferência da densidade a partir dos índices de cor das imagens.....	58
5.6.5	Comparação entre imagens reconstruídas obtidas pelo tomógrafo de terceira geração e um tomógrafo médico.....	65
5.7.	Coluna Simuladora de Bolhas.....	65
6.	CONCLUSÕES	68
7.	REFERENCIAS.....	69

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema do tomógrafo de primeira geração	3
Figura 2 - Esquema do tomógrafo de segunda geração	4
Figura 3 - Esquema do tomógrafo de terceira geração	5
Figura 4 - Esquema do tomógrafo de quarta geração	6
Figura 5 - Fotografia do TCI-3 ^a G com sistema monocal, da Washington University in St. Louis, utilizado pelo Dr. Pablo A. V. Salvador em sua tese de doutorado	7
Figura 6 - Fotografia do TCI-3 ^a G utilizado neste trabalho	7
Figura 7 - Espectro eletromagnético.	9
Figura 8 - Ilustração do efeito fotoelétrico	13
Figura 9 - Ilustração do efeito Compton	14
Figura 10 - Ilustração do efeito produção de pares	15
Figura 11 - Coeficiente de absorção de massa para raios γ no Pb e H ₂ O, correspondentes a processos fotoelétrico (linha fina cheia) Compton (linha tracejada) e contribuição total (linha cheia grossa).	15
Figura 12 - Diagrama do funcionamento de um detector cintilador	18
Figura 13 - Imagem ilustrada do funcionamento de uma fotomultiplicadora	18
Figura 14 - Imagem da curva para calcular o FWHM	20
Figura 15 – Esquema de colimador de radiação. Em A o alvo (objeto) atingido por fótons não colimados e em B o alvo é atingido por fótons selecionados pelo colimador.	23
Figura 16 – Fotografia do módulo multicanal	25
Figura 17 - Diagrama de blocos do funcionamento da placa mãe	26
Figura 18 - Fotografia da placa mãe	26
Figura 19 - Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados	26
Figura 20 - Fotografia da placa de aquisição de dados	27
Figura 21 - (a) Sinal de entrada após a última etapa de amplificação; (b) Sinal de amostragem; (c) Sinal digitalizado; (d) Sinal que informa o fim do processo de conversão.	27
Figura 22 - Fotografia do detector Lundlum modelo 40-10	28
Figura 23 - Fotografia da blindagem de Pb do detector de radiação e os colimadores utilizados neste trabalho	29
Figura 24 - Colimador de chumbo com abertura de janela retangular de 2 x 5 x 50 mm	30
Figura 25 - Colimador de chumbo com abertura de janela retangular de 4 x 10 x 50 mm	30
Figura 26 - Colimador de chumbo com abertura de circular de 5 de diâmetro e 40 mm de profundidade	30
Figura 27 - Telas do programa de gerenciamento do tomógrafo. Tela principal (A), escolha de detectores (B) e colimadores do Tci-3 ^a G (C)	32
Figura 28 - Fotografia do fantom multifásico utilizado neste trabalho	33
Figura 29 - Desenho técnico do fantom multifásico	33

Figura 30 - Fotografia do disco gerador de bolhas	34
Figura 31 - Fotografia da coluna simuladora de bolhas em funcionamento.....	35
Figura 32 - Fotografia do TCI-3 ^a G do CTR - IPEN/CNEN-SP que foi utilizado neste trabalho	35
Figura 33 - Fotografia da tela do programa de reconstrução de imagens.....	37
Figura 34 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ⁷⁵ Se (97~136 keV, 265~279 keV e 400 keV)	39
Figura 35 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ¹³⁷ Cs (662 keV)	39
Figura 36 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ¹⁹² Ir (317 keV, 468 keV e 602 keV)	40
Figura 37 - Gráfico de linearidade das energias das fontes de ⁷⁵ Se, ¹³⁷ Cs e ¹⁹² Ir	41
Figura 38 - Temperatura de fusão de prováveis materiais utilizados para moldagem de colimadores	42
Figura 39 - Densidades dos prováveis materiais para os colimadores	42
Figura 40 - Dureza dos prováveis materiais para os colimadores.....	43
Figura 41 – Demonstração teorica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 279 keV. Razão entre o número de fótons no orifício do colimador (FC) / fótons que vazam pela blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ⁷⁵ Se	46
Figura 42 – Demonstração teorica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 662 keV. Razão entre o número de fótons colimados (FC) / fótons que atravessam a espessura da blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ¹³⁷ Cs.....	46
Figura 43 – Demonstração teorica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 317 keV. Razão entre o número de fótons colimados (FC) / fótons que atravessam a espessura da blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ¹⁹² Ir.....	47
Figura 44 - Espectro de energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 2 x 5 mm	48
Figura 45 - Espectro de energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 4 x 10 mm	48
Figura 46 - Espectro de energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 5 mm de diâmetro	49
Figura 47 - Espectro de energias de ¹³⁷ Cs e ¹⁹² Ir, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 2 x 5 mm	49
Figura 48 - Espectro de energias de ¹³⁷ Cs e ¹⁹² Ir, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 4 x 10 mm	50
Figura 49 - Espectro de energias de ¹³⁷ Cs e ¹⁹² Ir, obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 5 mm de diâmetro	50
Figura 50 - Linearidade das energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 2 x 5 mm.....	51
Figura 51 - Linearidade das energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 4 x 10 mm.....	51
Figura 52 - Linearidade das energias de ⁷⁵ Se e ¹³⁷ Cs, para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas circular de 5 mm de diâmetro.....	52

Figura 53 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 2 x 5 mm.....	52
Figura 54 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 4 x 10 mm.....	53
Figura 55 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 5 mm de diâmetro	53
Figura 56 – Imagens reconstruídas do fantom com algoritmo SMART	58
Figura 57 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm.....	59
Figura 58 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm de fenda	59
Figura 59 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm.....	60
Figura 60 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com fenda de 2 x 5 mm.....	60
Figura 61 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm.....	61
Figura 62 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm.....	61
Figura 63 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm.....	62
Figura 64 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com fenda de 4 x 10 mm.....	62
Figura 65 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro.....	63
Figura 66 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro.....	63
Figura 67 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro.....	64
Figura 68 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro.....	64
Figura 69 – Imagens reconstruídas do fantom, utilizando método	65
Figura 70 - Imagens da coluna simuladora de bolhas a energia de 317 keV e 662 keV, à quatro alturas diferente, utilizando o colimador de 2 x 5 x 50 mm.....	67

Lista tabela

Tabela 1 - Interações possíveis da radiação eletromagnética ionizante - raio-X, raio gama, fóton de aniquilação - com a matéria [35]	11
Tabela 2 - Principais cintiladores e suas características	17
Tabela 3 - Características das fontes de radiação gama utilizadas neste trabalho	31
Tabela 4 - Densidade dos materiais do fantom	33
Tabela 5 - FWHM e resolução	38
Tabela 6 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam a fenda e toda a parede sólida do colimador de 2 x 5 x 50 mm	45
Tabela 7 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam a fenda e toda a parede sólida do colimador de 4 x 10 x 50 mm	45
Tabela 8 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam o orifício e toda a parede sólida do colimador de 5 $\varnothing$ x 40 mm	45
Tabela 9 - Resultados dos valores de FWHM para as fontes ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir utilizando diferentes dimensões de colimadores	55
Tabela 10 - Resultados dos valores de resolução energética para as fontes ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir utilizando diferentes dimensões de colimadores	55
Tabela 11 - Numero de vistas e tempo de tomografia	56

1. INTRODUÇÃO

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma tecnologia que faz uso de uma fonte de radiação eletromagnética (raios X ou raios gama) colocada diametralmente oposta a um conjunto de detectores de radiação, em volta do objeto/corpo de estudo (organismos vivos ou materiais diversos). A atenuação sofrida pelos feixes da radiação ao atravessarem o objeto é mensurada por detector de radiação que se movimentam em sincronismo com a fonte. Os dados obtidos pelos detectores são enviados a um software de reconstrução de imagens, processados em um computador. As imagens são obtidas em secções ou "fatias" transversais do objeto. Assim, uma TC indica a quantidade de radiação absorvida por cada parte do objeto analisado e traduz essas variações numa escala de cores que relacionados com a densidade de cada voxel do objeto, produzindo uma imagem representativa. Cada pixel da imagem corresponde ao coeficiente de atenuação da radiação $\mu(\text{cm}^{-1})$ de um determinado ponto (pixel) de absorção do objeto a ser analisado [1] [2].

No início dos anos 40, a reconstrução de imagens a partir de projeções foi patenteada por Gabriel Frank, que descreveu a ideia básica da tomografia, com equipamentos e projeções [3]. No entanto, suas ideias somente foram reproduzidas cerca de vinte anos após por William H. Oldendorf, um neurologista americano que realizou uma série de experimentos posteriormente utilizados na TC [4].

Somente em 1967, nos Laboratórios Centrais de Pesquisa (CRL) da EMI Ltda., na Inglaterra, o engenheiro elétrico Godfrey N. Hounsfield e o biólogo Allan Cormack deram início ao desenvolvimento do primeiro TC para uso médico. Pelo pioneirismo das pesquisas em TC, no ano de 1979, Hounsfield e Cormack dividiram o Prêmio Nobel em Fisiologia e Medicina [4].

A TC médica abriu novas possibilidades de investigação em diversos campos de pesquisa e possibilitou o desenvolvimento da Tomografia Computadorizada Industrial (TCi). Por muitos anos, a TCi teve sua aplicação voltada para testes não destrutivos e estudos científicos. Na indústria, as principais áreas de atuação da tomografia são concentradas nas análises mecânicas de peças para a indústria automobilística, aeroespacial, máquinas de grande porte e para outras indústrias [5 – 13].

Atualmente, o interesse pela TCi vem crescendo, principalmente pelas indústrias químicas e petroquímicas, tendo em vista a capacidade de contribuir para melhorar o desenho dos componentes de produção, como as colunas de destilação; e para melhorar a eficiência da produção, identificando e diagnosticando falhas nos processos de produção. Além de sua contribuição na etapa de desenho e projeto, a TCi é capaz de fornecer importantes informações sobre o controle de qualidade dos componentes de produção ao longo do tempo sem a necessidade de interromper a produção industrial [14 – 27].

Assim, uma nova perspectiva da TCi surge no campo dos processos denominados multifásicos. Os sistemas multifásicos são estruturas, equipamentos (reatores) ou tubulações, nos quais várias fases, a saber, misturas de líquidos, sólidos ou gases estão em contato íntimo, com a finalidade de transportar ou obter as máximas condições de transferência de massa, calor ou momento dentro de uma linha de produção de uma indústria. Além destas propriedades, esses processos industriais visam à obtenção de alto rendimento de produção e com a preocupação de minimizar o impacto ambiental. Adicionalmente, sistemas de destilação industrial envolvem processos dinâmicos e as mudanças dos transientes ocorrem muito rapidamente, requerendo que sejam detectados instantaneamente. Em geral, os elementos industriais são construídos de metais e possuem diâmetros largos com espessuras grossas que dificultam a sua análise com feixes de raios-X convencionais (raios X produzidos por ampolas com diferencial de potencial da ordem de 70 a 250 KV), tornando as fontes radioativas gama preferíveis aos raios X [18] [21] [28].

