

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INSPEÇÃO BASEADO EM  
TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO GAMA PARA APLICAÇÃO EM DUTOS  
FLEXÍVEIS E COLUNAS INDUSTRIAIS

Clério Carneiro Júnior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
FEVERIRO DE 2006

CARNEIRO JÚNIOR, CLÉRIO

Desenvolvimento de um Sistema  
de Inspeção Baseado em Transmissão  
Gama para Aplicação em Dutos  
Flexíveis e Colunas Industriais. [Rio de  
Janeiro] 2005

IX, 58 pg. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Nuclear, 2005)

Dissertação - Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, COPPE

1. Transmissão de Radiação Gama
2. Dutos Flexíveis
3. Colunas Industriais

I. COPPE/UFRJ II. Título (Série)

*“... Como viver o mundo em termos de esperança? E que palavra é essa que a vida não alcança?”*

*“ Carlos Drummond de Andrade ”*

Aos meus pais, Clério  
Carneiro e Martha Carneiro  
(†), dos quais tanto me  
orgulho de ser filho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por todas as graças por mim alcançadas.

À minha esposa Maura Elisa que é uma dessas graças que Deus me proporcionou.

Aos Meus Irmãos Lindolff, Leniza, Norma e Cláudia pelo amor, amizade e união.

Ao meu tio José Carneiro por todos os momentos sempre presente.

Aos meus sobrinhos Leo, Luandi, Lucas, Lívia, Victor, Amanda, Gabriel, Júlia e Rachel que representam renovação, perpetuação e esperança.

Aos meus sogros Joel e Maura por me acolherem e pelo apoio, dedicação e carinho, sempre incondicional.

À minha tia Iolanda D. Simão pelo incentivo, amor e carinho.

Ao Prof. Ricardo Tadeu Lopes pela orientação e compreensão do momentos difíceis pelo qual passei.

À todos os professores do programa de Engenharia Nuclear, em especial prof Edgar, prof Delson e prof<sup>a</sup> Verginia.

Aos amigos Jose Jorge Brum, Catarine Canellas Leitão e Fábio Martins pela amizade e pela satisfação de conviver durante todo esse tempo e principalmente pelo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis.

À equipe do LIN, que de forma direta ou indireta contribuiu pra a realização desse trabalho: Achilles, Sandro, Carlos Augusto, Josué, Edilson, José Lopes e Erika.

Ao CEFET CAMPOS – UNED MACAÉ por todo apoio.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências ( M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INSPEÇÃO BASEADO EM  
TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO GAMA PARA APLICAÇÃO EM DUTOS  
FLEXÍVEIS E COLUNAS INDUSTRIAIS

Clério Carneiro Júnior

Fevereiro/2006

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho apresenta-se um estudo de um sistema de inspeção baseado em transmissão de radiação gama para aplicação em linhas de dutos flexíveis e colunas industriais. Este sistema utiliza uma fonte de radiação gama de Césio-137 ( 662 keV) e um detector cintilador NaI(Tl) alinhados e eletrônica associada.

Apresenta-se resultados de ensaios feitos com uma amostra de um duto flexível, com o objetivo de analisar o potencial do sistema, para diagnósticos em linhas de dutos flexíveis.

Esses resultados mostram que o sistema é eficiente na detecção de obstruções no duto e na verificação de níveis de volume no interior do mesmo.

Para finalidade de determinação da resolução do sistema na detecção de água, óleo, gases e areia, os resultados mostram que para diferenciação entre os conteúdos, água ou óleo, essa identificação fica comprometida, devido a pequena diferença entre os níveis de contagens médias, cerca de 3%, para esses conteúdos.

Para simulação do sistema sob condições submarinas, o resultado apresentado, mostra que mesmo com a queda no nível de contagens, em torno de 22%, foi possível observar as mesmas características dos ensaios anteriores na situação de superfície.

No ensaio em colunas industriais, com a finalidade de determinação da posição de bandejas, os resultados mostram valores de desvios percentuais médios menores que 1%, demonstrando a eficácia do sistema para esse diagnóstico, e para identificação de desgaste e danos internos nessas colunas.

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

DEVELOPMENT OF A INSPECTION SYSTEM BASED ON TRANSMISSION OF  
GAMMA RADIATION FOR APPLICATION IN FLEXIBLE PIPES AND  
INDUSTRIAL COLUMNS.

Clério Carneiro Júnior

February/2006

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

In this work an inspection system is presented based on gamma radiation transmission for analysis of flexible pipelines and inspection in industrial columns. This system uses a gamma-ray source of Cesium-137 (662 keV) and a scintillation detector NaI(Tl) aligned and associated electronics.

It presented results of tests done with a sample of a flexible pipe, with the objective of analyzing the potential of the system, for diagnoses in lines of flexible pipelines.

Those results show that the system is efficient in the detection of obstructions and in the verification of volume levels inside the pipeline.

For purpose of determination of the resolution of the system in the detection of water, oil, gases and sand, the results show that for differentiation among the contents, water or oil, that identification is engaged, due to small difference among the levels of medium counting, about 3%, for those contents.

For simulation of the system under underwater conditions, it shows that even with the fall in the level of counting, around 22%, it was possible to observe the same characteristics of the previous tests in the surface situation.

In the rehearsal in industrial columns, with the purpose of determination of the position of trays, the results show values of medium percentile deviations smaller than 1%, demonstrating the effectiveness of the system for that diagnosis, and for identification of internal damages in those columns.

**ÍNDICE****CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

1.1 - Introdução	1
1.2 - Revisão Bibliográfica	2

**CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

2.1 - Estrutura de Dutos Flexíveis	5
2.2 - Estrutura Básica de uma Torre de Destilação	8
2.2.1 - Torre de Destilação com Estrutura de Pratos	8
2.2.2 - Torre de Destilação com Recheio	9
2.3 - Interação da Radiação com a Matéria	11
2.3.1 - Radiações diretamente e indiretamente ionizantes	11
2.3.2 - Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria	12
2.3.2.1 - O Efeito Fotoelétrico	13
2.3.2.2 - O Efeito Compton	14
2.3.2.3 - Produção de Pares	14
2.3.2 - A Energia dos Fótons nos Processos Competitivos	15
2.3.2.1 - Coeficiente de Atenuação Linear	15
2.3.2.2 - Coeficiente de Atenuação em Massa	16
2.4 - O Detector NaI(Tl)	17
2.5 - Teoria da Transmissão Gama	20
2.6 - Aplicação da Técnica em Colunas Industriais	21
2.7 – Modelo Teórico do Percorso do Feixe Colimado no Duto	22

**CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

3.1 - Descrição do Sistema	25
3.1.1 - Sistema Fonte Detector	25
3.1.2 - Fonte de Radiação	25
3.1.3 – Detector NaI(Tl)	26
3.1.4 - Eletrônica Associada	26
3.1.5 - Blindagem e Porta Fonte	27
3.1.6 – Colimador	28
3.1.7 - Corpo de Prova	29
3.2 - Procedimento Experimental	30
3.2.1 - Dutos Flexíveis	30
3.2.2 - Colunas Industriais	32

**CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES**

4.1 – Introdução	34
4.2 - Estabilização do Sistema	34
4.3 – Resultados	35
4.3.1 - Dutos Flexíveis	35
4.3.2 - Colunas Industriais	47
4.4 – Considerações	50

**CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

5.1 – Conclusões	51
5.2 – Sugestões	53

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>
-----------------------------------	-----------

# CAPÍTULO 1

## 1.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, mais de 70% da produção nacional de petróleo é obtida a partir de poços situados em águas profundas utilizando plantas de processo com base em sistemas flutuantes de produção. O sucesso desta concepção se deve principalmente à utilização de dutos flexíveis que, por serem flexíveis, resistem a grandes deslocamentos, têm facilidade de lançamento e acomodação no leito do mar (SOUZA et al. - 2000). Mas essas tubulações flexíveis apresentam problemas, como o isolamento térmico deficiente e o lançamento em grandes profundidades, tendo que suportar altas pressões internas e externas, sendo a externa uma função da profundidade. Eles também têm que resistir a agentes químicos agressivos além do ambiente marinho e ao mesmo tempo sofrendo ação das correntezas e ondas, o que pode acarretar em fadiga, corrosão, vazamento e até rompimento dessas linhas flexíveis. Como o custo dessas linhas é muito alto devido a fatores como matéria prima cara (Nylon 11 e aço inoxidável) e processo de fabricação oneroso (RECOPE-TECSUB – 2003), é de vital importância a utilização de sistemas investigativos que visam identificar problemas pontuais em locais onde haja a inviabilidade do acesso físico ou onde o ambiente seja nocivo.

Nos últimos anos, a indústria do petróleo vem reconhecendo o grande valor das técnicas que utilizam radioisótopos na solução de seus problemas tanto no processo de extração como na investigação de suas instalações.

A técnica de transmissão da radiação gama é uma técnica muito efetiva para o diagnóstico e estudo de recintos ou sistemas (torres de destilação, variações da densidade de um fluido no tempo, nível de líquidos, entre outros), a partir do seu exterior, sem interferir com seu funcionamento (CHARLTON e POLARSKI, 1983). A inspeção de torres de destilação mediante seu perfil de densidades é uma das mais úteis aplicações desta técnica e em geral das aplicações com fontes radiativas seladas (PLESS e BOWMER, 1992) e (HILLS, 1999).

O presente trabalho visa desenvolver um sistema que, através da técnica de atenuação gama, consiga localizar “ pigs<sup>1</sup> ” ou outras obstruções em linhas flexíveis, medir o nível de fluídos em recipientes e dutos em ambiente submarino ou na superfície e identificar falhas de processo dentro de colunas industriais.

No item 1.2 é apresentada uma revisão bibliográfica com alguns dos temas utilizados para confecção dessa dissertação, tais como: o uso da técnica de atenuação da radiação para medida de espessura de diversos materiais, utilização de um sistema que possibilita a varredura radial e axial do duto localizando trincas, utilização da técnica de escaneamento gama para inspeção de torres de grande dimensões.

No capítulo 2 deste trabalho, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para confecção dessa dissertação. São apresentadas uma breve descrição da estrutura básica de um duto flexível e de uma torre de destilação, a interação da radiação com a matéria, os efeitos fotoelétrico Compton e produção de pares. Ainda neste capítulo apresenta-se o funcionamento básico de um detector cintilador e a teoria da transmissão da radiação gama.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados neste trabalho, como o sistema fonte (Cs137) detector (NaI(Tl)) e o módulo SIMDAP. Também é descrita a metodologia dos ensaios para duas aplicações da técnica: Dutos Flexíveis e Colunas Industriais.

No capítulo 4 deste trabalho são apresentados os resultados obtidos. São analisados dois métodos propostos para determinação da espessura do duto flexível. É apresentado um estudo de geometria de colimadores além de um estudo para determinação de posição de bandejas, de desgastes e danos internos numa coluna industrial.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões relativas os resultados apresentados no capítulo anterior, bem como sugestões de trabalhos futuros.

## **1.2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A técnica de atenuação e transmissão da radiação gama é uma ferramenta já consolidada e de grande utilidade na investigação não destrutiva. Diversos trabalhos foram publicados mostrando a aplicação desta técnica nas mais diversas áreas do conhecimento humano. Na área agrícola, por exemplo, esta técnica foi utilizada para a determinação simultânea de densidade e umidade de solos (FERRAZ, 1974). A

1- Para vasculhar os dutos, utilizam-se ferramentas, que percorrem a tubulação junto com o material transportado e armazenam em chips as informações sobre o estado dos dutos. Porque sempre saem sujos e são chamados de *pigs* ("porcos", em inglês).

engenharia química é outra área onde esta técnica é muito aplicada como no estudo da medida de concentrações sem interferir no processo de sedimentação (HAMACHER, 1978). Mas a utilização de radioisótopos aplicados à indústria se deu a partir da década de 50 devido ao aumento da disponibilidade desses radioisótopos produzidos em reatores nucleares. Apesar de mais de meio século do uso das radiações ionizantes neste campo, a divulgação de trabalhos científicos nesta linha de pesquisa tem sido pequena.

O uso de técnicas de atenuação da radiação para medida de espessura de diversos materiais foi recomendado por BERMAN e HARRIS (1954). GARDNER e ELY (1967), que publicaram um trabalho sobre radioisótopos na engenharia. Um estudo sobre trincas em tubos com diâmetro entre 300 e 1000 mm e espessuras de 20 a 100 mm, foi feito por POKROVSKII e MALOFEEV (1975), tendo desenvolvido um sistema que possibilita a varredura radial e axial do tubo localizando as trincas. No mesmo ano, com intuito de testar a integridade de juntas soldadas de tubulações, KHOROSHEV et al.(1974), desenvolveram um sistema similar ao anterior (utilizando uma fonte de Irídio-192), para inspeção interna e externa em tubos de diâmetros compreendidos na faixa de 1020 a 1620mm e espessuras acima de 35mm. FULHAM e HULBERT (1975) publicaram a utilização da técnica de escaneamento gama para inspeção em torres de grandes dimensões.

MONNO (1985) desenvolveu um sistema para medição de espessura em tubos de pequenos diâmetros utilizando uma fonte de Césio-137 e um detector cintilador. O tubo inspecionado era movimentado por pequenos roletes e o sistema fonte-detector fixos. DRAKE e SEWARD (1989), desenvolveram um sistema para detectar corrosão em tubos revestidos através de uma fonte de radiação (raios-X ou gama) e detector montados sobre um anel de engrenagem que possibilitava a inspeção radial do tubo. Este conjunto era montado sobre um trilho fixado ao tubo, que proporcionava a varredura axial. Neste sistema, o anel de engrenagem era específico para cada faixa de diâmetro dos tubos em análise.

DRABKIN (1992), desenvolveu um método para determinar a sensibilidade de medidores de espessura que utilizavam radioisótopos, que consistia em relacionar a sensibilidade relativa dos detectores devido à radiação transmitida e espalhada e à espessura média do tubo, para avaliar os erros cometidos nas medições.

HARRISON (1990), aplicou a técnica de transmissão gama para diagnóstico em colunas de destilação.

Uma metodologia para determinar a espessura média de tubos metálicos na presença de isolamentos térmicos, foi desenvolvida por RAMIREZ e FELICIANO (1992). O sistema empregado utilizava uma fonte de Césio-137 e um detector de cintilação alinhados, que se deslocam em movimento linear efetuando a varredura do tubo em inspeção, e apresentando os resultados em forma de gráfico e imagem em tempo real, por intermédio de um microcomputador, podendo a inspeção ser realizada sem a retirada do isolamento térmico e com a planta em operação.

ASTUTO (1995), desenvolveu um sistema de inspeção de tubos com técnica de transmissão de radiação gama que utiliza uma fonte de Césio-137 e um detector de cintilação, alinhados sobre uma plataforma que se desloca em movimento linear varrendo a seção transversal do tubo.

DIEDERICHS (1996), analisou o uso da radiografia para inspeção de soldas por fusão em tubos de polietileno, apresentando procedimentos e carta de exposição para esses materiais. TWOMEY (1996) analisou o uso de diversas técnicas para detecção de corrosão por baixo de isolamento térmico, analisando quando e onde ocorre, e quais as vantagens de cada técnica.