Ao contrário do aspecto padronizado na aplicação médica, os objetos a serem tomografados na indústria possuem entre si muitas diferenças geométricas, densidades, massas e a localização dos objetos industriais e com isso requerem o desenvolvimento de equipamentos diferenciados, inibindo a sua fabricação em escala. Em outros termos, na indústria torna-se imperativo desenvolver um sistema tomográfico adequado para cada finalidade. Este fato traz à comunidade científica um aspecto positivo, pois abre espaço para que vários pesquisadores atuem na tecnologia da tomografia e assim contribuindo com o surgimento de novas técnicas e softwares de tratamento de imagens [19] [21].

O princípio da tomografia computadorizada (TC) consiste na análise da atenuação sofrida por um feixe de radiação conhecido através de um objeto. A partir desta atenuação têm-se medidas de densidade de massa e coeficiente de atenuação da radiação X ou γ através do caminho percorrido pelo feixe. A resposta de vários feixes com orientações diferentes, angulares e espaciais em relação ao volume estudado é que permite a reconstrução da imagem [18] [20] [21].

Os sistemas tomográficos computadorizados baseados na transmissão utilizam conjuntos de fontes radioativas encapsuladas e detectores de radiação, colocados nos lados opostos do objeto a ser estudado. Os sistemas tomográficos denominados de primeira geração consistem de uma fonte colimada que emite um feixe pontual de radiação e um detector que fica posicionado no lado oposto ao objeto a ser tomografado (Figura 1), medindo a atenuação da radiação em cada posição.

Figura 1 - Esquema do tomógrafo de primeira geração

Nos laboratórios do CTR do IPEN-CNEN/SP foi desenvolvido, inicialmente, um tomógrafo industrial de primeira geração, constituído por um detector de 2 x 2 polegadas de NaI(Tl) colimado com chumbo e uma fonte radioativa. Os sistemas eletrônicos de aquisição de dados usados eram de procedência comercial, detector de NaI(Tl) (mod. 40-10 da Lundlum®), o módulo de amplificador, fonte de alta tensão e monocanal (mod. M 4612 da Lundlum®). A interface para controle mecânico e o software para controlar estes sistemas foi especialmente desenvolvido nos laboratórios do CTR/IPEN [21]. O desenvolvimento e estudos realizados com o tomógrafo da primeira geração contribuíram com valiosa experiência para projetar e desenvolver outros sistemas de tomografia computadorizada industrial [19].

No sistema tomográfico computadorizado de segunda geração, um conjunto de detectores é posicionado paralelamente a um conjunto de fontes radioativas que emitem feixes paralelos, e se movimentam (fontes e detectores) ao redor do objeto estudado, aumentando o número de projeções (Figura 2). Dessa forma, o tempo de aquisição de dados é mais rápido do que o de aquisição do tomógrafo de 1º geração.

Figura 2 - Esquema do tomógrafo de segunda geração

No tomógrafo computadorizado de terceira geração, a fonte utilizada é colimada de modo que o caminho percorrido pelos feixes seja semelhante a um leque (Figura 3). O sistema movimenta-se ao redor do objeto estudado obtendo-se uma vista particular para uma posição “X” do conjunto fonte-detectores, o número de posições pode variar com o tipo de colimador e o número de detectores de

radiação. Neste tipo de sistema podem ser utilizados vários arranjos de detectores. Este tipo de tomógrafo é o utilizado no presente trabalho.

Figura 3 - Esquema do tomógrafo de terceira geração

Um tomógrafo computadorizado industrial de terceira geração (TCi-3ªG) foi desenvolvido recentemente nos laboratórios do CTR do IPEN/CNEN-SP. É constituído de sete detectores de NaI(Tl) com $\varnothing 2 \times 2$ polegadas, colimados com janelas de chumbo e foram dispostos em arco, conforme a Figura 3. A eletrônica de aquisição de dados, para cada detector, utiliza um sistema multicanal desenvolvido no CTR-IPEN, que apresenta a vantagem de discriminar os sinais produzidos pelos diferentes níveis de energias provenientes das fontes radioativas. Na literatura este tipo de tomógrafo, normalmente, utiliza detectores de radiação gama ligados a unidades monocanais [18] [21] [28]. Para o aprimoramento dos tomógrafos de 3º e 4º gerações novos sistemas de *hardware* e *software* estão sendo desenvolvidos nos laboratórios do CTR.

O sistema denominado de quarta geração utiliza um arranjo composto de múltiplos detectores fixos (grande número de detectores montados em um anel fixo em torno do objeto) e varias fontes radioativas fixas ao redor do objeto (Figura 4). Neste modelo de tomógrafo, tanto o objeto a ser tomografado como o conjunto detectores-fontes radioativas não precisam sofrer movimentos, isto é, permanecem estáticos. Assim, o tempo de aquisição de dados é mais rápido em relação às outras três gerações anteriores.

Figura 4 - Esquema do tomógrafo de quarta geração

Por definição, um sistema de tomografia multifásico envolve objetos que contêm materiais com uma grande variedade de diferentes densidades (misturas de sólidos, líquidos e gases). A radiação de baixa energia é mais sensível para trabalhar com materiais de baixa densidade, como gases. A radiação com energia intermediária será mais eficiente para avaliar materiais, como a água, óleos e outros líquidos, com densidade de aproximadamente 1 g/cm^3 , enquanto que a radiação de alta energia é mais apropriada para avaliar materiais de alta densidade. Por esta razão, as fontes gama, no intervalo de energia de 300 a 1500 keV são preferíveis aos feixes de raios-X convencionais. Para os objetos que contêm materiais de densidades muito diferenciadas, a medição tomográfica deve ser realizada com raios gama com energias diferentes. Neste caso, recomenda-se que o sistema de aquisição de dados de TCi tenha a capacidade de discriminar diferentes níveis de energia. Comumente, o arranjo com fontes de ^{75}Se (265 keV e 279 keV), ^{192}Ir (~ 317 keV) e ^{192}Ir (468 keV), ^{137}Cs (662 keV) e ^{60}Co (1173 e 1332 keV) atendem a essa necessidade.

Alguns laboratórios utilizam duas fontes radioativas, com dois conjuntos de contadores e detectores, defasados em 90 graus, como mostrado na (Figura 5) [21] [28]. Esta opção tem o inconveniente de necessitar o dobro de detectores e

contadores monocanais. Alternativamente, os contadores multicanais rápidos podem ser usados e assim permitir a redução do número de: (a) fontes blindadas, detectores e (b) contadores a serem utilizados. Esta última opção satisfaz com eficiência as necessidades do TCi para sistemas multifásico.

Figura 5 - Fotografia do TCi-3ªG com sistema monocanal, da Washington University in St. Louis, utilizado pelo Dr. Pablo A. V. Salvador em sua tese de doutorado [21]

No presente trabalho, estudou-se o desempenho do TCi de 3ª geração desenvolvido no IPEN/CNEN-SP (Figura 6) utilizando : (a) duas fontes radioativas seladas de energias diferentes, contendo ^{75}Se (265 keV e 279 keV) e ^{137}Cs (662 KeV), colocadas juntas numa única proteção de chumbo, (b) detectores de radiação colimados com três diferentes geometrias de aberturas de colimação (usados separadamente nas medidas tomográficas) e (c) um sistema de aquisição de dados econômico e rápido baseado em analisadores multicanais, desenvolvidos no IPEN/CNEN-SP.

Figura 6 - Fotografia do TCi-3ªG utilizado neste trabalho

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram:

- Avaliar o desempenho do tomógrafo computadorizado industrial de terceira geração (TCi-3^aG) utilizando sistema de aquisição de dados tipo multicanal e diferentes energias de radiação.
- Avaliar os efeitos da geometria dos colimadores na qualidade da imagem reconstruída.

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1. Tipos de radiações

O espectro eletromagnético dos fótons cobre ampla faixa de comprimento de onda, indo desde as ondas de rádio até os raios gama (Figura 7).

Figura 7 - Espectro eletromagnético [29].

Os principais tipos de radiação utilizados em física nuclear e suas tecnologias são: radiações eletromagnéticas do tipo gama (γ) e raios X; de partículas como a radiação alfa (α), beta (β), nêutrons (n) e dos feixes de partículas aceleradas (elétrons, prótons, deutérios, produtos de fissão, entre outros) [30] [31].

A radiação nuclear é um tipo de radiação que é originada no núcleo de determinados átomos instáveis. Alguns núcleos são instáveis na sua composição de núclídeos e podem decair para configurações mais estáveis. Os núcleos atômicos possuem níveis de energia discretos, análogos aos níveis dos orbitais eletrônicos. A transição entre estados de energia de um mesmo núcleo é acompanhada da emissão de fóton [32].

3.2. Radiação Gama

A radiação gama é uma radiação eletromagnética produzida nos núcleos de elementos radioativos e processos subatômicos que ocorre com a aniquilação de um par pósitron-elétron.

Dependendo da proporção de nêutrons e prótons no núcleo atômico, um isótopo de um elemento em particular pode ser estável ou instável. Quando a energia de ligação não é forte o suficiente para manter o núcleo de um átomo em equilíbrio, o átomo é dito ser instável. Os átomos com núcleos instáveis estão em constante mudança como resultado do desequilíbrio de energia no interior do núcleo. Ao longo do tempo, os núcleos de isótopos instáveis desintegram espontaneamente, num processo conhecido como decaimento radioativo [33].

Considerando um núcleo no estado excitado, sendo E a energia do núcleo no estado excitado, E_0 a energia do seu estado fundamental, a energia de excitação E_{exc} é definida pela Equação 1:

$$E_{exc} = E - E_0 \quad (1)$$

Deste modo, o núcleo alcança o seu estado fundamental emitindo a radiação γ com a energia E_{exc} . [30]

3.3. Interação da radiação gama com a matéria

Na faixa de energias que inclui os raios X e gama (γ), há várias interações possíveis com a eletrosfera e o próprio núcleo atômico. No entanto, também existe a possibilidade de não interação, e assim radiação eletromagnética pode atravessar o meio sem sofrer modificação e sem causar modificação no material do meio [34].

As principais interações que ocorrem na matéria com fótons de energias no intervalo de keV até dezenas de MeV são o “efeito fotoelétrico”, “efeito Compton” e a “produção de pares” (Tabela 1). A predominância de um efeito sobre o outro, depende da energia do fóton e do número atômico dos elementos químicos que constituem as moléculas do material. [30] [34].

O princípio básico dos métodos de detecção é o de fazer com que a radiação em estudo interaja de alguma forma com um material conhecido (plástico, água, gás, metais entre outros) e, a partir desses resultados da interação, obter informação sobre a própria natureza da radiação [30].

Dentre as várias formas dos raios gama interagirem na matéria, apenas cinco delas tem relevância em espectroscopia de raios gama, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Interações possíveis da radiação eletromagnética ionizante - raio-X, raio gama, fóton de aniquilação - com a materia [35]

	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente	Radiação ionizante produzida
Espalhamento Coerente (espalhamento de radiação pelo átomo)		Direção de propagação	REM espalhada de mesma energia.
Fotoelétrico (ejeção de elétron ligado)	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo.	Fóton é absorvido	Elétron rápido, raios X característicos, elétrons Auger
Compton (espalhamento do fóton por um elétron)	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo	Fóton perde energia e muda de direção	Elétron rápido, fóton com menor energia, espalhado.
Produção de Par (energia do fóton é consumida na criação do par (e^- e^+))	Recuo do núcleo; aniquilação do pósitron.	Fóton é absorvido	Elétron e pósitron rápidos, raios X de aniquilação.
Reação Fotonuclear (ejeção de nucleon ligado)	Núcleo modificado (Z ou A) e excitado	Fóton é absorvido	Partículas subnucleares, em geral nêutrons.

Este resultado mostra que um feixe homogêneo de raios γ , ao passar pelo material absorvedor, tem sua intensidade reduzida exponencialmente conforme, Equação 2.

$$I = I_0 e^{-\mu\rho x} \quad (2)$$

Sendo $\mu(\text{g}/\text{cm}^2)$ o coeficiente de absorção de massa, $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ a densidade do material atenuante e $x(\text{cm})$ a espessura do material absorvedor.

3.4. Efeito fotoelétrico

A predominância da ocorrência do efeito fotoelétrico depende da energia do fóton e do material absorvente. Assim, para a água o efeito fotoelétrico é predominante até aproximadamente 25 keV enquanto para o detector NaI(Tl) a predominância é até aproximadamente 300 keV. No efeito fotoelétrico o fóton incidente é absorvido por um elétron do átomo que, é ejetado com uma energia cinética E_c dada pela Equação 3:

$$E_c = h\nu - \tau \quad (3)$$

Onde ν é a frequência da onda do fóton incidente e τ , a função trabalho do material. A equação exprime a lei de conservação de energia, sendo que parte da energia total do fóton ($h\nu$) é transformada em energia cinética do elétron ejetado e o restante é gasto para romper a ligação do elétron do seu orbital (Figura 8) [30] [34].

Figura 8 - Ilustração do efeito fotoelétrico [36]

3.5. Efeito Compton

O efeito Compton ocorre quando um fóton incidente interage com um elétron que está fracamente ligado ou livre. Este elétron é ejetado do átomo pelo fóton, que perde parte da sua energia liberando um fóton secundário; podendo ser considerado como uma colisão entre um fóton incidente e um elétron da eletrosfera, (Figura 9) [31]. O fóton, sendo uma radiação eletromagnética, ao incidir sobre um elétron de um átomo, se comporta como se fosse uma partícula, tudo se passa como se fosse uma colisão elástica entre o fóton e o elétron, com conservação de energia e *momentum*. A energia $h\nu_0$ do fóton, após o espalhamento, é determinada pela Equação (4).

$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \alpha (1 - \cos \phi)} \quad (4)$$

sendo $\alpha = h\nu_0 / m_e c^2$, ν_0 é a frequência de onda do fóton antes do espalhamento e ϕ , o ângulo de espalhamento. [30]

Figura 9 - Ilustração do efeito Compton [36]

A probabilidade de ocorrência do efeito Compton está relacionada com a quantidade de elétrons disponíveis como alvos de espalhamento, logo, esta probabilidade aumenta linearmente com o aumento do número atômico do material absorvedor [37].

3.6. Produção de pares

Se a energia do fóton excede duas vezes a energia relativa da massa de repouso de um elétron (1,02 MeV), o processo de produção de pares é energeticamente possível. A interação acontece no campo *colombiano* do núcleo, onde o fóton gama é absorvido pelo núcleo atômico e logo em seguida o núcleo ejeta um par elétron-pósitron, (Figura 10) [34] [30] [31].

Como o pósitron rapidamente se aniquila com um elétron do meio (elétron livre), esta aniquilação dá origem a dois fótons gama de 511 keV que são emitidos diametralmente opostos um do outro [31] [37].

Figura 10 - Ilustração do efeito produção de pares [36]

Figura 11 - Coeficiente de absorção de massa para raios γ no Pb e H₂O, correspondentes a processos fotoelétrico (linha fina cheia) Compton (linha trasejada) e contribuição total (linha cheia grossa [38].

3.7. Detectores de radiação

Detector de radiação é um equipamento que tem sensibilidade para detectar a presença de radiação, e quantificá-la. Um detector de radiação é capaz de criar um sinal eléctrico resultante da interação da radiação com o material do detector. A detecção pode ser efetuada por meio do registro da carga eletrônica provenientes da ionização de um gás ou de semicondutor e alternativamente pela excitação de elétrons com posterior emissão de luz em um cintilador. Outros tipos de radiações, por exemplo radiação alfa e beta também são capazes de ionizar e excitar as camadas eletrônicas e serem detectadas do mesmo modo. Entretanto estas radiações não apresentam interesse prático na tomografia [39] [40].

3.8. Tipos de detectores de radiação

A região do detector onde ocorre a detecção é conhecida como volume sensível do detector. O sinal produzido nesse volume pode ser relacionado com a radiação de várias formas:

- O sinal traz informação da presença de radiação (contador);
- O sinal fornece a informação quantitativa (contagens/s) e qualitativa (espectrometria);
- Os detectores de radiação podem ser classificados quanto à velocidade de processamento de resposta, ou seja, se o detector irá fornecer a resposta durante a exposição da irradiação, ou a resposta só será obtida posteriormente, após processamento de leitura, p.ex. nos dosímetros tipo filme ou dosímetros termoluminescentes [31] [39] [37].

3.9. Detector cintilador

Os detectores cintiladores de radiação são constituídos de, um cristal cintilador acoplado a um fotosensor.

Em meados de 1950, com o advento dos detectores contendo cristal de iodeto de sódio ativado com tálio [NaI(Tl)], como elemento sensível às radiações, a instrumentação nuclear sofreu um impulso considerável. Além de ser muito mais sensíveis do que os detectores Geiger-Müller, possuem ainda a notável característica de diferenciar fótons com energias diferentes [41].

A característica do cristal cintilador é possuir alto rendimento quântico de excitação de suas camadas eletrônicas com a incidência de radiação e assim, produzir fótons de luz. Um dos materiais, mais utilizado como cintilador é o cristal de NaI(Tl).

Os cintiladores medem a intensidade de luz emitida por átomos que estão no volume sensível quando excitados pela passagem da radiação [37].

As propriedades requeridas para apresentar alta eficiência no detector cintilador é possuir número atômico alto, densidade alta para que a interação da radiação seja a mais completa possível e ser transparente à própria luz produzida para não ocorrer o efeito da auto absorção (*quenching*). A Tabela 2 mostra alguns dos principais cintiladores utilizados atualmente [42].

Tabela 2 - Principais cintiladores e suas características

Cristal cintilador	Número atômico médio	Densidade (g/cm ³)	Tempo decaimento (ns)	Comprimento de onda (nm)	Conversão de luz relativa % NaI(Tl)
NaI(Tl)	50	3,6	200	415	100
CsI(Tl)	54	4,5	1000	550	45
CsI(Na)	54	4,5	630	420	85
LaBr ₃ :Ce	47	5,3	25	360	160

A fotomultiplicadora é um dispositivo eletrônico conversor de luz → elétrons, isto é, converte a luz (fótons) produzida nos cintiladores em elétrons e

assim gera uma corrente que é medida por processos convencionais da eletrônica. Na fotomultiplicadora a corrente gerada possui uma relação linear com a quantidade de fótons produzidos no cintilador e que também é proporcional à radiação que incide no detector cintilador (Figura 12) [32].

O principal funcionamento da fotomultiplicadora baseia-se na iluminação do fotocatodo com luz produzida no detector cintilador. No fotocatodo ocorre a emissão de elétrons pelo efeito fotoelétrico, em número proporcional a intensidade luminosa. Os elétrons são focalizados e acelerados para o primeiro estágio amplificador (primeiro dinodo), onde ocorre a emissão secundária de elétrons, esse processo ocorre em vários estágios, até que o fluxo de elétrons sejam coletados no anodo. A corrente gerada no anodo é proporcional ao número de fótons gerados no cintilador, conforme Figura 13 [39] [37] [40].

Figura 12 - Diagrama do funcionamento de um detector cintilador

Figura 13 - Imagem ilustrada do funcionamento de uma fotomultiplicadora

3.10. Espectrometria gama

O estudo e análise quantitativa de espectros de raios gama, para uso científico e técnico, é chamado de espectroscopia gama. Os espectrômetros de

raios gama são os instrumentos utilizados para esta finalidade [43]. A Espectrometria gama é uma técnica instrumental para analisar a distribuição da intensidade de radiação gama em relação à energia de cada fóton. A técnica permite utilizar detectores de radiação do tipo semicondutores, cintiladores e câmaras proporcionais. O tipo de detector depende da finalidade que essa técnica vai ser empregada [44].

3.11. Resolução energética

A resolução energética é definida em termos da largura e da meia altura do pico de energia (FWHM - full width at half maximum).

A largura à meia altura FWHM é um parâmetro que expressa a imprecisão da determinação da energia do fóton (Figura XX). Por meio do parâmetro FWHM define-se a resolução de um sistema detector segundo a Equação 5.

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (5)$$

FWHM = largura à meia altura do pico de energia completo

H_0 = altura de pulso médio correspondente à mesmo pico.

A resolução em energia é a capacidade de o detector distinguir dois valores de energias próximas [37].

Figura 14 - Imagem da curva para calcular o FWHM

3.12. Considerações teóricas aplicadas à tomografia.

3.12.1. Resolução espacial

A resolução espacial é a distância mínima na qual dois objetos de mesma dimensão de alto contraste podem ser distinguidos pelo TCI que se define matematicamente pela Equação 6.

$$d_{esp} = \frac{1}{M} \sqrt{d_{LC}^2 + (M - 1)^2 s^2} \quad (6)$$

sendo: d_{esp} a resolução espacial, d_a é a largura de colimação do detector, s é a largura da fonte e M é um fator de ampliação (razão entre a largura de colimação da fonte e a largura de colimação do detector). Quando $M=1$ implica que a resolução espacial é a mesma que a largura da colimação do detector, isto é, $d_{esp} = d_{LC}$ [21].

3.12.2. Resolução temporal

A resolução temporal é o tempo necessário para que o sistema possa produzir uma nova imagem. Os dados da tomografia gama para estimar as

concentrações das fases geralmente são valores médios, pois é requerido um tempo relativamente longo para que os contadores de radiação acumulem e registrem a taxa de contagem em todas as projeções de varredura. Dependendo do desenho do equipamento, esse período de tempo pode levar alguns segundos e até algumas horas. Esta limitação é crítica nos estudos que envolvem fenômenos dinâmicos rápidos comparativamente aos tempos de aquisição de dados. No entanto, é possível obter informações dinâmicas fazendo-se uso de tomógrafos com baixa velocidade de aquisição de dados, por exemplo, com tomógrafos de 3ª geração. Neste caso os resultados sempre expressarão a tendência média das variações dinâmicas [21] [25] [47] [49]. Contudo, em sistemas estáticos esse problema não aparece, pois, por exemplo, no caso do fantom utilizado neste trabalho por ser um material sólido, não ocorre movimento no seu interior durante as medidas tomográficas, diferentemente do que acontece dentro das colunas de processos industriais onde o material (líquido ou gases), está em constante movimento durante as medidas tomográficas.