A análise do uso de um detector “on-line” para radiografia de contorno (*Profile Radiography ou Tangential Radiography*) que apresenta um projeto de detector para medida da espessura da parede de tubos analisando os resultados que são apresentados on-line na tela de um computador e pode ser avaliada diretamente durante a inspeção, foi apresentada por HECHT (1998).

GOUVEIA (2000), apresentou um sistema utilizando a técnica de transmissão gama para inspeção de tubos com uso de um detector fotodiodo de CsI(Tl).

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição da estrutura de um duto flexível e de uma coluna de destilação, um resumo dos princípios básicos da interação da radiação com a matéria e da técnica de transmissão gama.

#### 2.1. ESTRUTURA DE DUTOS FLEXÍVEIS

A estrutura do duto flexível, inicialmente proposta pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP) em 1960, foi introduzida pela primeira vez no mercado em 1972 e até 1991 foram instalados cerca de 2.300 km destes dutos em todo o mundo. A PETROBRAS é a maior usuária mundial, com cerca de 2.100 km de dutos de aplicação *offshore*, instalados nos campos produtores nacionais (PORCIÚNCULA *et al*, 1999.). A estrutura de um duto flexível varia de acordo com o fabricante e a finalidade de sua utilização, mas ela é basicamente composta de camadas de aço enroladas helicoidalmente e de camadas homogêneas de termoplásticos com diferentes geometria e materiais. A camada interna de termoplástico assegura que o fluido transportado (óleo bruto, gás e água) não vaze, ao passo que a externa oferece proteção contra corrosão, abrasão e proteção mecânica. As camadas helicoidais de aço provêm a resistência mecânica. Os dutos flexíveis podem ser classificados em não-aderentes (*unbonded*) e aderentes (*bonded*). O ensaio apresentado considera apenas dutos não-aderentes. Cada componente da estrutura não-aderente (*unbonded*), forma uma camada cilíndrica onde os elementos de armação (camadas de aço) podem escorregar em relação aos componentes de vedação (camadas de termoplástico). Uma estrutura típica de um duto flexível não-aderente, está apresentada na figura 2.1.

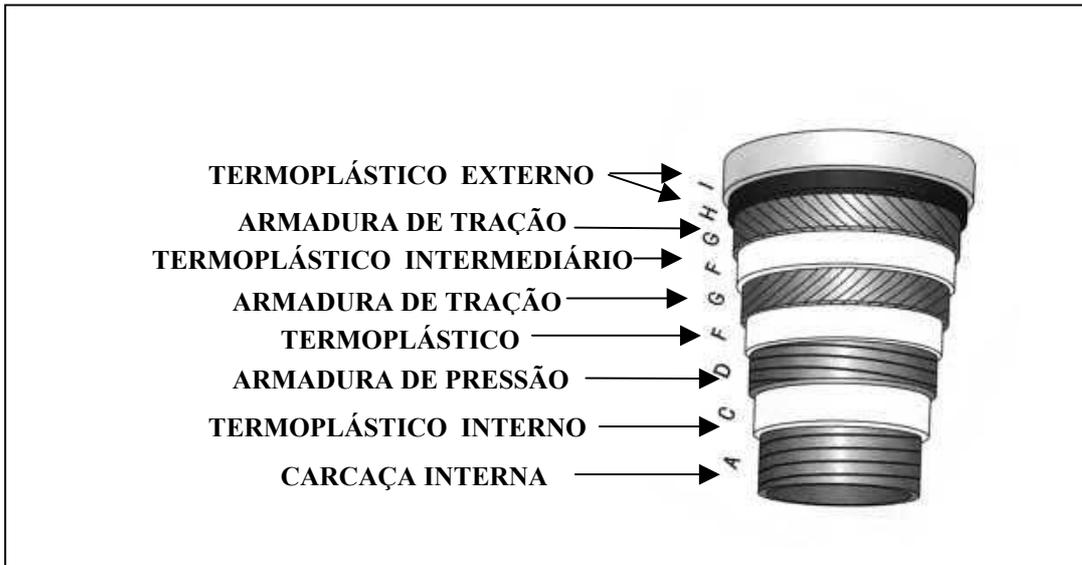


Figura 2.1 Estrutura de um duto flexível

### **Carcaça Interna**

Camada que tem como objetivo evitar o colapso da camada interna de polímero no caso de uma queda rápida na pressão interna. Ela é feita pelo intertravamento de uma ou duas fitas de aço com pequeno passo (grande ângulo de enrolamento) e com folgas no intertravamento que lhe conferem alta flexibilidade. Por ser construída sobre um mandril, a carcaça intertravada apresenta boa precisão do tamanho do diâmetro interno e da ovalização inicial. Os aços selecionados para esta estrutura têm boa resistência à corrosão para poder transportar hidrocarbonetos. São, geralmente, utilizados os aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304/304L e AISI 316/316L.

### **Camada Interna de Termoplástico**

Esta camada, geralmente extrudada sobre a carcaça intertravada, é a camada de vedação que deve resistir à corrosão, abrasão e ataque químico dos fluidos conduzidos. Ela transmite os esforços, como pressão de contato, entre as camadas metálicas adjacentes e o ambiente interno.

## **Armadura de Pressão**

Camada opcional para sustentar cargas devido à pressão interna, além de prover resistência contra pressão externa e efeitos de esmagamento da armação de tração. É feita, geralmente, com um número par de arames de aço (geralmente dois) enrolados helicoidalmente em sentidos opostos e em espiral de pequeno passo. A seção transversal destas camadas pode ter diferentes geometrias. Nos dutos fabricados pela Wellstream (WS) e pela Coflexip (CSO), estas camadas são feitas de um arame em forma de Z, sendo denominada de camada Zeta (CSO) e Flexlok (WS). São utilizados aços de liga de baixo carbono como FM-15 e FM-35.

## **Camada intermediária de termoplástico**

Em *risers* dinâmicos é aplicada uma camada intermediária de termoplástico para diminuir a fricção entre as camadas resistentes à pressão e a armadura de tração.

## **Camada de armação de tração dupla**

Camada que provê a resistência às cargas axiais e à torção. São feitas com número par de camadas, geralmente duas, com arames de seção retangular enrolados helicoidalmente em sentidos opostos com ângulo de inclinação variando entre 15 e 55 °, o qual determina o balanço axissimétrico do duto. Dependendo da aplicação do duto, este ângulo pode variar entre 15° e 55°. Para reduzir a fricção e o desgaste, é inserida uma camada de lubrificação ou, mais recentemente, uma camada de termoplástico entre as camadas de tração. Os fios da armadura de tração são fabricados com aço de liga de baixo carbono FM-72. Para instalar dutos flexíveis de grande diâmetro em lâminas d'água maiores que 1 000 m, foram desenvolvidas armaduras de materiais compostos a partir de resinas plásticas reforçadas com fibras sintéticas. Esta inovação permite atender aos requisitos de alta resistência e pouco peso, necessários às operações de instalação.

### **Camada de termoplástico externa**

Protege as camadas de metal contra corrosão e abrasão, e une a armação adjacente. Como geralmente é extrudada sobre a armadura de tração externa, ela ajuda a manter os arames das armaduras na posição correta.

## **2.2. ESTRUTURA BÁSICA DE UMA TORRE DE DESTILAÇÃO**

Uma torre de destilação é o equipamento básico de uma refinaria de petróleo. A função dessa torre é fracionar uma carga em diversos produtos. A carga da torre pode ser o petróleo bruto ou algum produto intermediário que é pré-aquecido em um forno antes de ser injetado na torre. A Figura 2.2 mostra o esquema simplificado de uma torre de destilação típica. A torre, fisicamente, é um longo vaso cilíndrico vertical equipado com uma série de pratos, ou panelas, superpostos e igualmente espaçados, capazes de acumular o líquido que é condensado. No funcionamento da torre há um fluxo de calor entre o topo e o fundo da torre, gerado por um resfriador no topo e um refeedor no fundo. Devido ao fluxo de calor e aos produtos que se acumulam nos pratos com diferentes volatilidades, há um gradiente de temperatura entre topo e fundo. A temperatura de cada prato é influenciada pelas propriedades dos produtos acumulados nos pratos e que compõem a carga da torre. Quando a carga aquecida penetra na torre ocorre o fracionamento. Os produtos mais voláteis (de maior pressão de vapor ou mais leves) vão se acumulando nos pratos superiores (topo) e os produtos menos voláteis (de menor pressão de vapor ou mais pesados) nos pratos inferiores (fundo). O vapor que sai pelo topo da torre é resfriado em um condensador a água. Após o resfriamento, parte do vapor se condensa e vai para o vaso acumulador, onde é acumulado o líquido que foi condensado.

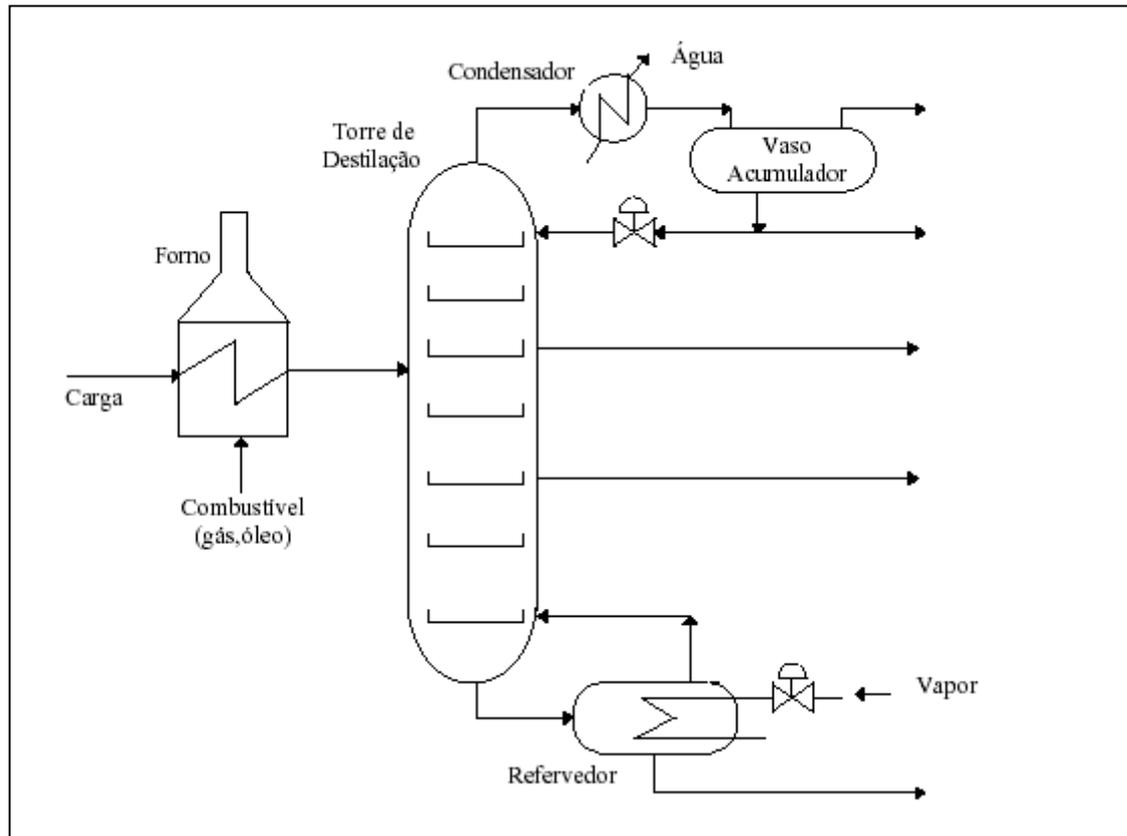


Figura 2.2 – Estrutura básica de uma torre de destilação.

### 2.2.1 - Torre de Destilação com estrutura de Pratos

A figura 2.3 mostra um corte longitudinal de um setor de uma torre com estruturas de pratos de um só vazante. Tal como se observa, os vazantes dos pratos vão alternando-se a um lado e ao outro da torre sucessivamente obrigando o líquido a percorrer um longo caminho em ziguezague para a parte inferior da torre. O gás se desloca na direção contrária, isto é para cima, tal como indicam as setas e passa de um prato à região do prato imediatamente superior através de dutos localizados na parte ativa dos mesmos onde se realiza o contato entre o líquido que baixa e o gás que sobe.

Os dutos podem ser simples orifícios ou estruturas compostas por partes rígidas ou móveis cuja função é ajudar a impedir o deslocamento do líquido para baixo, através dos dutos, facilitando o transporte do gás para cima de modo de forçar o contato gás-líquido sobre a parte ativa do prato.

Existem pratos com dois e três vazantes cada um, pratos de chaminés e outros para funções especiais.

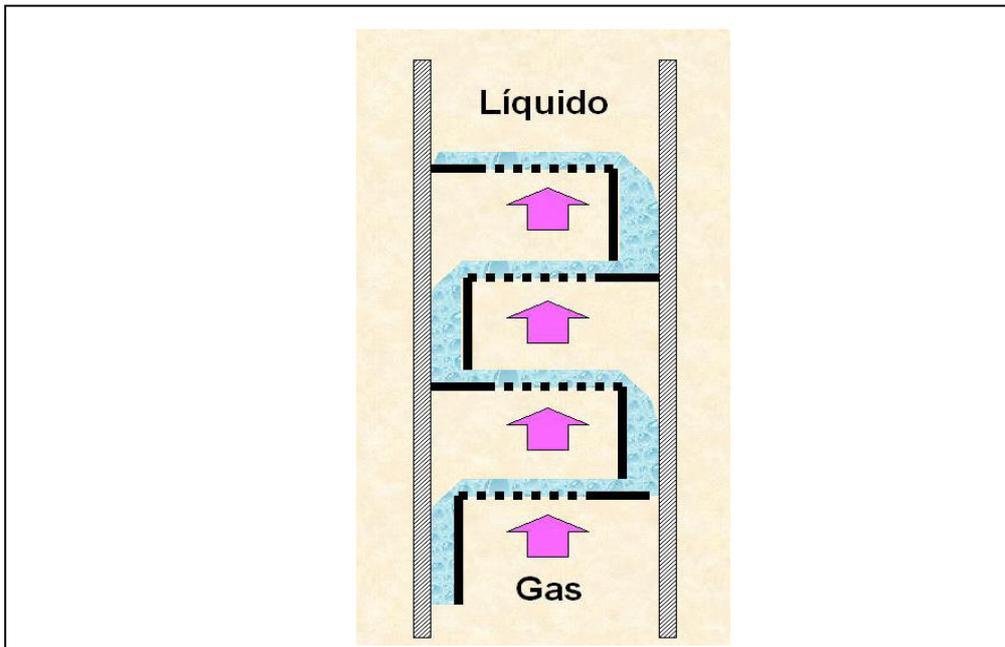


Figura 2.3 – Torre de destilação com estrutura de pratos ou bandejas.