3.12.3. Resolução de densidade

A resolução de densidade relaciona-se com a capacidade do sistema em diferenciar pequenas variações entre os coeficientes de atenuação de massa, Equação 7.

$$\frac{\sigma_p}{\rho} = \frac{n_p}{2 \mu_w \rho_w d_i \sqrt{n_A N}} \quad (7)$$

sendo σ_p a resolução de densidade, ρ é a densidade do material, n_p é o número de projeções em um determinado ângulo, n_A é o número de ângulos amostrais, N é o número de fótons por feixe, μ_w é o coeficiente de atenuação de massa, d_i é o tamanho do objeto e ρ_w é a densidade da água (usada como padrão) [21].

De acordo com a equação 7, para melhorar a resolução em densidade tem-se as seguintes alternativas: (1) aumentar o número de ângulos amostrais n_A ;

(2) aumentar a atividade da fonte radioativa, N e (3) diminuir o número de ângulos de projeção n_p .

3.12.4. Eficiência de detecção.

A relação entre o número de raios gama detectados (C_T) e o número de raios gama emitidos pela fonte (N) é chamada de eficiência absoluta total (ε_T), definida pela Equação 8:

$$\varepsilon_T = \frac{C_T}{N} \quad (8)$$

A eficiência absoluta total pode variar de acordo com a energia da radiação gama, com as dimensões do detector de radiação e a distância entre a fonte radioativa e o detector. Quando um raio gama atinge o detector, o feixe de radiação pode não ser absorvido pelo detector se suas dimensões forem pequenas. [37] [45].

3.12.5. Atenuação da radiação gama

A radiação gama interage com a matéria por meio dos três efeitos principais: (1) efeito fotoelétrico, (2) efeito Compton, e (3) produção de pares. Todas estas interações dependem da energia do fóton gama incidente e do número atômico do material absorvedor, (Equação 9). A passagem pela matéria de um feixe estreito e bem colimado de fótons de raios gama é regida pela lei da atenuação exponencial, também conhecida como lei de Beer-Lambert [32].

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu(E)x} \quad (9)$$

onde I_0 é a intensidade do feixe da radiação incidente, I é a intensidade do feixe emergente, $\mu(E)$ é o coeficiente linear (cm^{-1}) de atenuação específico para cada material e é também dependente da energia E da fonte radioativa e x é a espessura do objeto absorvedor. Muitas vezes, substitui-se o termo μ por $\mu_m \rho$, onde μ_m é o coeficiente de atenuação mássico (cm^2/g) e ρ é a densidade (g/cm^3) [21].

3.12.6. Colimadores

Colimadores são dispositivos construídos a partir de um material absorvedor de radiação usado para selecionar e suavizar feixes de radiação (Figura 15). A finalidade de selecionar o alvo é garantir que o detector seja sensível somente aos fótons que provem da região em estudos.

No caso dos aparelhos de radioterapia, o colimador tem a finalidade de aplicar uma dose de radiação de acordo com as especificações para o tratamento médico.

Figura 15 – Esquema de colimador de radiação. Em A o alvo (objeto) atingido por fótons não colimados e em B o alvo é atingido por fótons selecionados pelo colimador.

Para que a contagem de um ponto tenha real valor em relação a um ponto vizinho, o detector precisa ser sensível somente aos fótons que provem da região em estudo. Um detector com campo de visão muito restrito poderá registrar com fidelidade pontos muito próximos uns dos outros, dando grande detalhe na figura obtida, constituindo um detector de boa resolução [41] [46].

4. METODOLOGIA

4.1. Tomógrafo Computadorizado Industrial de 3ª geração (TCi-3ªG)

Com o apoio da CNPq (Proc. 505161/2004-4 e Proc. 620201/2009-8) e AIEA (Projeto AIEA BRA 08/31), laboratórios com infraestrutura adequada para desenvolvimento e aplicação de Tomógrafos computadorizadas industriais foram implantadas nos laboratórios do CTR/IPEN.

O desenvolvimento do sistema TCi-3ªG consiste de quatro etapas fundamentais:

- 1) Projeto mecânico (rotacionamento do sistema detector de radiação e fontes radioativas).
- 2) Projeto eletrônico (detectores de radiação e sua eletrônica associada).
- 3) Desenvolvimento de software para o gerenciamento de aquisição de dados.
- 4) Desenvolvimento de software para a reconstrução de imagens.

O presente trabalho concentrou-se nas etapas 2 e 3, ou seja, nos projetos eletrônico e de aquisição de dados. Para o fantom, os seguintes estudos foram realizados: (a) desenvolvimento e confecção da eletrônica associada para aquisição de dados, (b) na confecção e avaliação dos colimadores de diferentes geometrias utilizados nos detectores de radiação e (c) nas medidas tomográficas utilizando os componentes confeccionados nos itens (a) e (b).

4.2. Projeto mecânico

O projeto mecânico foi desenvolvido nos laboratórios do IPEN/CNEN-SP, para rotacionamento do sistema fonte-detectors de radiação com precisão, bem como para elevação do sistema, cujos detalhes encontram-se publicados na literatura [47]. O software para aquisição de dados e integração do sistema mecânico foi desenvolvido por Mesquita e col. [25] [48] [49], nos laboratórios de CTR do IPEN/CNEN-SP.

4.3. Eletrônica associada para aquisição de dados

Foi confeccionado um sistema dividido em duas placas eletrônicas:

- 1) Placa mãe (Figuras 17, 18) que controla até doze (12) placas de aquisição de dados tipo multicanal (Figuras 19, 20).
- 2) Placa de aquisição de dados contendo módulos de alta tensão, amplificador, analisador multicanal, conversor de sinal analógico para digital e microcontrolador.

Deve ser ressaltado que o sistema foi projetado por C. H. Mesquita [50], no Laboratório do CTR / IPEN. Na Figura 16 é mostrado o sistema contendo os módulos de multicanal montados para utilização no TCi-3^aG.

Figura 16 – Fotografia do módulo multicanal

A placa mãe ou placa principal de controle é a placa que irá controlar os detectores e se comunicar com o computador que contém o software de aquisição

de dados do sistema tomográfico. A eletrônica foi confeccionada utilizando microcontrolador da serie 8051.

Na placa de aquisição de dados, o sinal proveniente do detector de radiação, em formato analógico, é amplificado e convertido em sinal digital para possibilitar o microcontrolador 8051 enviar os sinais para placa mãe e a partir do sinal digital selecionar as regiões espectrais de interesse. O microprocessador 8051 da placa mãe se comunica com o 8051 das placas de aquisição de dados (multicanais), para reconhecer o detector que deve ser acionado para enviar o sinal, sem ter conflito na comunicação com os sinais oriundos dos outros multicanais. Esse processo leva menos de um segundo para ser executado conforme esquema mostrado na Figura 20 [49] [51] [52].

Figura 17 - Diagrama de blocos do funcionamento da placa mãe

Figura 18 - Fotografia da placa mãe

Figura 19 - Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados

Figura 20 - Fotografia da placa de aquisição de dados

Figura 21 - (a) Sinal de entrada após a última etapa de amplificação; (b) Sinal de amostragem; (c) Sinal digitalizado; (d) Sinal que informa o fim do processo de conversão.

O mesmo microcontrolador da placa mãe faz a comunicação com outros três módulos de motores de passo para poder efetuar o rotacionamento e deslocamento do TCi com a precisão e tempo correto para que sempre haja uma repetitividade do processo [25] [49].

O desenvolvimento da eletrônica associada foi fundamental para o construção do TCi-3ªG, pois os sistemas disponíveis no mercado utilizam contadores de pulsos tipo monocal. Este tipo de sistema não é adequado para a aplicação proposta, pois o monocal identifica uma única faixa espectral. O

multicanal desenvolvido no laboratório do CTR / IPEN com 256 canais apresentou um bom desempenho para a aplicação neste projeto.

Espectros de energia foram determinados utilizando fontes de calibração de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir com os detectores de radiação acoplados a eletrônica associada e multicanais desenvolvidos para este projeto.

4.4. Detectores de Radiação

Neste trabalho utilizou-se cinco detectores de NaI(Tl) acoplado à fotomultiplicadora (mod. 40-10 da Lundlum®), conforme mostrado na Figura 22. O TCI-3^aG desenvolvido no IPEN tem capacidade para um arranjo de sete detectores de NaI(Tl) de 2 polegadas de diâmetro. Um arranjo com maior número de detectores pode ser utilizado fazendo-se uso de detectores de menor diâmetro.

Figura 22 - Fotografia do detector Lundlum modelo 40-10

Com o intuito de proteger o cristal do detector contra a radiação ambiente, bem como dos fótons provenientes da incidência lateral no detector, utilizou-se uma blindagem de chumbo envolvendo o detector [41].

A Figura 23 ilustra uma blindagem de chumbo (Pb) de um detector de radiação típica utilizado no trabalho e os três colimadores de Pb estudados. A blindagem foi projetada para que o colimador seja facilmente encaixado e substituído.

Figura 23 - Fotografia da blindagem de Pb do detector de radiação e os colimadores utilizados neste trabalho

4.5. Colimadores

Os detectores de NaI(Tl) utilizados para constituir o sistema detector do TCI-3^aG foram blindados com colimadores de chumbo com janelas de 2 mm x 5 mm x 50 mm (Figura 24) e 4 mm x 10 mm x 50 mm (Figura 25) de largura x comprimento x profundidade. Foi também confeccionado um colimador com orifício circular de 5 mm de diâmetro por 40 mm de profundidade (Figura 26). Estes colimadores foram projetados para poderem ser facilmente substituídos no sistema de blindagem.

A área do orifício que os fótons de radiação gama atravessam varia entre os colimadores devido à geometria de cada um. Para o colimador de 2 mm x 5 mm x 50 mm a área do orifício é de 10 mm², para o colimador de 4 mm x 10 mm x 50 mm a área é de 40 mm² e para o colimador de 5 mm x 40 mm a área é de 19,6349 mm².

Todo o arranjo detectores e fonte de radiação foram montados em um suporte adequado para girar em torno do eixo central do tomógrafo onde se localiza o fantom a ser tomografado. Nas Figuras 24, 25 e 26 são mostradas as imagens dos três tipos de colimadores dos detectores de radiação.

Figura 24 - Colimador de chumbo com abertura de janela retangular de 2 mm x 5 mm x 50 mm

Figura 25 - Colimador de chumbo com abertura de janela retangular de 4 mm x 10 mm x 50 mm

Figura 26 - Colimador de chumbo com abertura de circular de 5 mm de diâmetro e 40 mm de profundidade

4.6. Fontes Radioativas

Neste trabalho foram utilizadas três fontes de radiação gama de diferentes energias, cujas características são sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das fontes de radiação gama utilizadas neste trabalho

Fonte Radioativa	Fotopicos (keV)	Meia Vida	Atividade (Bq)
$^{75}\text{Se}^1$	97, 121, 136, 265, 279 e 400	119,8 dias	$5,18 \times 10^{10}$ (1,4 Ci)
$^{137}\text{Cs}^2$	662	30,1 anos	$3,70 \times 10^9$ (0,1 Ci)
$^{192}\text{Ir}^1$	308, 317, 468, 604 e 612	73,8 dias	$1,01 \times 10^{11}$ (2,75 Ci)

1 – Produzidas no IPEN/CNEN-SP

2 – Eckert & Ziegler Co.

Inicialmente foram utilizadas fontes de ^{192}Ir , que apesar de ter meia vida curta (73,8 dias) e necessitarem substituições com maior frequência, havia a facilidade de reposição por serem produzidas no IPEN. No entanto, mais recentemente, o IPEN iniciou o fornecimento das fontes de ^{75}Se . Assim, optou-se por substituir o ^{192}Ir pelo ^{75}Se que possui fotopicos próximos ao do ^{192}Ir e apresenta a vantagem de ter meia vida mais longa (119,8 dias) comparado ao ^{192}Ir .

4.7. Sistema de Aquisição de Dados

Foi desenvolvido um software para a aquisição de dados o qual é capaz de controlar até sete detectores¹ e os três motores do TCi. Na Figura 27-A é mostrada a tela principal do programa mostrando os detalhes das possibilidades de seleção dos dados gerais de controle do tomógrafo: detectores que vão ser utilizados; tempo de contagem; abertura da planilha do “Excel®” e o acesso às outras telas do programa. Na tela da Figura 27-B é mostrado os detalhes de calibração dos detectores e permite ao usuário selecionar as faixas de fotopicos de cada radioisótopo. Na tela da Figura 27-C é mostrado as opções para selecionar o colimador e controlar os motores de passo [49] [53].

¹ Na realidade o software pode ser facilmente alterado para gerenciar qualquer outra quantidade de detectores.

Figura 27 - Telas do programa de gerenciamento do tomógrafo. Tela principal (A), escolha de detectores (B) e colimadores do Tci-3ªG (C)

4.8. Fantom Multifásico

Um objeto simulador multifásico (fantom) foi elaborado de modo a conter as duas fases (gás e sólida e opcionalmente líquida e sólida). Este fantom é composto de polimetilmetacrilato (PMMA) sólido com 165 mm de diâmetro, contendo três furos, sendo um preenchido com um tarugo de ferro, outro com alumínio e o terceiro um tubo vazio de vidro, como ilustrado nas Figuras 28 e 29. A Tabela 4 sumariza os valores das densidades de todos os materiais que constituem o fantom.

Figura 28 - Fotografia do fantom multifásico utilizado neste trabalho

Figura 29 - Desenho técnico do fantom multifásico

O fantom foi posicionado no centro do arranjo fonte-detector para as realizações das medidas tomográficas. O sistema tomográfico faz uma varredura de 360° ao redor do fantom para ter dados para reconstrução da imagem de vários pontos axiais.

Tabela 4 - Densidade dos materiais do fantom

Material	Densidade g/cm ³
Ar	0,00
PMMA	1,18
Alumínio	2,75
Aço	7,78

4.9. Coluna de Bolhas

Uma coluna de bolhas (Armifield Limited[®] mod. UOP7), foi utilizada para simular um processo multifásico contendo água e ar. A coluna consiste de um tubo cilíndrico de acrílico (PMMA) com 1400 mm de altura e diâmetro externo de 90 mm e o interno de 80 mm. O equipamento é constituído de seguintes partes: circuito de líquido e circuito de gases e elementos de medidas e análises.

Para a simulação da coluna de bolhas, a coluna foi preenchida com água à uma altura de 1000 mm a partir do centro gerador de bolha. O centro gerador de bolhas é um disco de alumínio com um orifício de 5 mm de diâmetro em uma das extremidades mostrado na Figura 30, o qual é colocado na base da coluna.

Figura 30 - Fotografia do disco gerador de bolhas

A coluna preparada para simular a coluna de bolhas, foi posicionada no centro da mesa do sistema mecânico do tomógrafo, sendo circundado pelo conjunto de detectores colimados e a fonte radioativa. A Figura 31 ilustra a coluna geradora de bolhas em funcionamento.

Figura 31 - Fotografia da coluna simuladora de bolhas em funcionamento

4.10. Medidas Tomográficas

As medidas tomográficas foram realizadas no TCI-3^aG desenvolvido (Figura 32), utilizando cinco detectores de NaI(Tl) colimados com um dos três colimadores descritos no item 4.5, os quais são facilmente substituídos após cada medida tomográfica. Os cinco detectores foram posicionados em um arranjo em arco, mantidos na mesma distância das fontes de radiação (^{75}Se e ^{137}Cs) ou [^{192}Ir e ^{137}Cs] armazenadas numa única blindagem de chumbo.

Figura 32 - Fotografia do TCI-3^aG do CTR - IPEN/CNEN-SP que foi utilizado neste trabalho

Todas as medidas com fantom e coluna de bolhas foram realizadas no TCI-3^aG, efetuando um giro de 360°, em passos de 6°, gerando 60 pontos de vista. O movimento dos detectores colimados foi gerado por outro motor de passo, pois o passo para cada colimador é diferente conforme a geometria do orifício por onde passa a radiação. Para orifícios retangulares (fendas) de 2 mm x 5 mm no colimador, o conjunto gerou 47 projeções por detector ou 235 (47 x 5) com os cinco detectores utilizados, totalizando 14100 (235 x 60) projeções por imagem. Para furos retangulares de 4 mm x 10 mm no colimador, o conjunto gerou 23 projeções por detector ou 115 (23 x 5) com os cinco detectores utilizados, totalizando 6900 (115 x 60) projeções por imagem. Para o colimador de 5 mm de diâmetro o conjunto gerou 18 projeções por detector ou 90 (18 x 5) com os cinco detectores utilizados, totalizando 5400 (90 x 60) projeções por imagem.

4.11. Algoritmo de Reconstrução de Imagens

O programa de reconstrução de imagem foi desenvolvido utilizando o algoritmo SMART (*Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique with Correction*) e implementado em compilador de linguagem C. Este programa foi desenvolvido por Oliveira e col. [54] [55], inserido em projeto de parceria do IPEN com a Universidade Federal de Pernambuco.

Na Figura 32 é mostrada a tela de comando do programa de reconstrução de imagem, onde são inseridos os dados e o algoritmo escolhido para a reconstrução de imagens.

Figura 33 - Fotografia da tela do programa de reconstrução de imagens

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Espectros de Energia e Resolução

Nas Figuras 34, 35 e 36 são mostradas os espectros de energia de ^{75}Se (97 keV, 121 keV, 136 keV, 265 keV, 279 keV e 400 keV), ^{142}Ir (317 keV, 468 keV e 602¹ keV) e ^{137}Cs (662 keV), respectivamente, utilizando o multicanal desenvolvido. Pode-se observar que os espectros apresentam valores de largura à meia altura (FWHM) e resolução (Tabela 5) comparáveis com valores descritos na literatura [56].

Tabela 5 - FWHM e resolução

Energia	FWHM (canais)	FWHM (keV)	Resolução
97 keV ~ 136 keV	32	96 keV	64,0 %
265 keV ~ 279 keV	19	57 keV	24,4 %
308 keV ~ 317 keV	10	30 keV	10,9 %
400 keV	29	87 keV	18,4 %
468 keV	10	30 keV	7,8 %
602 keV	16	48 keV	7,8 %
662 keV	11	33 keV	6,5 %

¹ Na região próxima de 600 keV o ^{192}Ir emite três fótons gama, a saber: 588 (4,6%); 604 (8,2%) e 612 (5,3%) e devido a resolução do detector de NaI(Tl) estes três fótons aparecem no espectro indicando uma única energia aproximada (média ponderada) de 602 keV.

Figura 34 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ^{75}Se (97~136 keV, 265~279 keV e 400 keV)

Figura 35 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ^{137}Cs (662 keV)

Figura 36 - Espectros de energia da radiação gama das fontes de ^{192}Ir (317 keV, 468 keV e 602 keV)

A fim de que um sistema de detecção possa ser usado em espectrometria de energia é fundamental que a sua resposta seja linear em relação ao número de canais. A Figura 37 apresenta a correlação linear entre as energias das fontes utilizadas com o número de canais. Uma boa correlação ($R^2 = 0.9728$) foi encontrada para a linearidade de respostas do sistema multicanal utilizado. Para os fotopicos de energias 265 e 279 keV referente ao ^{75}Se foi utilizada a média matemática (273 keV) dos dois picos de energia que este elemento possui, pois devido a resolução do detector de NaI(Tl) não é possível distinguir os dois fotopicos distintamente. Esses resultados demonstram que a eletrônica associada com multicanal de 256 canais apresentou um bom desempenho e adequada para aplicação nas medidas tomográficas.

Figura 37 - Gráfico de linearidade das energias das fontes de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir

5.2. Colimadores

Na escolha do material a ser utilizado na confecção dos colimadores foram avaliados os seguintes parâmetros: densidade, temperatura de fusão e dureza dos materiais. Nas Figuras 38, 39 e 40 são apresentadas as densidades, temperatura de fusão e durezas de prováveis materiais para a fabricação de colimadores. Avaliando-se os três parâmetros pode-se sugerir que os materiais que apresentaram características mais adequadas para uso com colimador são o chumbo (Pb), tungstênio (W) e ósmio (Os). Dentre estes materiais, o Pb foi selecionado para este trabalho por apresentar uma boa barreira para radiação gama, ponto de fusão de 600,61 K (327,46° C) (Figura 38) que permite ser moldado na forma desejada, possuir densidade relativamente alta de 11,34 g/cm³ (Figura 39) e dureza de 1,5 Mohs (Figura 40) [57]. Além disso, pode ser facilmente encontrado no mercado nacional e custo baixo comparado ao W e Os.

Figura 38 - Temperatura de fusão de prováveis materiais utilizados para moldagem de colimadores

Figura 39 - Densidades dos prováveis materiais para os colimadores

Figura 40 - Dureza dos prováveis materiais para os colimadores

Inicialmente, medidas espectrométricas foram efetuadas utilizando-se os cinco detectores de NaI(Tl) colimados e as fontes de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir individualmente. Em seguida, para averiguar a resposta à radiação, foram avaliadas a FWHM, a resolução energética e a eficiência, para cada um dos colimadores, mantendo as mesmas condições de medidas, ou seja, (i) tempo de contagem, (ii) distância fonte-detector, (iii) eletrônica associada com os analisadores multicanais de 256 canais constituintes do TCI-3^aG [25] [49].

Para calcular os valores teóricos em relação à quantidade de fótons de radiação gama que passam pelo orifício do colimador e vazam pela blindagem do colimador foram utilizadas as equações de Beer-Lambert (Equação 10); de geometria para calcular a atividade, (Equações 11 e 12) e uma pequena modificação na equação de Beer-Lambert (Equação 13) para poder calcular a quantidade de fótons de radiação gama que passa pela blindagem do colimador, Equação 13 [34].

$$I = I_0 \cdot e^{\mu \cdot d \cdot \rho} \quad (10)$$

$$A_{col} = \frac{A_{I_0} \cdot Det}{4 \pi d^2} \quad (11)$$

$$A_{furo} = \frac{A_{I_0} \cdot F}{4 \pi d^2} \quad (12)$$

$$F_{bli} = A_{col} \cdot e^{\mu \cdot d_{col}} \cdot \rho \quad (13)$$

sendo, ρ = Densidade do chumbo (Pb) de 11,34 g/cm³; $\pi \approx 3,1415$; μ = Coeficiente de atenuação da radiação; d = Distância fonte-colimador (cm); F = Área do orifício do colimador (cm²); d_{col} = Espessura do colimador (cm); Det = Área do detector; A_{I_0} = Atividade da fonte; A_{col} = Atividade na parede do colimador; A_{furo} = Atividade que passa pelo furo do colimador e F_{bli} = Atividade que passa pela blindagem.