### 2.2.2 - Torres de Recheio

As Colunas Empacotadas são usadas com maior frequência, para remover os contaminantes de um fluxo de gás (por **absorção**, operação em que a transferência de massa ocorre da fase gasosa para a fase líquida). Porém, elas também são aplicadas na remoção de componentes voláteis de um fluxo líquido, por contato com um gás inerte que escoar em contra-corrente (por **desorção**, ou seja, a operação inversa da anterior, onde a transferência de matéria é da fase líquida para a gasosa). Além disso as "Torres de Recheio" (figura 2.4), como também são chamadas, também são utilizadas na **destilação**, operação na qual a separação é particularmente difícil, devido a proximidade dos pontos de ebulição dos componentes da mistura.

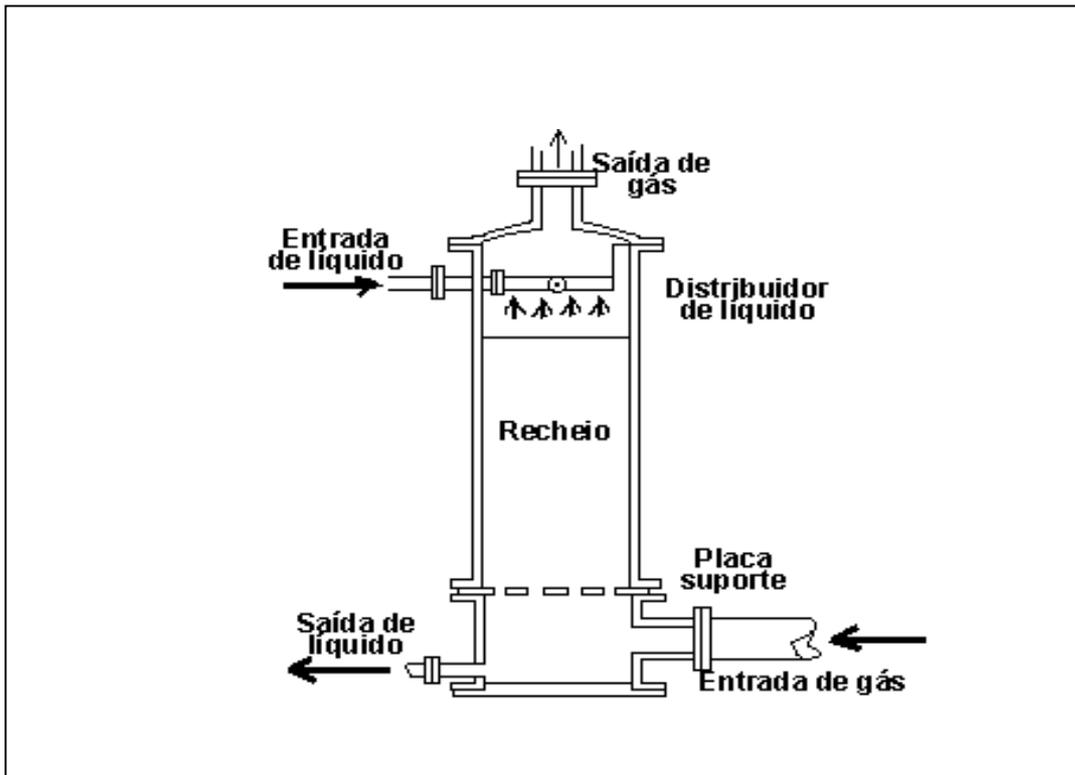


Figura 2.4 – Esquema de uma Torre de Recheio.

### 2.3. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Existem vários tipos de radiação ionizante: partículas elementares ( $\beta$ , nêutrons, prótons, radiação eletromagnética) e núcleos complexos ( $\alpha$ , dêuterons, íons pesados).

Sob o aspecto físico, as radiações ao interagir com um material, podem nele provocar excitação atômica ou molecular, ionização ou ativação do núcleo.

Pode-se agrupar as radiações segundo propriedades similares de carga e massa:

- a) grupo das partículas carregadas: pesadas ( $\alpha$ , prótons, dêuterons, trítions,...) e leves (elétrons ( $e^-$ ,  $e^+$ ) e partículas betas ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ )), fragmentos de fissão e íons pesados;
- b) grupo das partículas sem carga, com massa: (nêutrons e neutrinos);
- c) grupo das radiações eletromagnéticas: FÓTONS ( $\gamma$  e X).

#### 2.3.1-RADIAÇÕES DIRETAMENTE E INDIRETAMENTE IONIZANTES

$\Rightarrow$  radiação diretamente ionizante (grupo a): por causa da carga elétrica da partícula, a radiação incidente interage continuamente com os elétrons do meio absorvedor, perdendo energia diretamente por ionização e/ou excitação ao passar pela matéria.

⇒ radiação indiretamente ionizante (grupos b e c): por não possuírem carga, como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons, a radiação incidente não está sujeita à força coulombiana. Assim esta radiação deve primeiramente sofrer uma interação “catastrófica” que vai alterar radicalmente, num encontro único, as propriedades da radiação incidente. Esta interação resultará numa transferência total ou parcial da energia da radiação incidente para os elétrons, núcleos dos átomos ou partículas carregadas ( produto da reação nuclear ).

### **2.3.2-INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA**

As radiações X e  $\gamma$  são radiações eletromagnéticas ionizantes de maior interesse para aplicação na indústria, pois devido ao seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, essas radiações podem penetrar em um material, percorrendo grandes espessuras antes de sofrer uma interação. Este poder de penetração depende da probabilidade ou secção de choque de interação para cada tipo de evento que pode absorver ou espalhar a radiação incidente. A penetrabilidade dos raios X e  $\gamma$  é muito maior que das partículas carregadas, e a probabilidade de interação depende muito do valor de sua energia.

Os principais modos de interação, excluindo as reações nucleares, são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares.

### 2.3.2.1 - EFEITO FOTOELÉTRICO

No efeito fotoelétrico a energia do fóton X ou  $\gamma$  é totalmente transferida a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética  $E_c$  bem definida,

$$E_c = h\nu - B_e$$

onde  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a frequência da radiação e  $B_e$  é a energia de ligação do elétron orbital (figura 2.5).

Este elétron expelido do átomo (denominado fotoelétron, radiação secundária ou ainda emissão corpuscular associada), poderá perder a energia recebida do fóton, produzindo ionização em outros átomos

A direção de saída do fotoelétron com relação à de incidência do fóton, varia com a energia deste. Assim, para altas energias (acima de 3 MeV), a probabilidade do fotoelétron ser ejetado para frente é alta; para baixas energias (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de  $70^\circ$ . Isto devido a ação dos campos elétrico e magnético que, variando na direção perpendicular do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de  $90^\circ$ , e se compõe com o momento angular do elétron.

O efeito fotoelétrico é predominante em baixas energias e para elementos de elevado número atômico  $Z$ . O efeito fotoelétrico decresce rapidamente quando a energia aumenta (outros efeitos começam a se tornar predominantes), e é observado para energias tão baixas quanto a da luz visível.

O efeito fotoelétrico é proporcional a  $Z^4$ , e por esse motivo pode ser usada blindagem de chumbo para absorção de raios  $\gamma$  ou X de baixas energias.

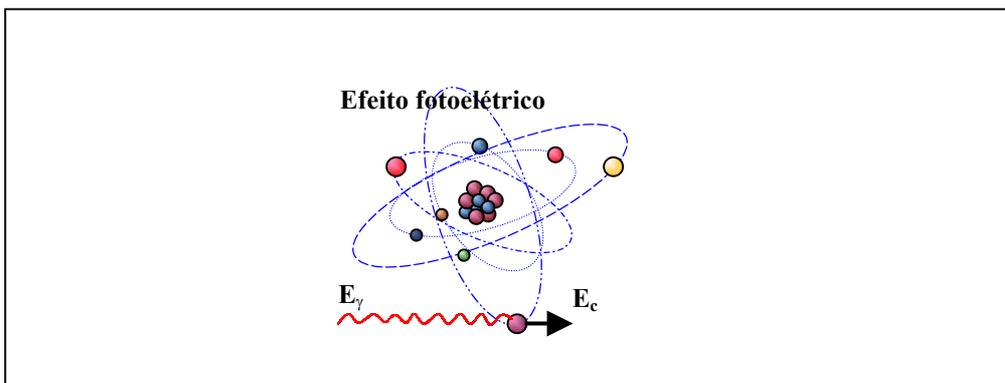


Figura 2.5 – Esquema do Efeito Fotoelétrico.

### 2.3.2.2 - EFEITO COMPTON

Quando a energia da Radiação X ou  $\gamma$  aumenta, o espalhamento Compton torna-se mais freqüente que o efeito fotoelétrico. O efeito Compton é a interação de um fóton com um elétron orbital onde parte da energia do fóton incidente é transferida como energia cinética para o elétron e o restante é cedida para o fóton espalhado, levando-se em consideração também a energia de ligação do elétron (figura 2.6). O fóton espalhado terá uma energia menor e uma direção diferente da incidente.

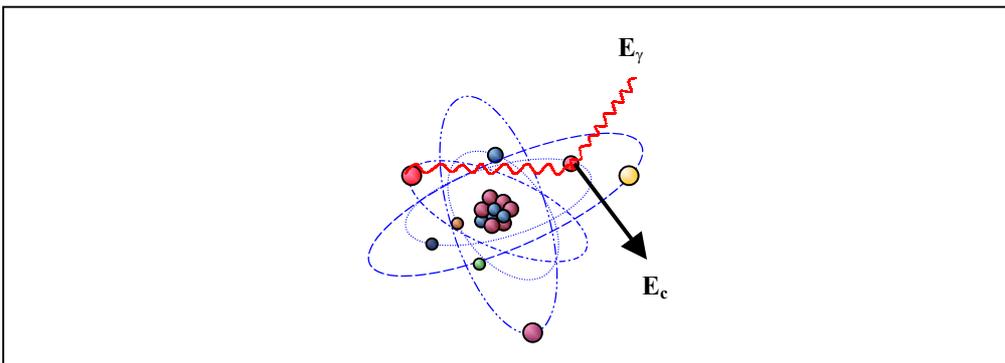


Figura 2.6 – Esquema do Efeito Compton

### 2.3.2.3 - PRODUÇÃO DE PARES

A produção de pares ocorre somente quando fótons de energia igual ou superior a 1,022 MeV passam próximos a núcleos de elevado número atômico. Nesse caso, a o fóton interage com o núcleo e desaparece, dando origem a um par elétron-pósitron com energia cinética em diferente proporção ( figura 2.7 ).

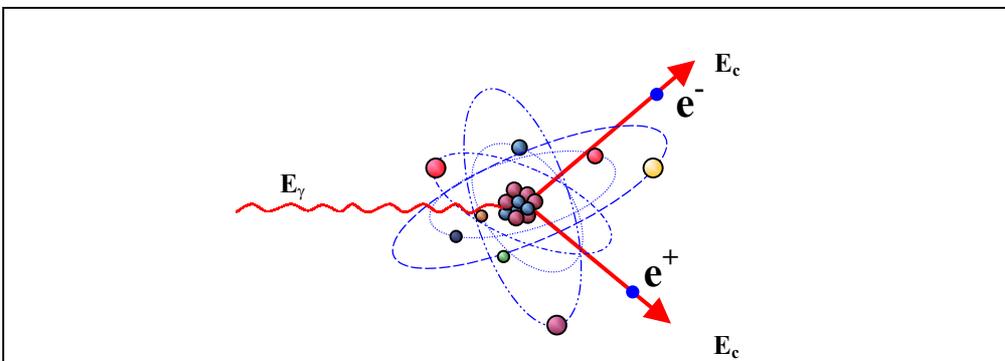


Figura 2.7 – Esquema da Produção de Pares.

### 2.3.3 - A ENERGIA DO FÓTON NOS PROCESSOS COMPETITIVOS

As interações fotoelétricas predominam para todos materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida em que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton diminua em termos absoluto, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a contribuição predominante para as interações com fótons. A figura mostra a variação da participação de cada um desses processos para a variação de Z do meio absorvedor e da energia dos fótons.

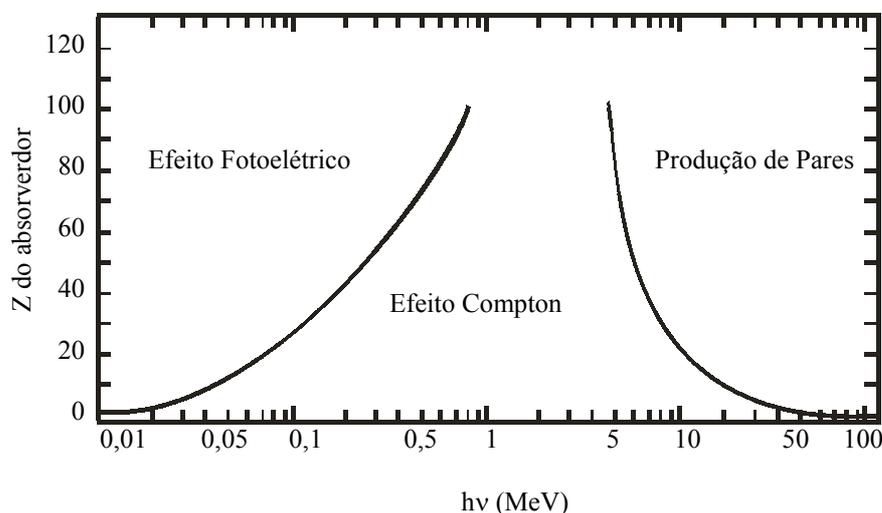


Figura 2.8 – Importância relativa dos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia e do Z do absorvedor.

#### 2.3.3.1 - COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR

Um feixe de radiação  $\gamma$  ou X quando incide sobre um material de espessura X, absorve parte dessa radiação pelos processos já descritos, parte do feixe é espalhada e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade do feixe que emerge está associada à intensidade  $I_0$  do feixe incidente, pela relação Beer-Lambert, sendo válida para um feixe de radiação monoenergética:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

onde  $\mu$  é a probabilidade do feixe sofrer atenuação devido aos processos de absorção fotoelétrica, espalhamento Compton ou formação de pares, sendo denominado de Coeficiente de Atenuação Total ou Linear, podendo ser escrito como:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

onde

$\tau$  = coeficiente de atenuação linear devido ao efeito fotoelétrico;

$\sigma$  = coeficiente de atenuação linear Compton total (espalhamento e absorção);

$\kappa$  = coeficiente de atenuação linear devido à formação de pares.