As Tabelas 6, 7 e 8 resumizam os dados teóricos da quantidade de fótons de radiação gama de ⁷⁵Se, ¹³⁷Cs e ¹⁹²Ir que atravessam o orifício do colimador e o vazamento da radiação pela espessura sólida do colimador. Os fótons que atravessam a parede do colimador podem criar ruídos nas imagens geradas pelos detectores causando artefatos nas imagens reconstruídas. Como pode ser observado das Tabelas 6, 7 e 8, o número de fótons que atravessam toda a espessura da parede do colimador são muito baixos comparados aos que atravessam o orifício do colimador. Nas Figuras 41, 42 e 43 são mostradas uma demonstração teórica da razão de fótons que passa pelo orifício em relação a quantidade de fóton que atravessa a blindagem do colimador em função da espessura da blindagem.

Tabela 6 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam a fenda e toda a parede sólida do colimador de 2 x 5 x 50 mm

Isótopo	Energia (MeV)	Atividade (Bq)	Nº fótons pela blindagem	Nº fótons pelo furo
^{75}Se	0,265 – 0,279	$5,1800 \times 10^{10}$	$3,3275 \times 10^{-7}$	$7,1368 \times 10^4$
^{137}Cs	0,662	$3,7000 \times 10^9$	$1,8462 \times 10^3$	$5,0977 \times 10^3$
^{192}Ir	0,317	$1,0100 \times 10^{11}$	$2,0749 \times 10^{-2}$	$1,3915 \times 10^5$

Tabela 7 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam a fenda e toda a parede sólida do colimador de 4 x 10 x 50 mm

Isótopo	Energia (MeV)	Atividade (Bq)	Nº fótons pela blindagem	Nº fótons pelo furo
^{75}Se	0,265 – 0,279	$5,1800 \times 10^{10}$	$3,3275 \times 10^{-7}$	$2,8546 \times 10^5$
^{137}Cs	0,662	$3,7000 \times 10^9$	$1,8462 \times 10^3$	$2,0391 \times 10^4$
^{192}Ir	0,317	$1,0100 \times 10^{11}$	$2,0749 \times 10^{-2}$	$5,5662 \times 10^5$

Tabela 8 - Quantidade de fótons de radiação gama de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir que atravessam o orifício e toda a parede sólida do colimador de 5 ø x 40 mm

Isótopo	Energia (MeV)	Atividade (Bq)	Nº fótons pela blindagem	Nº fótons pelo furo
^{75}Se	0,265 – 0,279	$5,1800 \times 10^{10}$	$1,7773 \times 10^{-4}$	$1,4010 \times 10^5$
^{137}Cs	0,662	$3,7000 \times 10^9$	$6,5444 \times 10^3$	$1,0007 \times 10^4$
^{192}Ir	0,317	$1,0100 \times 10^{11}$	1,3921	$1,7316 \times 10^5$

Figura 41 – Demonstração teorica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 279 keV. Razão entre o número de fótons no orifício do colimador (FC) / fótons que vazam pela blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ^{75}Se

Figura 42 – Demonstração teorica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 662 keV. Razão entre o número de fótons colimados (FC) / fótons que atravessam a espessura da blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ^{137}Cs

Figura 43 – Demonstração teórica da efetividade da espessura da blindagem de Pb para a energia de 317 keV. Razão entre o número de fótons colimados (FC) / fótons que atravessam a espessura da blindagem (FB) em função da espessura da blindagem para fonte de ^{192}Ir

Os espectros de energia típicos de ^{75}Se (97 keV, 121 keV, 136 keV, 265 keV, 279 keV e 400 keV), ^{137}Cs (662 keV) e ^{192}Ir (317 keV, 468 keV e 602 keV) [51] [58] [59] obtidos para os detectores colimados com diferentes orifícios: fendas de 2 x 5 x 50 cm e 4 x 10 x 50 mm (largura x comprimento x profundidade) e um orifício circular de 5 mm de diâmetro x 40 mm de profundidade são apresentadas nas Figuras 44 a 49. Essas medidas foram realizadas para testar a eletrônica desenvolvida e verificar os efeitos das dimensões das fendas nos espectros de energias. Espectros similares foram encontrados para os cinco detectores que compõem o TCi-3^aG. As Figuras 44 a 46 ilustram os espectros típicos das fontes de ^{75}Se e ^{137}Cs simultaneamente, obtidos para cada um dos colimadores. Como pode ser observado, nestas figuras, a região Compton do ^{137}Cs interfere sobre outros fotopicos de menor energia, por exemplo, os fotopicos de 97 keV, 121 keV, 136 keV e 400 keV do ^{75}Se .

Somente o colimador com janela de 2 x 4 x 50 mm distinguiu os fótons de 265 keV e 279 keV. Nos outros dois colimadores observa-se a sobreposição dos dois picos de 265 e 279 keV. As Figuras 47 a 49 ilustram os espectros de energia obtidos com o uso das fontes de ^{137}Cs e ^{192}Ir . O ^{192}Ir emite fótons gama com energia de ~602 keV, muito próximo do fóton de 662 keV do ^{137}Cs .

Dependendo das atividades das duas fontes (^{137}Cs e ^{192}Ir) pode-se observar um abaulamento à esquerda no espectro combinado dessas duas fontes. Como na tomografia costuma-se utilizar as duas fontes com atividades próximas, neste caso, a contribuição do fóton gama de 602 keV pode ser desprezada devido ao baixo rendimento (*yield* ~6%) de emissão desses fótons no processo de desintegração radioativa do ^{192}Ir .

Figura 44 - Espectro de energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 2 x 5 mm

Figura 45 - Espectro de energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 4 x 10 mm

Figura 46 - Espectro de energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 5 mm de diâmetro

Figura 47 - Espectro de energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 2 x 5 mm

Figura 48 - Espectro de energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 4 x 10 mm

Figura 49 - Espectro de energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , obtido simultaneamente, para os detectores colimados com fenda de 5 mm de diâmetro

Figura 50 - Linearidade das energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 2 x 5 mm

Figura 51 - Linearidade das energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 4 x 10 mm

Figura 52 - Linearidade das energias de ^{75}Se e ^{137}Cs , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas circular de 5 mm de diâmetro

Figura 53 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 2 x 5 mm

Figura 54 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 4 x 10 mm

Figura 55 - Linearidade das energias de ^{137}Cs e ^{192}Ir , para os espectros obtidos, utilizando os detectores colimados com fendas de 5 mm de diâmetro

Encontrou-se boa correlação linear entre as diferentes energias de fontes de radiação gama (^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir) e o número de canais para os três tipos de colimadores, conforme mostrado nas Figuras de 50 a 55.

5.3. Eletrônica de aquisição de dados

Como descrito nos capítulos 5.1 e 5.2, os resultados encontrados nas medidas realizadas mostram que o sistema eletrônico desenvolvido apresentaram resultados comparáveis com a literatura [59]. O sistema de aquisição de dados, utilizado inicialmente em nossos trabalhos consistia de um equipamento comercial (Lundlum modelo M 4612) [19] [60] [61] [62]. Trata-se de um módulo contendo 12 contadores monocanais com unidade de alta tensão, amplificador e dois discriminadores de sinais (inferior e superior). No equipamento desenvolvido no IPEN, dispõem-se de 12 analisadores tipo multicanais de 8 bits (256 canais), unidade de alta tensão e amplificador. Ambos os sistemas dispõem de uma placa controladora que se comunica com o computador tipo PC no processo de transferência de dados. O sistema desenvolvido no IPEN usa uma porta USB enquanto o sistema Lundlum usa a porta serial RS-232. Dentre as vantagens do sistema desenvolvido no IPEN pode-se enfatizar sua capacidade de análise multicanal rápida e que permite aquisições de sinais com perfil de $5\mu\text{s}$ e que facilita as operações de calibração dos múltiplos detectores utilizados. Adicionalmente, o uso de sistema tipo multicanais aplicado às medidas de multifontes redução do número de detectores e contadores como já descrito e ilustrado na Figura 32 [21] [28]. O uso do sistema monocanal faz necessário utilizar conjuntos de detectores independentes para cada fonte, tornando a eletrônica mais complexa como ilustrado na Figura 6.

5.4. Resolução e o parâmetro FWHM

Os valores das resoluções energéticas, avaliadas pelo parâmetro FWHM (Tabelas 9 e 10), foram estimados por meio das análises dos espectros de radiação gama em cada colimador deste trabalho. Utilizou-se a eletrônica multicanal contendo 256 canais, onde cada canal tem banda energética de ~ 3 keV/canais [49].

Pela análise dos resultados de FWHM e resolução energética pode-se verificar a qualidade dos espectros de radiação gama, e consequentemente o desempenho do sistema de aquisição e eletrônica desenvolvidos no IPEN, demonstrados nos resultados para as fontes de ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir .

Tabela 9 - Resultados dos valores de FWHM para as fontes ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir utilizando diferentes dimensões de colimadores

Colimadores	^{75}Se (265 – 279 keV)	^{137}Cs (662 keV)	^{192}Ir (317)
2 mm x 4 mm	25 canais	10 canais	15 canais
	75keV	30 keV	45 keV
4 mm x 10 mm	20 canais	8 canais	17 canais
	60 keV	24 keV	51 keV
Ø 5 mm	20 canais	11 canais	16 canais
	60 keV	33 keV	48 keV

Tabela 10 - Resultados dos valores de resolução energética para as fontes ^{75}Se , ^{137}Cs e ^{192}Ir utilizando diferentes dimensões de colimadores

Colimadores	^{75}Se (265 – 279 keV)	^{137}Cs (662 keV)	^{192}Ir (317)
2 mm x 4 mm	22,9 %	4,6 %	14,6 %
4 mm x 10 mm	19,0 %	3,7 %	16,5 %
Ø 5 mm	18,5 %	5,0 %	15,5 %

5.5. Tempo de Medida da Tomografia

As medidas foram realizadas no TCi-3^aG, programado para girar a mesa 360° em 60 passos de 6°. Solidariamente à mesa estão instalados o conjunto fonte-detector. A Tabela 11 contém o numero de vistas e o tempo total em minutos para realizar as aquisições de dados para a tomografia, com cada conjunto de colimadores. Foi observado que o conjunto de colimadores de 5 mm de diâmetro o tempo de medida requerido foi menor do que os colimadores de 2 x 4 mm, entretanto a qualidade das imagens obtidas com os colimadores de 2 x 4 mm foram superiores às imagens com os colimadores de 5 mm de diâmetro (Figura 56).

Tabela 11 - Numero de vistas e tempo de tomografia

Colimador	Vistas por detector	Vistas totais	Tempo (minutos)
2 mm x 4 mm	47	14100	470
4 mm x 10 mm	23	6900	230
Ø 5 mm	18	5400	180

5.6. Fantom – Objeto padronizado capaz de gerar imagens com aspectos conhecidos

As medidas tomográficas foram realizadas utilizando o fantom e com as fontes de ^{75}Se (energias de 265 keV e 279 keV), ^{137}Cs (662 keV) e do ^{192}Ir (317 keV). Uma quarta calibração de medida foi efetuada denominada de janela aberta em que toda a faixa espectral (20 keV a 700 keV), utilizada para as medições dos três conjuntos de colimadores.

Selecionou-se o intervalo de energia entre 255 a 285 keV correspondente ao ^{75}Se , entre 285 a 330 keV relativo ao ^{192}Ir e o intervalo entre 652 a 672 keV relativo ao ^{137}Cs . Os resultados foram reconstruídos em imagens de 256 x 256 pixels.

A Figura 56 ilustra as imagens tomográficas reconstruídas do fantom multifásico. O fantom é composto de polimetilmetacrilato (PMMA) contendo três furos, sendo um preenchido com um tarugo de aço inox (AISI 304), outro com alumínio e o terceiro com um tubo de vidro comum sem preenchimento (ar).

5.6.1 Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 2 x 4 x 50mm

As medidas tomográficas realizadas com o conjunto de colimadores de 2 x 4 x 50 mm geraram imagens de qualidade superior comparativamente aos outros colimadores estudados. Esse conjunto de colimadores foi capaz de gerar

imagens de melhor qualidade para todas as janelas de energias estudadas (Figura 56).

5.6.2 Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 4 x 10 x 50mm

As imagens (Figura 55) provenientes dos dados de janela aberta (20 keV a 700 keV), com o conjunto de colimadores 4x10x50 mm, foram satisfatórias para ambos pares de fontes: [^{75}Se e ^{137}Cs] ou [^{192}Ir e ^{137}Cs]. Observou-se também que as imagens obtidas a partir dos dados da janela relativa às energias do [^{75}Se] (265 a 279 keV) também apresentaram imagens de boa qualidade. Entretanto, as imagens obtidas a partir dos dados da janela relativa às energias do [^{192}Ir + ^{137}Cs] (317 e 662 keV) não geraram imagens satisfatórias.

Para a energia de ^{137}Cs , as imagens reconstruídas apresentaram artefatos muito evidentes na região do ar comprometendo a imagem e na região energética do ^{192}Ir aparece um artefato que compromete a região do alumínio.

5.6.3 Imagens geradas com o conjunto de colimadores de 5 Ø x 40mm

Das imagens do conjunto de colimadores de 5 mm de diâmetro (Figura 56), observam-se muitos artefatos de imagens que comprometem as imagens reconstruídas em todas as energias estudadas. Esses artefatos podem ser provenientes de um baixo número de pontos de vistas da tomografia (Tabela 11).

Figura 56 – Imagens reconstruídas do fantom com algoritmo SMART

5.6.4 Inferência da densidade a partir dos índices de cor das imagens

A partir das imagens reconstruídas, selecionou-se ROI (Região de Interesse) centradas em cada material do fantom multifásico para obter as médias dos índices dos tons de cinzas dos píxeis de cada área selecionada [63]. Os valores obtidos foram correlacionados com a densidade de cada material utilizada na fabricação do fantom, cujos resultados são mostrados nas Figuras 57 a 68.

Figura 57 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm

Figura 58 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm de fenda

Figura 59 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com fenda de 2 x 5 mm

Figura 60 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com fenda de 2 x 5 mm

Figura 61 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm

Figura 62 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm

Figura 63 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com fenda de 4 x 10 mm

Figura 64 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com fenda de 4 x 10 mm

Figura 65 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 265 a 279 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro

Figura 66 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 317 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro

Figura 67 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em 662 keV, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro

Figura 68 - Correlação entre a densidade e índices de pixels em canal aberto, para colimador com orifício de 5 mm de diâmetro

Inferre-se a partir das Figuras 57 a 68 e do coeficiente de explicação R^2 que resultados superiores foram obtidos para o colimador de orifício de 2 x 5 mm, comparados aos demais colimadores.

Por meio da análise da densidade versus índice de cor pode-se estimar a densidade do material contido em qualquer região tomográfica.

5.6.5 Comparação entre imagens reconstruídas obtidas pelo tomógrafo de terceira geração e um tomógrafo médico

Para fins de comparação, foi realizada uma tomografia com o fantom multifásico, utilizando um TC médico convencional (modelo TC Philips® MX 4000 Dual), gentilmente cedido por um hospital. As imagens obtidas em TC médico, apresentaram ótima resolução espacial (Figura 69), entretanto, não foi possível identificar cada um dos diferentes materiais que compõem o fantom, devido a grande variação da densidade entre os materiais constituintes, PMMA, alumínio, ferro e ar. O TC médico identificou apenas dois materiais como constituintes.

Figura 69 – Imagens reconstruídas do fantom, utilizando médico

5.7. Coluna Simuladora de Bolhas

A Figura 70 mostra as imagens tomográficas reconstruídas da coluna simuladora de bolhas de 90 mm de diâmetro, com parede de 1 cm de PMMA. As medidas tomográficas foram realizadas borbulhando a coluna com água, ou seja, a água foi misturada e agitada pela introdução de gás (ar comum) à 5 litros por minuto a partir do fundo da coluna, formando as bolhas. As bolhas sobem para o topo da coluna a uma velocidade aproximada de 5 cm/s. As medidas tomográficas na coluna simuladora de bolhas foram realizadas em quatro posições acima do ponto de geração de bolhas, a saber, 50 mm, 100 mm, 200 mm e 300 mm. As

imagens foram reconstruídas em 256 x 256 pixels. Como pode ser observado na Figura 63, nas imagens reconstruídas, nota-se a evolução da formação de bolhas dentro da coluna para ambas as energias, 317 keV e 662 keV.

Na altura de 50 mm acima do centro gerador de bolhas, as bolhas ficam agrupadas nas proximidades de um dos lados da parede da coluna e ao atingir a altura de 100 mm observa-se uma redistribuição espacial das bolhas. Devido ao efeito de menor pressão, as bolhas se expandem. À altura de 200 mm formam-se novas bolhas devido à subdivisão causada pela expansão das bolhas originalmente criadas. A este nível, observa-se que a concentração de bolhas é predominante na região central da coluna. À 300 mm de altura, as bolhas se encontram dispersas mais uniformemente nessa região.

Apesar das imagens reconstruídas a partir das duas janelas de energias (317 e 662 keV) serem capaz de identificar as bolhas, as imagens obtidas com a janela de 317 keV apresentaram melhor qualidade de imagem comparada àquela obtida para 662 keV.

Figura 70 - Imagens da coluna simuladora de bolhas a energia de 317 keV e 662 keV, à quatro alturas diferente, utilizando o colimador de 2 mm x 5 mm 50 mm.

6. CONCLUSÕES

Uma boa resolução e linearidade entre as fontes de radiação e o detector de NaI(Tl) acoplados à eletrônica desenvolvida foram encontradas.

O multicanal com 256 canais apresentou um bom desempenho para a aplicação neste projeto, simplificando a eletrônica do CTi-3ªG nas medidas com multifontes.

O colimador com janela de 2 x 5 x 50 mm apresentou melhor qualidade da imagem comparada aos demais colimadores estudados.

O colimador com janela de 4 mm x 10 mm x 50 mm apresentou boa qualidade de imagens somente para a fonte de ^{75}Se .

O colimador de 5 mm $\varnothing$ x 40 mm apresentou maior número de artefatos nas imagens para todas as fontes estudadas.

Quanto menor a janela de colimador melhor foi a qualidade da imagem, embora ocorra a diminuição da contagem e assim necessita aumentar o tempo de varredura.

Para o fantom estático com três fases a qualidade das imagens dependeu dos materiais inseridos no objeto e da energia da fonte radioativa.

Os tempos de varredura para as medidas tomográficas foram:

- 470 minutos (colimadores de 2 mm x 5 mm x 50 mm);
- 230 minutos (colimadores de 4 mm x 10 mm x 50 mm);
- 180 minutos (colimadores de 5 mm $\varnothing$ x 40 mm).

A evolução do trajeto e do formato das bolhas dentro da coluna pôde ser avaliada pelas imagens reconstruídas em quatro alturas diferentes da coluna.

A utilização de multicanal rápido, que permite a seleção das faixas de energias, em substituição aos monocanais comerciais, permitiu a redução de números de detectores e contadores, o que simplifica substancialmente a eletrônica do CTi de terceira geração, com a vantagem de fornecer a informação espectral para o selecionamento das janelas e a calibração do sistema de detectores.

7. REFERENCIAS

- [1] G. N. Hounsfield, "Radiography". Estados Unidos da América Patente US4115698 (A), 19 09 1978.
- [2] G. T. Herman, Fundamentals of computerized tomography: Image reconstruction from projection, Springer, 2009.
- [3] T. Deller, K. N. Jabri, J. M. Sabol, X. Ni, G. Avinash, R. Saunders e R. Uppaluri, "Effect of Acquisition Parameters on Image Quality in Digital Tomosynthesis," *Physics of Medical Imaging*, vol. 6510, 2007.
- [4] H. Jiang, Computed tomography : principles, design, artifacts, and recent advances, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [5] R. T. Lopes, *Tomografia Computadorizada em Testes Não Destrutivos (Tese de Doutorado)*, Rio de Janeiro: UFRJ, 1988.
- [6] P. Reimers, W. B. Gilboy e J. Goebbels, "Recent developments in the industrial application of computerized tomography with ionizing radiation," *NDT International*, vol. 17, n. 1, pp. 197 - 207, 1984.
- [7] Withjack, E.M.; Arco Oil; Gas Co., "Computed Tomography for Rock-Property Determination and Fluid-Flow Visualization," *SPE Formation Evaluation*, vol. 3, n. 4, pp. 696 - 704, 1988.
- [8] H. Jiang, L. Zeng e B. Bi, "A comprehensive method of extraction for industrial computed tomography images," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, pp. 286 - 293, 2013.
- [9] A. Flisch, J. Wirth, R. Zanini, M. Breitenstein, A. Rudin, F. Wendt e R. Golz, "Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Applications," em *Computerized Tomography for Industrial Application and Image Processing in Radiology*, Berlin, 1999.
- [10] P. J. Jr. Hicks, "X-Ray Computed-Assisted Tomography for Laboratory Core Studies," *Journal of Petroleum Technology*, pp. 1120 - 1122, 1996.
- [11] A. N. Danilewsky, R. Simon, A. Fauler, M. Fiederle e K. W. Benz, "White beam X-Ray Tomography at the Synchrotron Light Source ANKA, Research Centre Karlsruhe," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 199, pp. 71 - 74, 2003.
- [12] J. Hofmann, A. Flisch e A. Obrist, "Adaptive CT Scanning-Mesh Based Optimisation Methods for Industrial X-Ray Computed application," *NDT & E International*, vol. 37, pp. 271 - 278, 2004.