### 2.3.3.2-COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO EM MASSA E SECÇÃO DE CHOQUE MICROSCÓPICA

O coeficiente de atenuação linear de massa independe do estado físico do material, pois é definido como a razão entre o coeficiente de absorção linear  $\mu$  e a densidade  $\rho$  do material absorvedor.

$$\mu_m = \mu / \rho \text{ [cm}^2\text{/g]}$$

Os efeitos fotoelétricos, Compton e formação de pares, muitas vezes são tabelados segundo sua secção de choque microscópica de interação, assim o vínculo entre estes diversos valores é dado pelas relações:

$$\frac{\tau}{\rho} \text{ ( cm}^2\text{/g)} = \tau_f \cdot \frac{1}{A} \cdot N_A \quad \text{( Efeito fotoelétrico )}$$

$$\frac{\sigma}{\rho} \text{ ( cm}^2\text{/g)} = \sigma_e \cdot \frac{Z}{A} \cdot N_A \quad \text{( Efeito Compton )}$$

$$\frac{\kappa}{\rho} \text{ ( cm}^2\text{/g)} = \kappa_p \cdot \frac{1}{A} \cdot N_A \quad \text{( Formação de Pares )}$$

onde  $\tau_f$  ,  $\sigma_e$  e  $\kappa_p$  são respectivamente, as secções de choque microscópicas para o efeito fotoelétrico (cm<sup>2</sup>/átomo), Compton (cm<sup>2</sup>/elétron) e formação de pares (cm<sup>2</sup>/átomo);

A = número de massa (g/mol) ,  $N_A$  = N° de Avogadro e Z = número atômico.

## 2.4 - O DETECTOR DE NaI(Tl)

Durante a década de 1950 começaram a ser desenvolvidos detectores de cintilação de elevada eficiência, grande rapidez de resposta (da ordem dos nanossegundos) e com uma razoável resolução em energia ( $0,08 \sim \Delta E/E$  para o fotopico de 662 keV do  $^{137}\text{Cs}$ ) baseados em cristais inorgânicos. Um passo fundamental no desenvolvimento deste tipo de detectores foi a criação de tubos fotomultiplicadores capazes de detectarem sinais luminosos muito fracos (um número pequeno de fótons) e de os converterem em sinais elétricos. De fato, já eram conhecidos materiais cintiladores há muitos anos, mas a impossibilidade de converter o sinal luminoso num sinal elétrico tinha até então impedido a sua utilização na detecção de radiações nucleares.

O iodeto de sódio é um material que pode se apresentar na forma cristalina e que ao absorver radiações ionizantes emite fótons de cintilação. Na figura 2.9 está esquematizada a situação de absorção de um fóton de energia elevada ( $E > 10 \text{ keV}$ ).

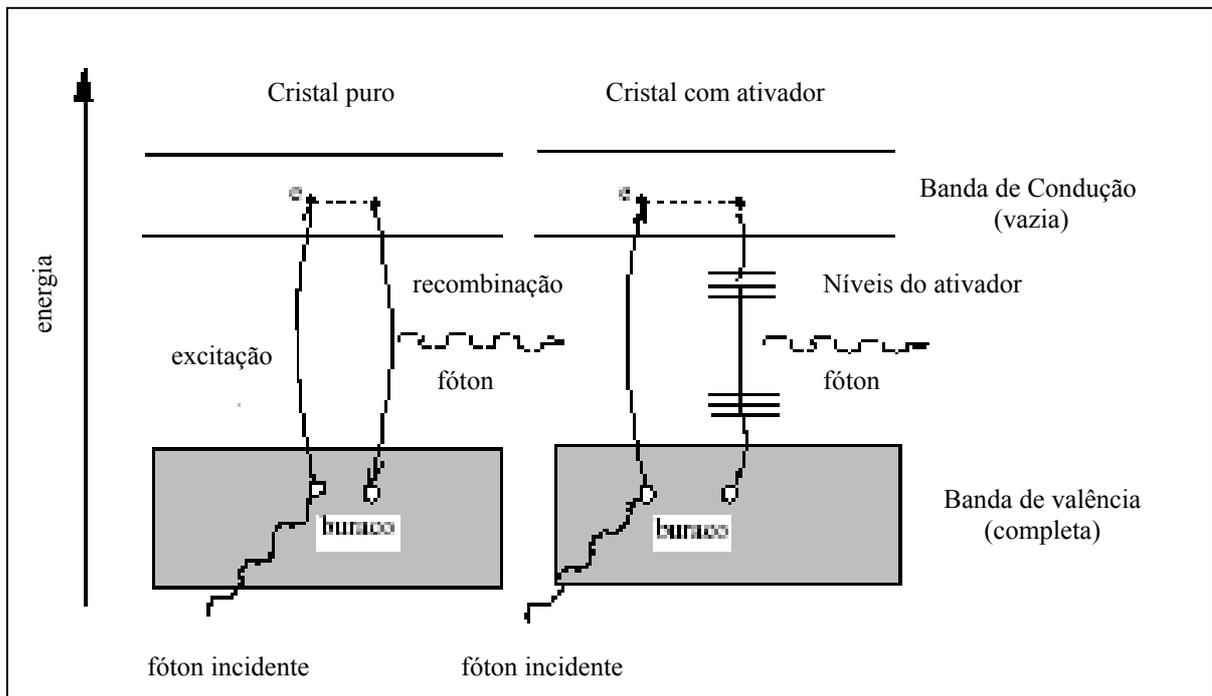


Figura 2.9 – Esquema de absorção de um fóton de energia elevada.

Num cristal puro, a energia da radiação incidente absorvida é cedida aos elétrons da banda de valência, sendo estes excitados para a banda de condução (que inicialmente se encontra vazia). Quando os elétrons da banda de condução se desexcitam emitem um fóton. Este fóton (de cintilação) tem uma energia que é igual à energia perdida pelo elétron quando transitou da banda de condução para a banda de valência. Por esse motivo pode ser absorvido por um elétron da banda de valência, que passará para banda de condução. O resultado prático deste processo é o de que o cristal ser opaco à sua radiação de cintilação sendo pequena a quantidade de luz que sai. Para contornar esta situação utiliza-se pequenas quantidades de um material, chamado ativador (no caso do NaI é usado tálio) e cujo papel é o de criar níveis de energia ligeiramente acima da banda de valência e ligeiramente abaixo da banda de condução. Normalmente, estes níveis de energia encontram-se vazios, mas quando um elétron é excitado para a banda de condução, pode agora desexcitar-se em primeiro lugar para um dos níveis abaixo da banda de condução. Em seguida o elétron pode desexcitar-se para os níveis acima da banda de valência emitindo o fóton de cintilação e finalmente regressando à banda de valência. Agora, o fóton de cintilação não possui energia suficiente para fazer a transição de um elétron da banda de valência para a de condução, não podendo ser absorvido por esse processo. O cristal é transparente para estes fótons, que assim conseguem atravessá-lo chegando ao tubo fotomultiplicador. No caso do NaI(Tl) o comprimento de onda dos fótons emitidos situa-se numa banda com o valor máximo em 410 nm

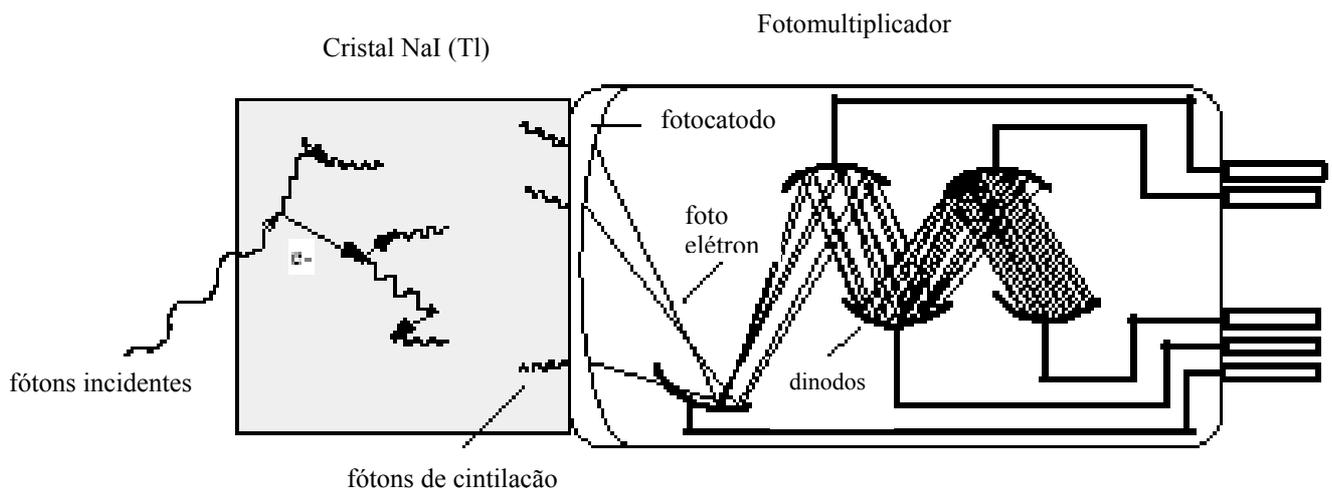


Figura 2.10 – Representação da detecção da radiação no cristal cintilador e no tubo fotomultiplicador

No tubo fotomultiplicador, o fóton de cintilação é absorvido pelo fotocatodo que é constituído por um material fotossensível depositado no interior da ampola de vidro. Do fotocatodo são libertados elétrons por efeito fotoelétrico. Por ação de um campo elétrico estes fotoelétrons são focalizados numa placa metálica, o primeiro dinodo. Por cada fotoelétron que atinge o dinodo vários elétrons são libertados sendo acelerados para o dinodo subsequente, por um campo elétrico. Em cada estágio existe assim uma amplificação da corrente eletrônica. A utilização de vários andares (em geral de 10 a 12) permite obter ganhos da ordem de  $10^6$  a  $10^8$ . À saída do tubo fotomultiplicador o sinal em corrente é convertido num sinal em tensão através do uso de uma resistência de valor elevado ( $\sim 1\text{M}\Omega$ ) podendo o valor do sinal obtido ser da ordem de dezenas de volt.

Embora o detector de NaI(Tl) seja um dos detectores sólidos mais "antigos", e apresente uma resolução em energia limitada, tem a seu favor vários atrativos, para além dos já referidos, relativo aos detectores de cintilação em geral, pode-se listar: É um detector relativamente barato, de manutenção fácil, é robusto e fácil de usar (não requer instalações de frio ou vácuo). Sendo um detector compacto e relativamente denso, apresenta também uma eficiência superior à maioria dos outros detectores de radiação gama, sendo por isso indicado para trabalhar com fontes radioativas não muito intensas.

## 2.5 -TEORIA DA TRANSMISSÃO GAMA

Quando um feixe de radiação gama monoenergético, de intensidade  $I_0$ , emitido por uma fonte, atravessa um material homogêneo de espessura  $x$ , sofre atenuação, de modo que a intensidade  $I$  do feixe emergente é representada pela lei de Beer-Lambert (figura 2.10)

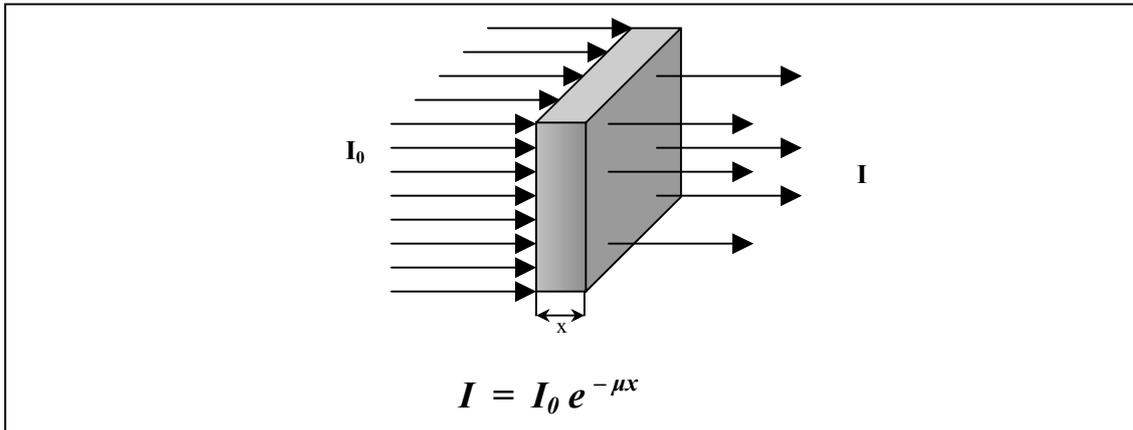


Figura2.10- Feixe monoenergético de radiação  $\gamma$  atenuado por um material homogêneo.

Para um absorvedor composto de  $n$  camadas de elementos e espessuras diferentes, a intensidade  $I$  do feixe transmitido é ilustrado na figura 2.11:

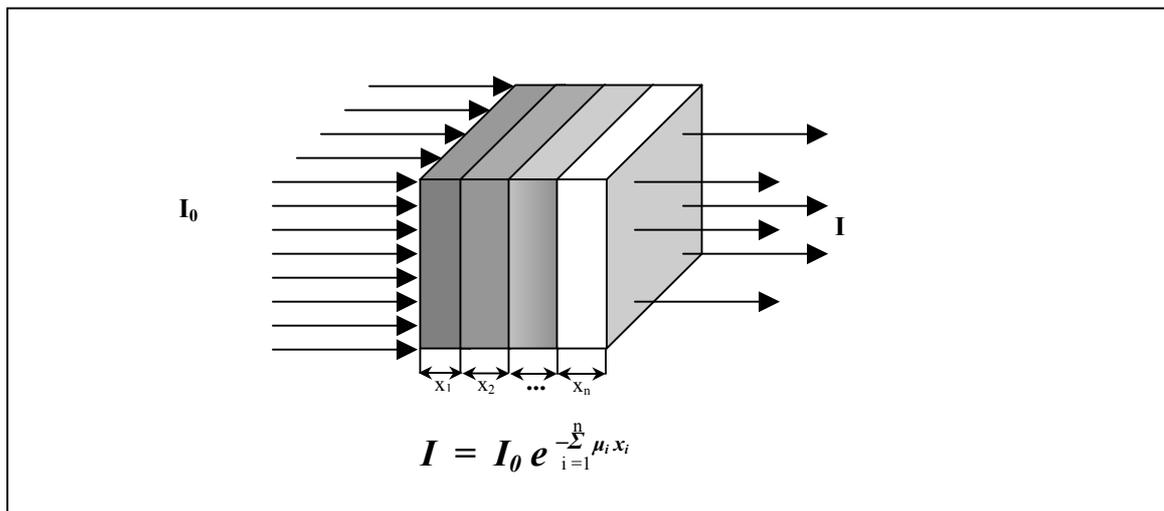


Figura 2.11-Feixe monoenergético de radiação  $\gamma$  atenuado por um material não homogêneo, constituído de  $n$  camadas de diversas espessuras com diferentes coeficientes de atenuação.

## 2.6 - APLICAÇÃO DA TÉCNICA EM COLUNAS INDUSTRIAIS

Quando se interpõe um material entre uma fonte emissora de radiação gama e um detector, a intensidade de radiação original é atenuada devido as interações entre os fótons e os átomos do material( Lei de Beer-Lambert ). O grau de atenuação sofrido pelo feixe incidente é função da densidade do material interposto.