- [13] J. Liu e Z. Wu, "Experimental Research on Rear Collimator in Gamma-Ray Industrial CT," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 67, pp. 1216 - 1219, 2009.
- [14] P. Reimers e J. Goebbels, "New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography" ,," *Materials Evaluation*, pp. 732 - 737, 1982.
- [15] S. Y. Wang, S. Ayral e C. C. Gryte, "Computer-Assisted Tomography for Observation of Oil Displacement in Porous Media," *Journal Petroleum Science Engineering*, pp. 53 - 55, 1984.
- [16] P. R. Fransham e J. Jelen, "Displacement of Heavy Oil visualized by CAT Scan," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, pp. 42 - 47, 1987.
- [17] B. P. Flannery, W. G. Deckman e K. L. Roberge, "Three Dimensional X-Ray Microtomography," *Science*, vol. 237, pp. 1439 - 1444, 1987.
- [18] S. B. Kumar e M. P. Dudukovic, "Computer-assisted gamma and X-ray tomography:," em *Proceeding of Non-Invasive Monitoring of Multiphase Flows*, Amsterdam, 1997.
- [19] IAEA, "IAEA-TECDOC-1589 Industrial Process Gamma Tomography," Viena, 2008.
- [20] G. A. Johansen e P. Jackson, *Radioisotope Gauges for Industrial Process*, Oslo: John Wiley & Sons, 2004.
- [21] P. A. V. Salvador, *Análise de sistemas multifásicos utilizando tomografia computadorizada (Tese de Doutorado)*, São Paulo, São Paulo: IPEN, 2008.
- [22] F. Mees, R. Swenne, M. Van Geet e P. Jacobs, *Applications of X-Ray Computde Tomography in the Geosciences*, London: The Geological Society, 2003.
- [23] M. Neumayer e H. Zangl, "Modeling of a Tank System for Liquid Level Measurement by Means of Electrical Tomography," em *6th World Congress on Industrial Process Tomography*, Beijing, 2010.
- [24] L. Babout, R. Banasiak, Z. Liu e R. Wajman, "Feasibility Study of Dense Phase Flow Using Rotatable ECT Sensor," em *6th World Congress on Industrial Process Tomography*, Beijing, 2010.
- [25] C. H. Mesquita, P. A. V. Salvador, W. A. P. Calvo, L. A. Marcato, D. V. S. Carvalho, R. A. Santos e M. M. Hamada, "Multi-Source Third Generation Computed Tomography for Industrial Multiphase Flows Applications," em *IEEE Conference, 2011*, Valência, 2011.
- [26] N. Reinecke e D. Mewes, "Recent Developments and Industrial / Research application of Capacitance Tomography," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, n. 3, pp. 233 - 246, 1996.

- [27] C. Ping, P. Jin-Xiao e L. Bin, "Industrial Computed Tomography Image Size Measurement," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 608, pp. 185 - 190, 2009.
- [28] M. P. Dudukovic, "Relevance of Mutiphase Reaction Engineering to Modern," *Ind. Eng. Chem. Res.*, pp. 8674 - 8686, 2007.
- [29] F. D. Saad, J. R. Pimentel, C. H. Furukawa, J. I. Akamatsu e P. Yamamura, "Eletromagnetismos Demonstrações," UNESP, [Online]. Available: http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20eletromag.htm. [Acesso em 8 fevereiro 2014].
- [30] K. C. Chung, *Introdução à física nuclear*, Rio de Janeiro: EdUERJ, 2001.
- [31] I. Kaplan, *Nuclear Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1978.
- [32] G. C. Tetzner, *Aplicação da Tomografia Computadorizada Industrial na Análise de Rochas*, São Paulo: IPEN, 2008.
- [33] NDT Education Resouce Center, "Gamma Radiation," NDT, 2001 - 2014. [Online]. Available: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/gamma.htm>.
- [34] R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, New York: Mc Graw-Hill, 1955.
- [35] E. M. Yoshimura, "Física das Radiações: interação da radiação com a matéria," *Revista Brasileira de Física Médica*, vol. 3, n. 1, pp. 57 - 67, 2009.
- [36] B. R. Nogueira, *Avaliação dos Efeitos da Radiação Ionizante por Feixe de Elétrons na Incorporação de Fibra de Piaçava (Attlea Funifera Mart.) no Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico (EVOH) (Dissertação de Mestrado)*, São Paulo: São Paulo, 2012.
- [37] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, New York: John Wiley, 1989.
- [38] NIST, "Element/Compound/Mixture Selection," National Institute of Standards and Technology, 2014. [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [39] E. Okuno e E. Yoshimura, *Física das Radiações*, São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- [40] N. Santos, "Universidade Técnica de Lisboa," Instituto Superior Técnico, 2006. [Online]. Available: http://web.ist.utl.pt/ist155746/monografia_ist_frad.pdf. [Acesso em 10 02 2014].
- [41] A. L. Dias Neto, *Contribuição a Cintilografia de Alta Resolução e Baixa Distorção: Utilização de radiofármacos de baixa energia (Tese de Doutorado)*, São Paulo: USP, 1971.

- [42] E. A. Zandoná, *Quantificação da Resolução do Sistema SPECT-CZT através do uso da Função de Transferência Modulada (MTF)*, Botucatu: UNESP, 2013.
- [43] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Rolla - U.S.A.: Hemisphere Publishing Corporation, 193.
- [44] M. M. L. Rosa, L. G. Custódio, R. L. Bonifácio e M. H. Taddei, "Validação do Ensaio de Medidas por Espectrometria Gama de Radionuclídeos em Matrizes de Alimentos," em *IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013*, Rio de Janeiro, 2013.
- [45] M. N. S. Montanheiro, V. F. Nascimento Filho e F. A. Pinto, *Introdução a Espectrometria Gama*, Piracicaba: CENA / USP, 1977.
- [46] D. A. A. Vasconcelos, M. M. Hamada, C. H. Mesquita, C. C. Dantas, R. Narain, S. B. Melo e V. A. Santos, "Collimator Design for Single Beam Gamma Ray Industrial Tomography and Fan Beam Geometry," em *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011*, Belo Horizonte, 2011.
- [47] W. A. P. Calvo, C. H. Mesquita, P. A. V. Salvador, P. R. Rela, J. F. T. Martins, F. E. Sprenger, J. C. S. M. Pereira e M. M. Hamada, "Mechanical Control Design of a Gamma Ray Computed Tomography For Multiphase System Column Analyses," em *Nukleonika*, Kraków, 2009.
- [48] C. H. Mesquita, C. C. Dantas, F. E. Costa, D. V. S. Carvalho, T. Madi Filho, P. A. V. Salvador e M. M. Hamada, "Development of a Fourth Generation Industrial Tomography for Multiphase Systems Analysis," em *IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference, and 17th International Workshop*, Knoxville, 2010.
- [49] D. V. S. Carvalho, L. A. Marcato, M. M. Hamada, J. F. T. Martins, R. A. Santos, F. E. Costa e C. H. Mesquita, "Development of a data acquisition system containing 12 units type 8-bit multichannel (256 channels) for use in industrial tomography," em *XXXIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil*, Campos do Jordão, 2010.
- [50] C. H. Mesquita, W. A. P. Calvo, D. V. S. Carvalho, F. E. Sprenger, P. A. V. Salvador e M. M. Hamada, "Development of the Mechanical System on a Third-Generation Industrial Computed Tomography Scanner in Brazil," *Journal of Physical Science and Application*, pp. 158 - 165, 2012.
- [51] D. V. S. Carvalho e M. M. Hamada, "Desenvolvimento de Sistema Tomográfico Computadorizado Industrial com Raios Gama," em *XVI Seminário Anual PIBIC, VI Seminário Anual PROBIC*, São Paulo, 2010.
- [52] D. V. S. Carvalho e M. M. Hamada, "Análise de um fantom multifásico usando tomografia industrial computadorizada de terceira geração desenvolvido no IPEN," em *XVII Seminário*

Anual PIBIC, VII Seminário Anual PROBIC, I Seminário Anual PIBITI, São Paulo, 2011.

- [53] W. A. P. Calvo, C. H. Mesquita, F. E. Sprenger, F. E. Costa, P. A. V. Salvador, D. V. S. Carvalho e M. M. Hamada, "Development of the mechanical system on a third-generation industrial computed tomography scanner in Brasil," em *International Conference on Development and Applications of Nuclear Technologies - NUTECH 2011, Kraków, 2011.*
- [54] E. F. Oliveira, S. B. Melo, C. C. Dantas, D. A. A. Vasconcelos e F. Cadiz, "Comparison Among Tomographic Reconstruction Algorithms With a Limited Data," em *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, Belo Horizonte, 2011.*
- [55] E. F. Oliveira, S. B. Melo, C. C. Dantas, I. V. Mota e M. Lira, "Tomographic Reconstruction With B-Splines Surfaces," em *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, Belo Horizonte, 2011.*
- [56] "Scintillator Response To gamma-rays," Scionix, [Online]. Available: <http://www.scionix.nl/scintillator.htm>. [Acesso em 11 2013].
- [57] W. D. Callister Jr, *Materials Science and Engineering: An introduction*, New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [58] Scionix, "Scionix Netherlands," Scionix, 1999. [Online]. Available: <http://www.scionix.nl/scintillator.htm>. [Acesso em novembro 2013].
- [59] G. Zaddach, *Kernforschusanlage Jülich GmbH – Katalog von Ge (Li)- γ -Spektren*, Jülich: Zentralbibliothek, 1979.
- [60] C. H. Mesquita, S. Legoupil e M. M. Hamada, "Development of an Industrial Computed Tomography Designed with a Plastic Scintillator Position Sensitive Detector," *Nuclear Science Symposium Conference Record*, vol. 1, pp. 540 - 544, 2005.
- [61] C. H. Mesquita, J. M. Fernandes Neto e M. M. Hamada, "The Target Theory Applied to the Radation Analysis Damage in the Organic Detectors," em *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005, Rio de Janeiro, 2005.*
- [62] P. A. V. Salvador, F. E. Costa, W. A. P. Calvo e M. M. Hamada, "Development of a Scintillator Detector System from Gamma Scan Measurements of Industrial Distillation," *Physics Research A*, pp. 458 - 461, 2005.
- [63] A. F. Velo, *Otimização de Imagem de Tórax para Radiologia Computadorizada (Dissertação)*, Botucatu: UNESP, 2012.
- [64] P. J. Hicks Jr., H. A. Deans e K. R. Narayanan, "Distribution of Residual Oil in Heterogeneous Carbonate Cores Using X-Ray CT," *Society of Petroleum Engineers*, vol. 7, n. 3, pp. 235 - 240, 1992.

- [65] F. Baytas e M. Geçkinli, "An alternative approach to direct Fourier reconstruction in parallel-beam tomography," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, n. 4, pp. 556 - 563, 1996.
- [66] F. A. Balogun, "Angular variation of scattering volume and its implications for Compton scattering tomography," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 50, n. 2, pp. 317 - 323, 1999.
- [67] G. S. Sidhu, K. Singh, P. Singh e G. S. Mudahar, "Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 56, n. 5 - 6, pp. 535 - 537, 1999.
- [68] K. A. Shollenberger, J. R. Torczynski, D. R. Adkins, T. J. O'Hern e N. B. Jackson, "Gamma-densitometry tomography of gas holdup spatial distribution in industrial-scale bubble columns," *Chemical Engineering Science*, vol. 52, n. 13, pp. 2037 - 2048, 1997.
- [69] J. F. T. Martins, *Desenvolvimento do Cristal Semicindutor de Iodeto de Mercúrio para Aplicação como Detector de Radiação (Dissertação de Mestrado)*, São Paulo: IPEN, 2011.
- [70] R. A. Santos, *Otimização da Metodologia de Preparação do Cristal de Brometo de Tálcio para sua Aplicação como detector de Radiação (Dissertação de Mestrado)*, São Paulo: IPEN, 2012.