O escaneamento gama consiste em deslocar, de forma simultânea, uma fonte radiativa e um detector ao longo da coluna sob estudo. Ambos costumam estar localizados (ainda que não seja a única possibilidade) em forma diametralmente oposta, ficando a coluna interposta entre ambos. Líquido, gás, espuma, pratos, empacotamentos e qualquer outro componente que se encontre no interior da coluna atenuarão o feixe de radiações em diferentes graus. Em consequência, registra-se a resposta do detector em função da altura, obtendo-se um perfil vertical de densidade no que, com certa prática, pode reconhecer-se cada componente (FULHAM, 1975).

A Figura 2.12 representa esquematicamente alguns dos componentes que podem encontrar-se numa coluna e a resposta ideal que se obteria ao efetuar um perfil gama. Mas, numa coluna de destilação real, existem muitas outras regiões em seu interior formadas por materiais diversos, uns de tipo estrutural fixo como bandejas, tubagens e chaminés, e outros compostos pelos fluidos sob tratamento, os quais podem estar em fase líquida ou gasosa e podem deslocar-se continuamente ao longo da estrutura interna da coluna ou torre. Deste modo, a representação de um perfil gama de um sistema real dinâmico, bem como sua interpretação, resulta ser bem mais complexa do que o diagrama exposto na Figura 2.12, (CANO, 1999).

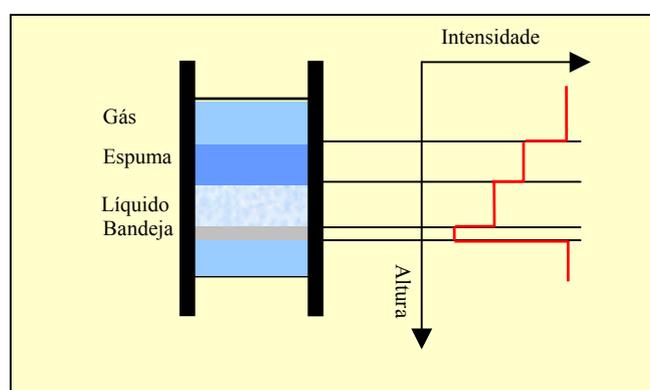


Figura 2.12 – Perfil gama de uma coluna industrial

## 2.7 MODELO TEÓRICO DO PERCURSO DO FEIXE COLIMADO NO DUTO

A figura 2.13 é a representação do sistema fonte-detector, numa varredura da seção reta do duto, na direção do eixo x.

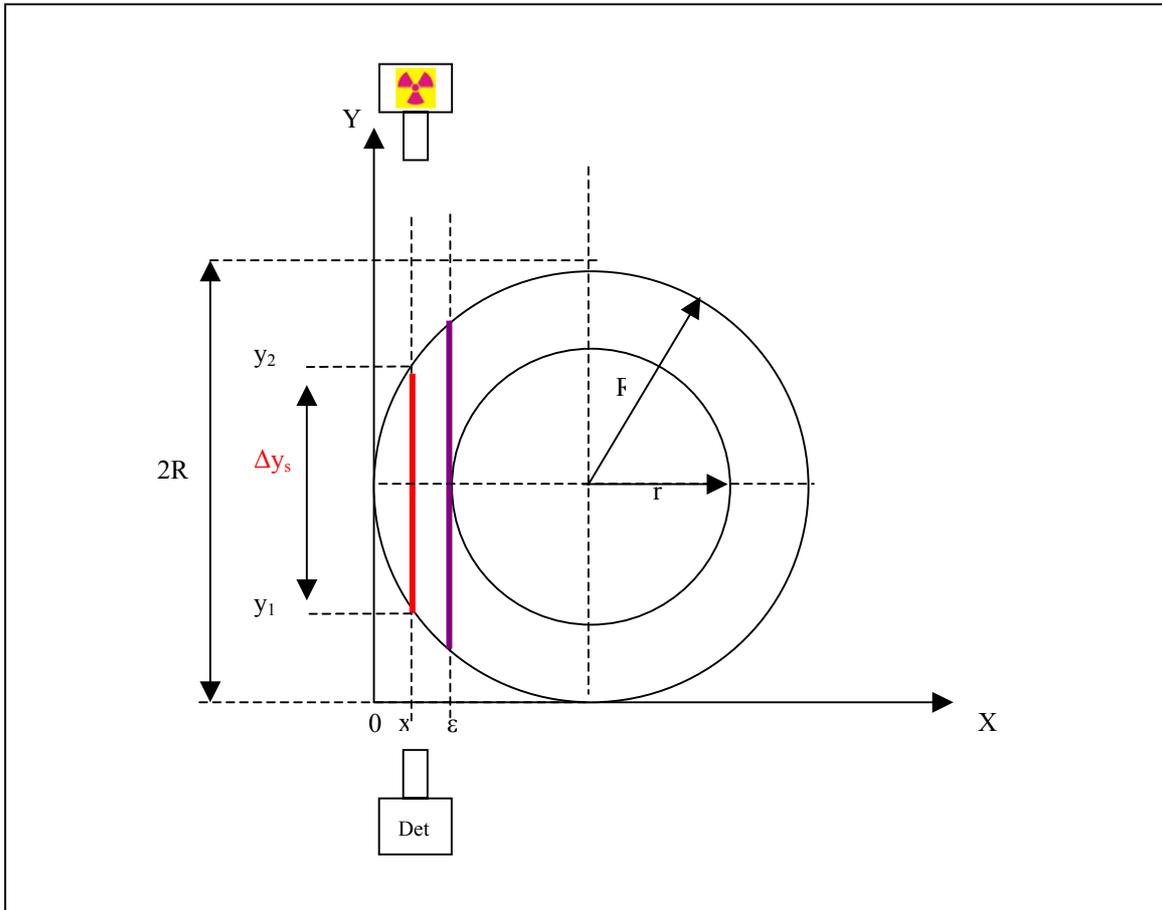


Figura 2.13 – Varredura do feixe numa seção reta do duto.

Considerando a distância fonte-detector como  $2R$ , ou seja, o sistema fonte detector faz a varredura tangenciando o duto, então a intensidade do feixe pode ser escrita como:

$$I = I_0 \exp(-\mu_s \Delta y_s - \mu_{ar} \Delta y_{ar}) \dots (2.1)$$

Onde:

$\Delta y_s$  é o percurso do feixe na parede do duto.

$\Delta y_{ar}$  é o percurso do feixe no ar  $\Delta y_{ar} = 2R - \Delta y_s \dots 2.2$

Cálculo de  $\Delta y$ :

Considerando o eixo cartesiano  $xy$

A equação da circunferência deslocada de  $R$  em  $x$  e  $y$ , é:

$$(y - R)^2 + (x - R)^2 = R^2$$

$$(y - R)^2 = R^2 - (x - R)^2$$

$$y - R = \pm [R^2 - (x - R)^2]^{1/2}$$

$$y = R \pm [R^2 - (x - R)^2]^{1/2}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 \quad \therefore$$

$$\Delta y_s = 2 [(R^2 - (x - R)^2)]^{1/2} \quad \dots (2.3)$$

Para o percurso do feixe no ar ( $\Delta y_{ar}$ ):

Substituindo 2.3 em 2.2

$$\Delta y_{ar} = 2R - 2 [(R^2 - (x - R)^2)]^{1/2} \quad \dots (2.4)$$

Substituindo (2.3) e (2.4) em (2.1), vem:

$$I = I_0 \exp\{ -\mu_s 2 [R^2 - (x - R)^2]^{1/2} - \mu_{ar} (2R - 2 [R^2 - (x - R)^2]^{1/2}) \}$$

Dessa forma a intensidade do feixe transmitido em função da varredura ao longo do eixo  $x$ , é dada por:

$$I = I_0 \exp\{ -2 [(\mu_s - \mu_{ar}) [R^2 - (x - R)^2]^{1/2} + \mu_{ar} R] \} \quad \dots (2.4) \quad [ \forall 0 < x \leq \varepsilon ]$$

Onde  $\mu_s$  e  $\mu_{ar}$  são respectivamente os coeficientes de atenuação linear médio do material do duto e do ar.

$\varepsilon$  é o ponto no eixo x, cujo feixe tangencia a parede do diâmetro interno do duto, o que leva ao valor da espessura do mesmo.

Para o cálculo da espessura  $\varepsilon$ , vem:

$$I = I_0 \exp\{-2[(\mu_s - \mu_{ar})[R^2 - (x - R)^2]^{1/2} + \mu_{ar}R]\} \dots (2.4)$$

$$\text{Fazendo } k = 2\{(\mu_s - \mu_{ar})[R^2 - (x - R)^2]^{1/2} + \mu_{ar}R\}$$

$$I = I_0 \exp(-k)$$

$$I/I_0 = \exp(-k)$$

$$\ln(I/I_0) = -k \Rightarrow k = \ln(I_0/I)$$

$$[R^2 - (x - R)^2]^{1/2} = (k/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})$$

$$R^2 - (x - R)^2 = [(k/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})]^2$$

$$(x - R)^2 = R^2 - [(k/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})]^2$$

$$x = R \pm \{R^2 - [(k/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})]^2\}^{1/2} \therefore$$

A equação considerada para espessura é:

$$\varepsilon = R - \{R^2 - [(k/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})]^2\}^{1/2}$$

como  $k = \ln(I_0/I)$

então:

$$\varepsilon = R - \{R^2 - [(\ln(I_0/I)/2 - \mu_{ar}R)/(\mu_s - \mu_{ar})]^2\}^{1/2} \dots (2.5)$$

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE INSPEÇÃO

O sistema de inspeção constitui de uma fonte de radiação gama, um detector cintilador e um sistema eletrônico de contagem, esquematizados na figura 3.1

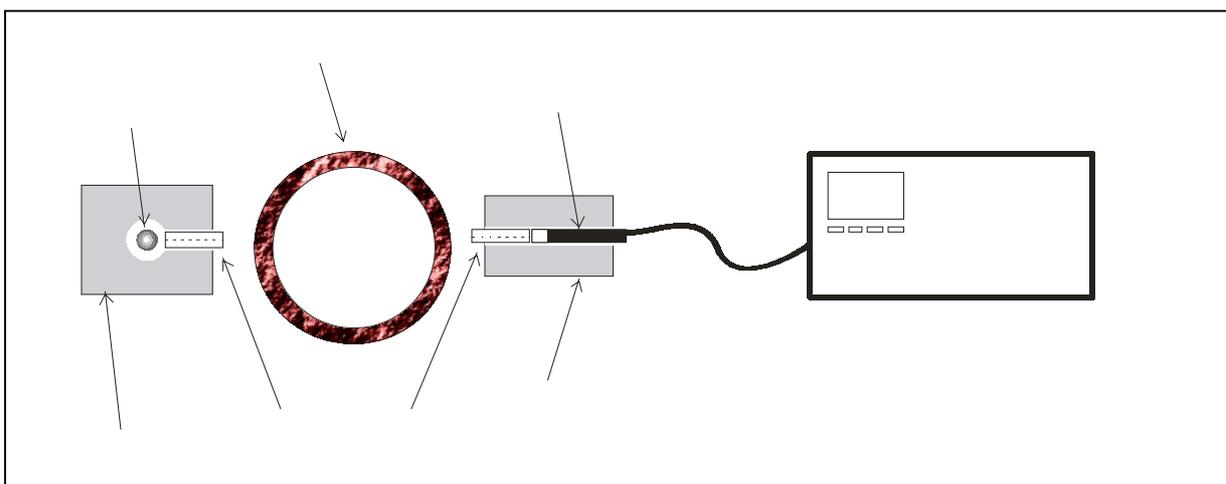


Figura 3.1. Esquema do sistema de inspeção.

#### 3.1.1 - SISTEMA FONTE-DETECTOR

Compreende-se como sistema fonte-detector, a fonte de radiação gama, o detector cintilador e seus respectivos colimadores e blindagens.

#### 3.1.2 - FONTE DE RADIAÇÃO

A fonte utilizada como emissor gama no sistema foi de Césio-137, com atividade de 3,7 GBq. Esta fonte é de geometria esférica com 3mm de diâmetro encapsulada em cilindro de aço inox, com 6mm de diâmetro e 8mm de altura, fabricada com o código CDC 809 pela Amersham International PLC 11/12/92 (2).

Essa fonte emite fótons monoenergéticos de 662 keV. Para essa energia os efeitos predominantes na interação são os efeitos fotoelétricos e Compton.

A vantagem do uso da fonte de Césio-137 é sua meia vida longa (30,1 anos), o que dispensa freqüentes correções nas taxas de contagens e elimina a necessidade de uma eventual substituição da mesma em razão do processo de decaimento.

### 3.1.3 – DETECTOR NaI(Tl)

O detector utilizado foi um cintilador com cristal de Iodeto de Sódio ativado com Tálcio [NaI(Tl)] com dimensões do cristal de 1”x 1”. A tensão de operação do detector é da ordem de 750V.

### 3.1.4 - ELETRÔNICA ASSOCIADA

O sistema eletrônico de contagem é composto de fonte de alta-tensão, pré-amplificador, contador temporizador e analisador com uma janela fixa com a altura de pulso pré definida e está integrado em um único módulo, SIMDAP – Sistema de Medidas em Águas Profundas (figura 3.2).

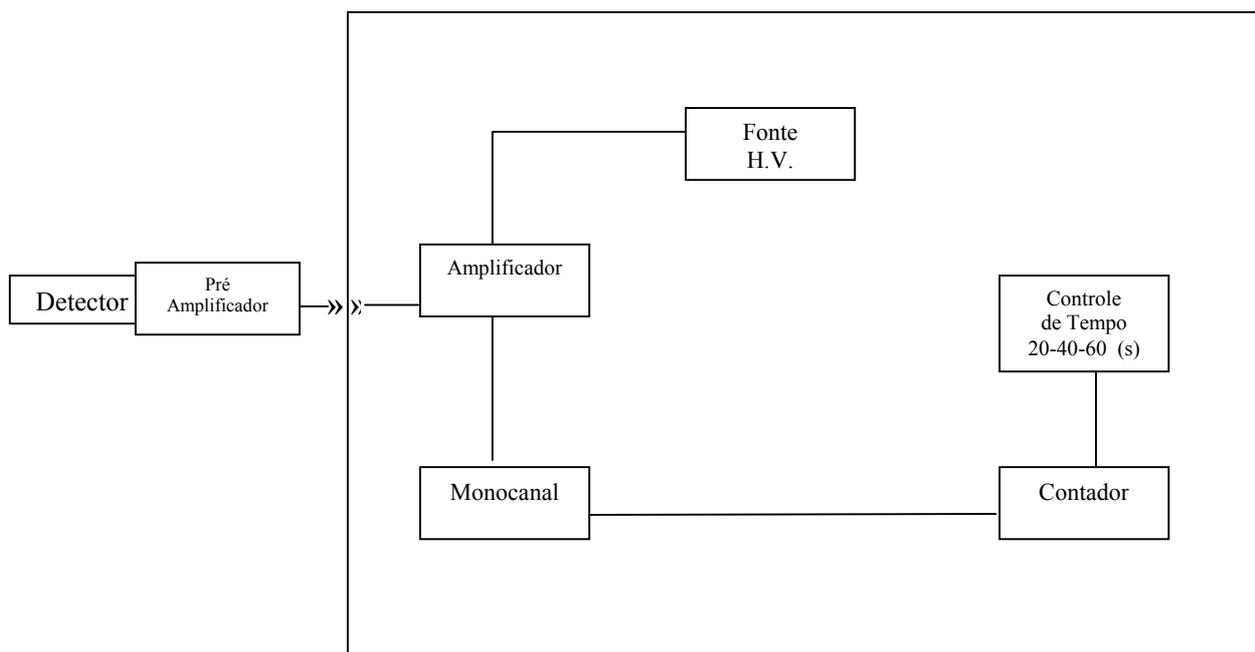


Figura 3.2 - Estrutura básica do SIMDAP.

### 3.1.5 - BLINDAGENS E PORTA FONTE

A blindagem da fonte (cofre) foi confeccionada em chumbo (ASTUTO, 1995), consistindo de um cilindro de 120mm de diâmetro por 120mm de altura, onde as extremidades foram usinadas em forma de tronco de cone (figura 3.3). O centro da blindagem também foi usinado de modo a permitir, por um lado a entrada do porta fonte, e por outro o colimador. Desta forma, pode-se garantir que a blindagem da fonte possua, em qualquer direção (exceto na direção do feixe), uma espessura mínima de 60mm, o que garante que a taxa de dose equivalente seja reduzida a níveis toleráveis pelas normas de radioproteção. No caso de indivíduos não profissionais expostos, essa taxa corresponde a  $7,5 \mu\text{Sivert/h}$  à 1m de distância da fonte.

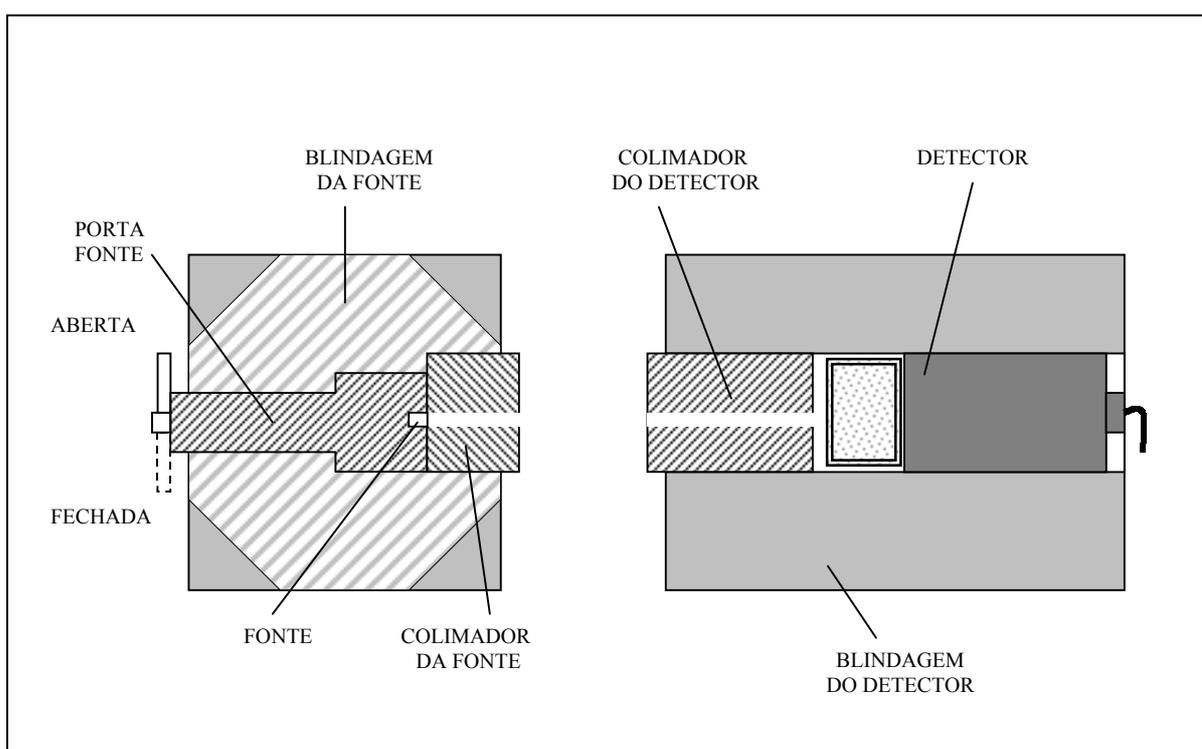


Figura 3.3 – Estrutura de Blindagem do Sistema

Para minimizar o efeito da radiação residual ambiente (“background”) nos resultados obtidos, testes preliminares indicaram que uma blindagem com espessura de 10mm em torno do cristal do detector, seriam suficientes para que não causasse alteração significativa nos resultados obtidos.

Para evitar que a fonte permaneça constantemente aberta, com o feixe incidindo permanentemente sobre o detector, mesmo quando o equipamento não estivesse sendo utilizado (o que acarretaria na redução da vida útil do cristal), e reduzir o risco de uma

dose desnecessária à um indivíduo que inadvertidamente se colocasse na direção do feixe, a cápsula que contém a fonte foi acondicionada em um pequeno cilindro de chumbo (porta-fonte), num orifício com excentricidade de 4mm em relação ao centro do cilindro. O porta-fonte e o cofre foram construídos de tal maneira que, através de uma alavanca na parte externa do cofre e conectada ao porta-fonte, pode-se deslocar a fonte cerca de 8mm do canal do feixe, através de um giro de 180° na mesma, reduzindo sua intensidade a níveis que não causem danos à integridade do cristal.

### 3.1.6 - COLIMADORES

A lei de atenuação é válida quando se considera feixes de fótons se propagando unidirecionalmente. A fonte considerada é isotrópica e emite radiação numa geometria  $4\pi$ , sendo necessário um sistema de colimação. Foram utilizados colimadores de chumbo com 40mm de diâmetro e 60mm de comprimentos com furos centralizados de 2mm, 3mm e 4mm de diâmetro, posicionados na fonte e no detector, conforme figura 3.3.

Uma colimação precisa é fundamental para se evitar erros devidos ao espalhamento dos fótons e minimizar a divergência do feixe a fim de que não haja distorções nas taxas de contagens obtidas na região inspecionada.

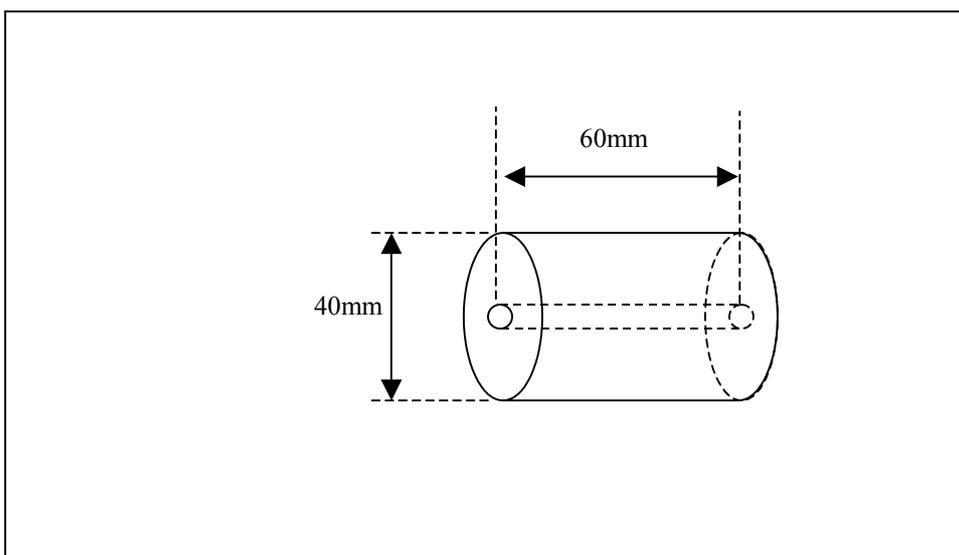


Figura 3.4 – Dimensões do Colimador

### 3.1.7 - CORPO DE PROVA

Uma amostra de duto flexível de 14cm de diâmetro externo utilizado pela Petrobrás em pontos de produção *offshore*, na condução de petróleo, gás e água, foi utilizada nos ensaios.



Figura 3.4 Corpo de prova utilizado nos ensaios.

## 3.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.2.1 - DUTOS FLEXÍVEIS

O ensaio foi realizado variando o conteúdo da amostra com óleo, água, areia e vazio, através de um sistema de contagem a partir do qual pela atenuação média da intensidade dos raios gama deseja-se identificar essas substâncias.

A amostra foi colocada sobre uma mesa com uma base circular que pode ser rotacionada e/ou transladada como mostra a figura 3.5, simulando os movimentos do sistema fonte-detector

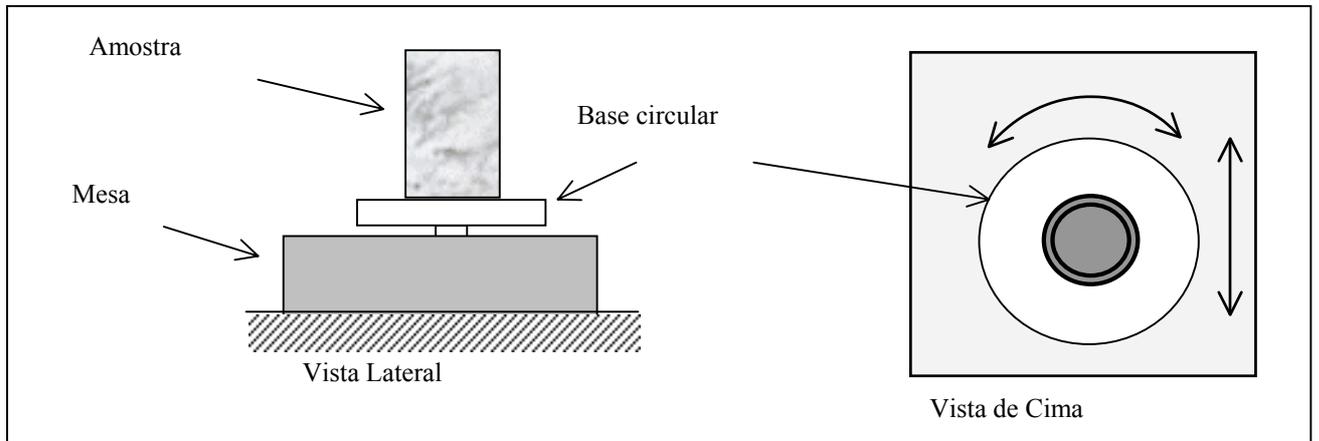


Figura 3.5 - Sistema de movimentação da amostra.

Em um primeiro momento levantou-se um perfil de contagens em função da posição angular, com o duto posicionado verticalmente, rotacionando-o a cada  $10^\circ$  e fazendo-se a contagem a cada 60s, obtendo-se assim um perfil para cada colimação no detector (2mm, 3mm e 4mm). Esse procedimento foi repetido com o duto vazio, e depois preenchido com óleo, água e areia (figura 3.6).

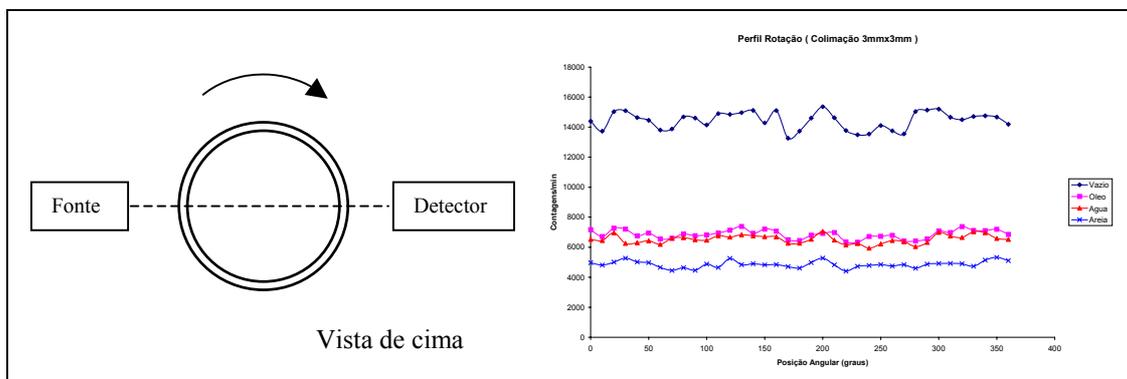


Figura 3.6 - Levantamento do perfil de rotação

O mesmo procedimento foi repetido para uma simulação em condições submarinas, onde fonte e detector estariam confinados num recipiente com paredes de aço com espessuras de 2,7mm. Para esse ensaio colocou-se duas placas de aço com espessuras de 2,7mm em frente da fonte e do detector, simulando-se assim a inserção do sistema fonte-detector num recipiente de aço hermeticamente fechado.

Em seguida levantou-se um perfil de contagens em função da posição linear, transladando o duto a cada 0,5 cm com os mesmos conteúdos (vazio, óleo, água e areia).

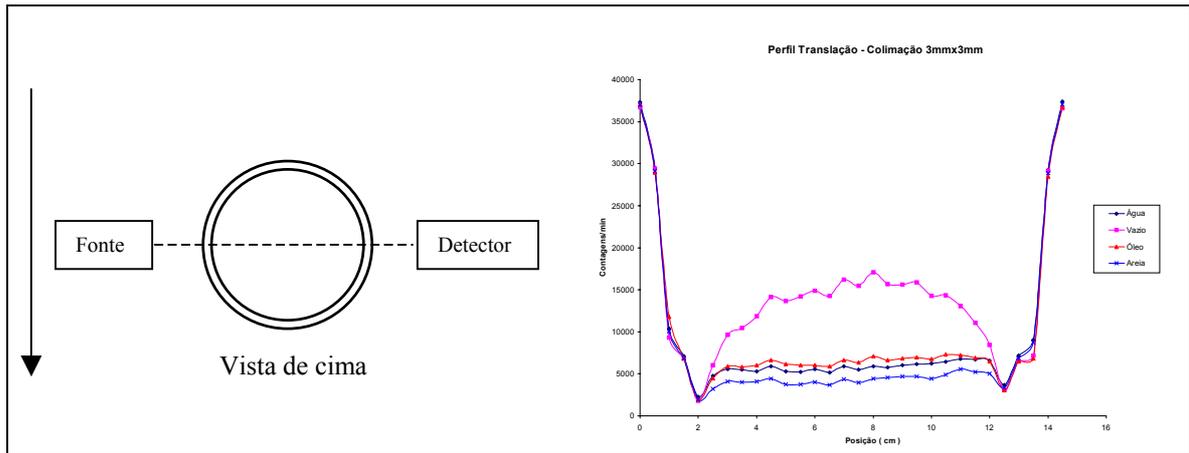


Figura 3.7 - Levantamento do perfil de translação.

Com o duto posicionado horizontalmente realizou-se um ensaio variando-se o volume de fluidos no interior do duto nas faixas de 20 a 80% para cada substância.

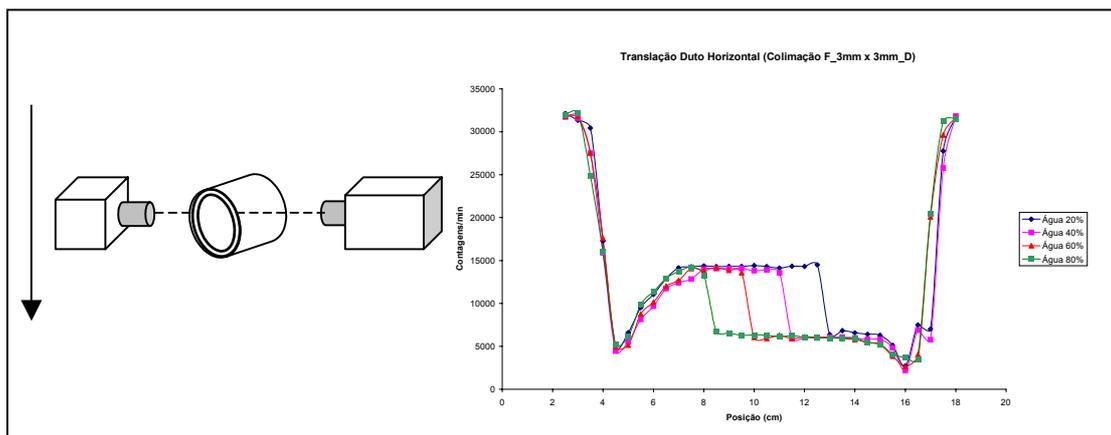


Figura 3.8 - Levantamento do nível de volume.

### 3.2.2 - COLUNAS INDUSTRIAIS

O mesmo sistema fonte-detector foi utilizado para o estudo de uma aplicação numa coluna industrial com revestimento refratário, com o objetivo de se averiguar a viabilidade de aplicação desse sistema em colunas industriais. O ensaio foi realizado simulando uma estrutura com tijolos refratários conforme mostra a figura 3.9.

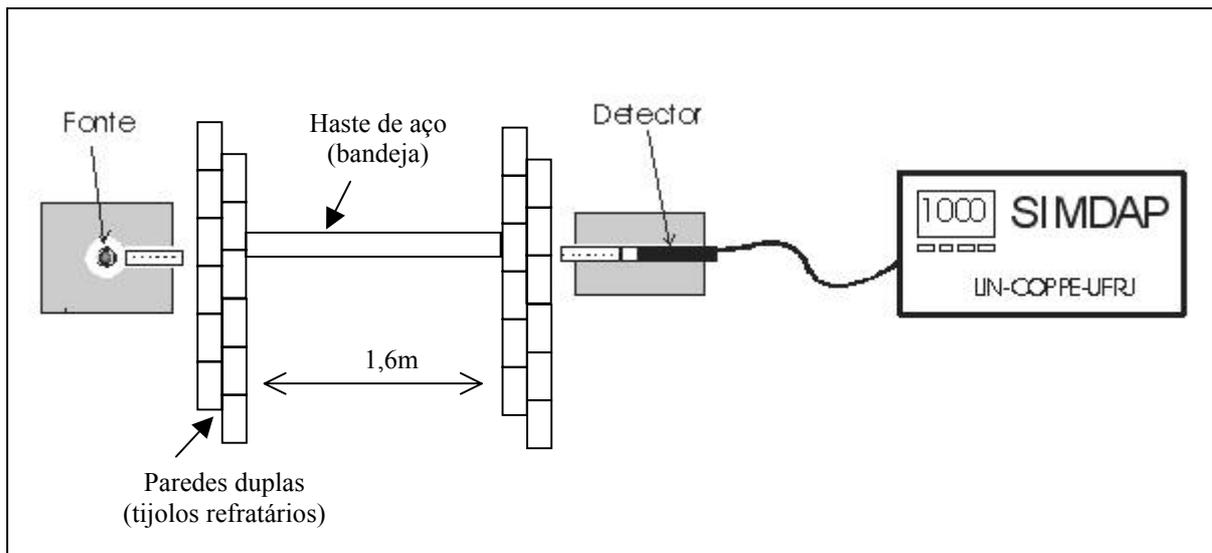


Figura 3.9 – Estrutura simulada da torre com revestimento refratário.

A partir da estrutura montada realizou-se o ensaio, simulando:

- Perda de material refratário;
- Localização de bandeja;
- Dano em bandeja.

O ensaio descrito foi realizado com uma colimação de 3mm na fonte e no detector.

Para o estudo da perda do material refratário o ensaio foi realizado da seguinte forma: com uma camada dupla de tijolos refratários em cada parede foi feita a contagem, representando a torre sem perda de material. Em seguida retirando-se parte de um dos tijolos realizou-se nova contagem, representando uma pequena perda do material refratário. Este procedimento foi feito retirando-se um e também dois tijolos inteiros, representando assim grande perda de material refratário, conforme mostra a figura 3.10.

A varredura foi feita com deslocamentos de 10cm para cada contagem. As hastes de aço simulam as posições das bandejas. No exemplo da figura 3.8 a bandeja 3 apresenta um defeito de posicionamento.

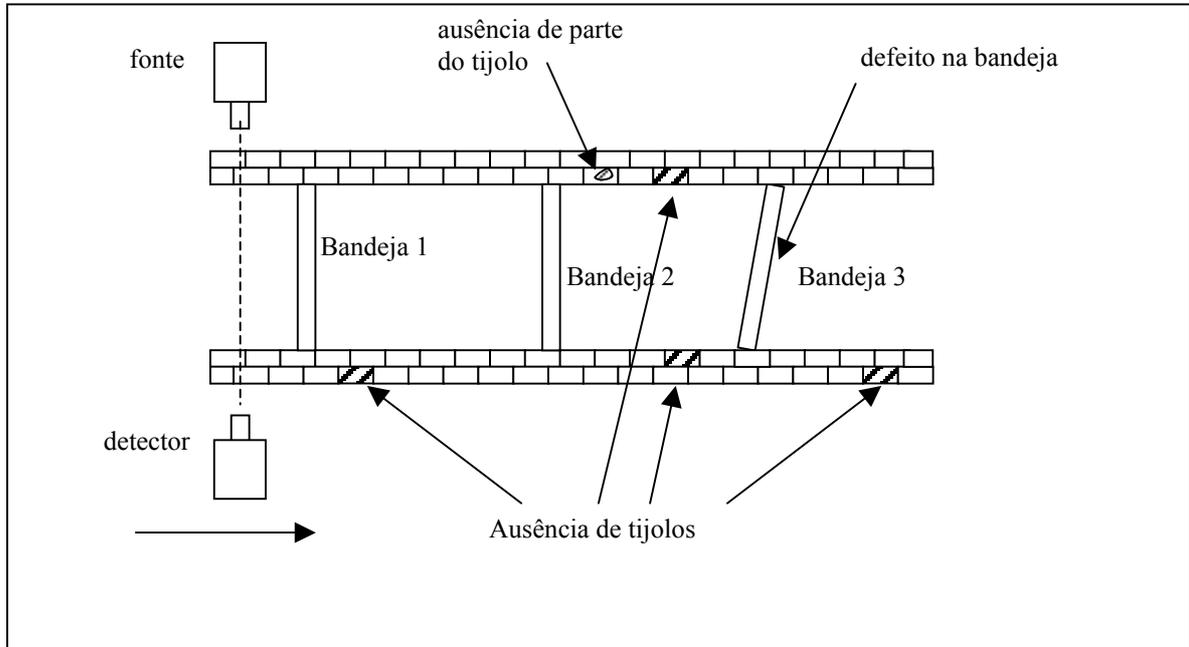


Figura 3.10 Representação do esquema de varredura e simulação de defeitos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E ANÁLISES

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados inicialmente o procedimento para estabilidade do sistema e também os resultados e análises dos ensaios realizados nos dois casos estudados.

#### 4.2 ESTABILIDADE DO SISTEMA

Mantendo-se aberto o sistema fonte-detector, sem barreira entre eles, realizou-se contagens a cada 5 minutos durante 90 minutos, levantando-se a curva de estabilização do sistema (figura 4.1), com o objetivo de se determinar o tempo necessário para estabilidade do mesmo, evitando assim que flutuações do detector não interferissem nos resultados.

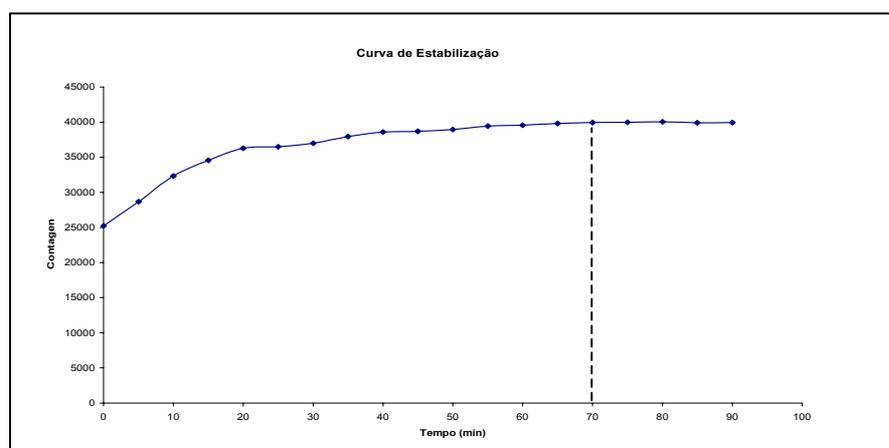


Figura 4.1 – Curva de Estabilização do Sistema

Analisando-se a curva de estabilização, observa-se que a partir de 50 minutos do sistema em funcionamento, a variação das contagens em relação ao último tempo medido (90 minutos) é menor que 1%, no entanto, como a variação das contagens interfere diretamente na sensibilidade do sistema, é recomendável que se espere cerca de 70 minutos entre ligar o aparelho e sua efetiva utilização, visto que a partir deste intervalo de tempo a variação das contagens é desprezível.

### 4.3 – RESULTADOS DUTOS FLEXÍVEIS

As figuras a seguir (4.1 a 4.3) mostram perfis, com colimação de 3mm fixa na fonte e variando no detector colimadores com 2mm, 3mm e 4mm respectivamente, que relacionam as contagens/min em função da posição em graus, da atenuação do feixe incidente no duto quando o conteúdo é óleo, água, areia e ar, obtido rotacionando o duto a cada 10°, além do perfil sob condições submarinas com colimação de 3mm na fonte e no detector.

O perfil que representa as condições submarinas figura 4.4 foi obtido posicionando-se duas placas de aço de 2,7mm de espessura na frente da fonte e do detector, simulando um recipiente de aço hermético onde estaria contidos fonte e detector de modo a proteger o sistema da ação da água e de pressões elevadas devido a profundidade.

As respectivas tabelas (4.1 a 4.4) apresentam as contagens médias e os respectivos desvios percentuais de cada perfil.

Através das figuras e tabelas verifica-se que devido a constituição heterogênea do duto, os perfis levantados têm variações em torno de 5% nas contagens.

Comparando o desvio percentual apresentado nas tabelas 4.1 a 4.3, observa-se que os melhores resultados foram para os ensaios com colimação de 3mm na fonte e no detector, por essa razão essa configuração foi a escolhida para realizar os demais ensaios.

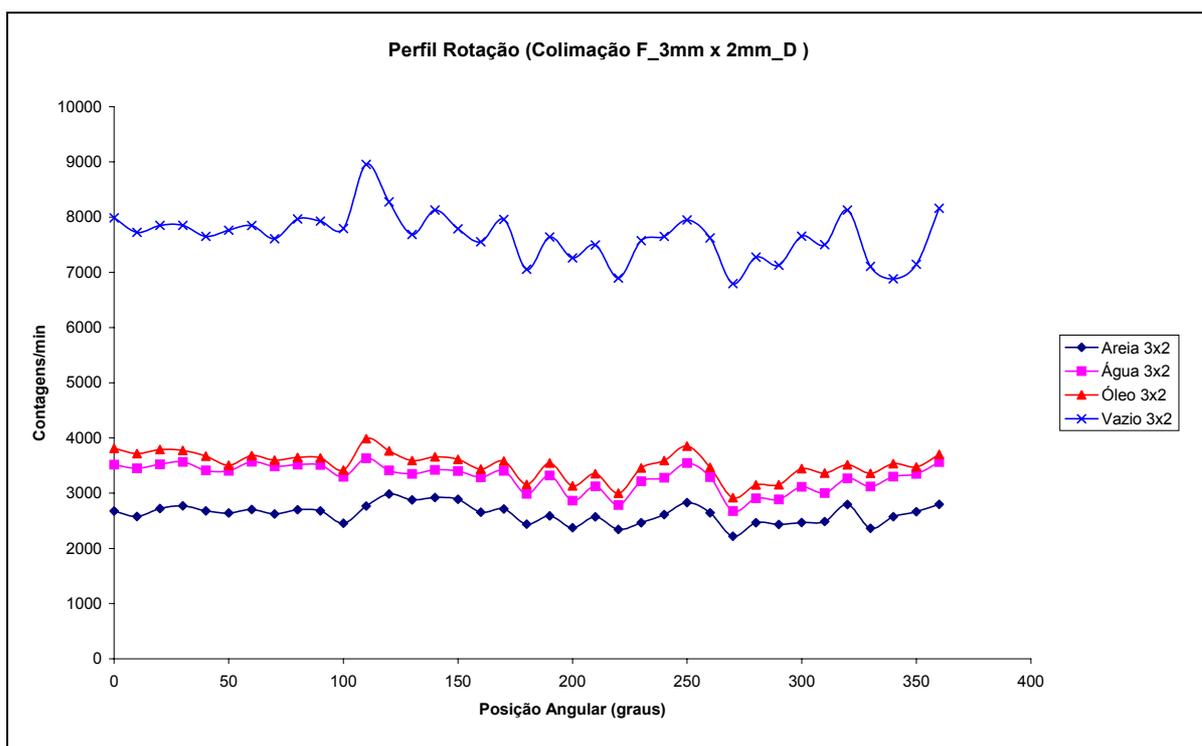


Figura 4.1- Perfil de densidades com colimação de 3mm na fonte e 2mm no detector.

Tabela 4.1 - Contagens médias do perfil com colimação 3x2

<b>Duto</b>	<b>Contagem Média/min</b>	<b>Desvio Percentual</b>
Vazio	7655 ± 437	5,7%
Óleo	3514 ± 242	6,9%
Água	3291 ± 241	7,3%
Areia	2626 ± 176	6,7%

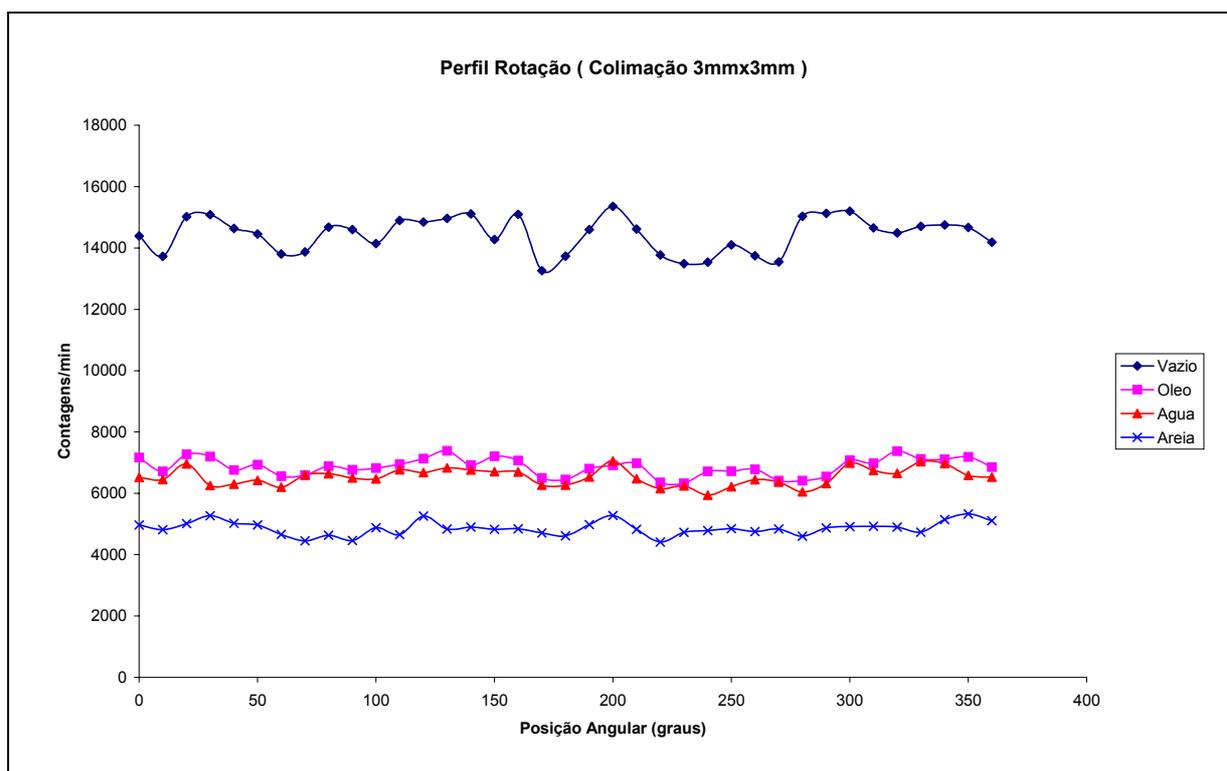


Figura 4.2 - Perfil de densidades, com colimação de 3mm na fonte e no detector.

Tabela 4.2 - Contagens médias do perfil com colimação 3x3

Conteúdo do Duto	Contagem Média/min	Desvio Percentual
Vazio	14437 ± 573	4,0%
Óleo	6964 ± 303	4,4%
Água	6729 ± 282	4,2%
Areia	4958 ± 275	5,5%

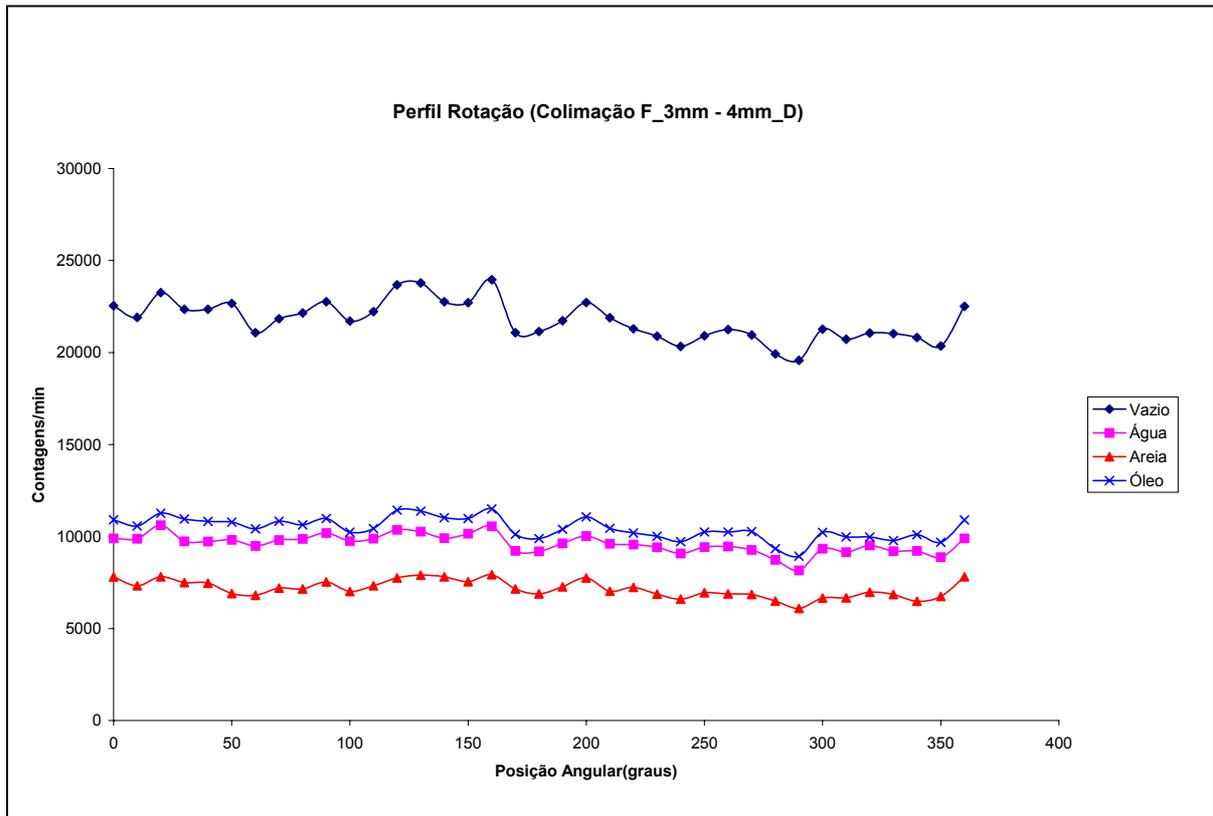


Figura 4.3 - Perfil de densidades com colimação de 3mm na fonte e 4mm no detector.

Tabela 4.3 - Contagens médias do perfil com colimação 3x4

Conteúdo do Duto	Contagem Média/min	Desvio Percentual
Vazio	21761 ± 1068	4,9%
Óleo	10541 ± 590	5,6%
Água	9618 ± 504	5,2%
Areia	7161 ± 469	6,5%

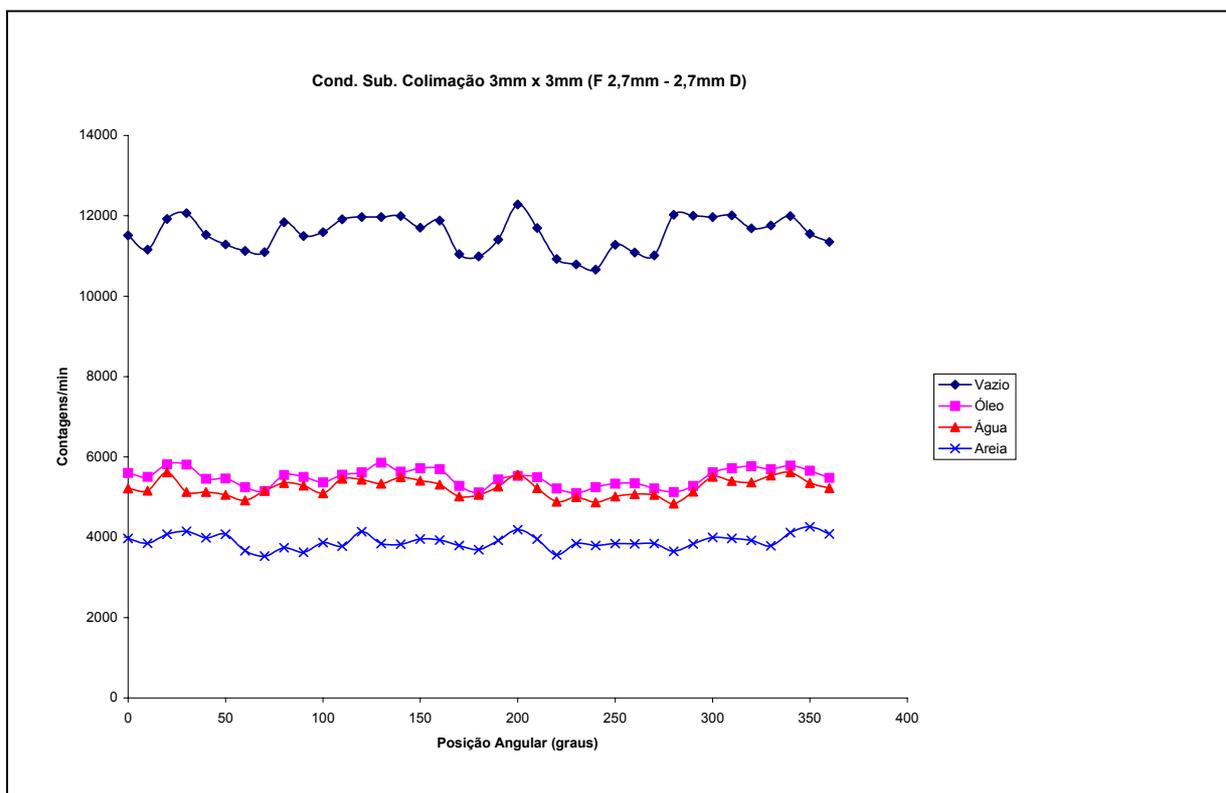


Figura 4.4 – Perfil de densidades em condições submarinas com colimação 3x3.

Tabela 4.4 - Contagens médias do perfil sob condições Submarina (F 2,7 mm – D 2,7 mm) com colimação 3x3.

Conteúdo do Duto	Contagem Média/min	Desvio Percentual
Vazio	11557 $\pm$ 425	3,7%
Óleo	5487 $\pm$ 221	4,0%
Água	5230 $\pm$ 217	4,1%
Areia	3790 $\pm$ 174	4,6%

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 relacionam os perfis levantados com o duto posicionado horizontalmente e transladado no sentido de baixo para cima, variando-se o volume da substância nele contida.

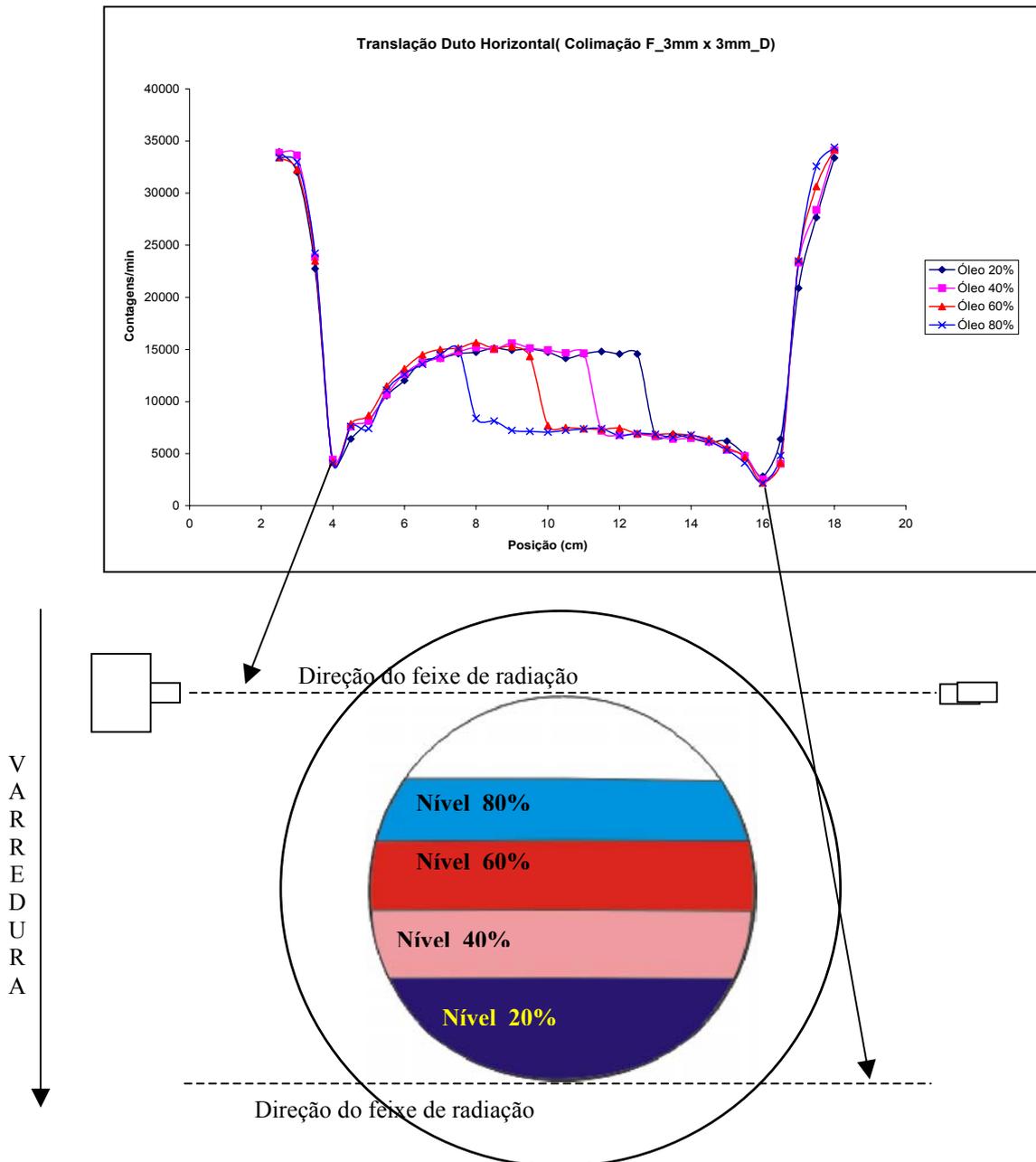


Figura 4.5 : Variação do nível de óleo dentro do duto.

A figura 4.5 mostra como variam as contagens em relação a posição vertical na medida que em que se altera o volume do fluido contido no duto.

É importante lembrar que nesse ensaio, o duto foi posicionado abaixo do feixe de radiação e na posição horizontal, variando-se assim a altura de baixo para cima.

Dessa forma fica fácil observar o comportamento da intensidade do feixe, a medida que a altura é variada, como no caso do conteúdo do duto quase cheio (nível 80%). Após o feixe passar pelo primeiro vale (o feixe encontra-se atravessando apenas a parede do duto), atinge o interior do duto numa região de vazio e logo em seguida já atinge o fluido em questão.

Comparando os dois vales da figura 4.5 verifica-se que o segundo (direita da figura) tem menor contagem, o que significa que o feixe percorre um caminho maior dentro da parede do duto, por isso deve estar mais próximo da tangente do diâmetro interno.

A figura 4.6 apresenta o perfil do duto com conteúdo água, posicionado na horizontal, variando o volume em quantidades de 20% a 80%.

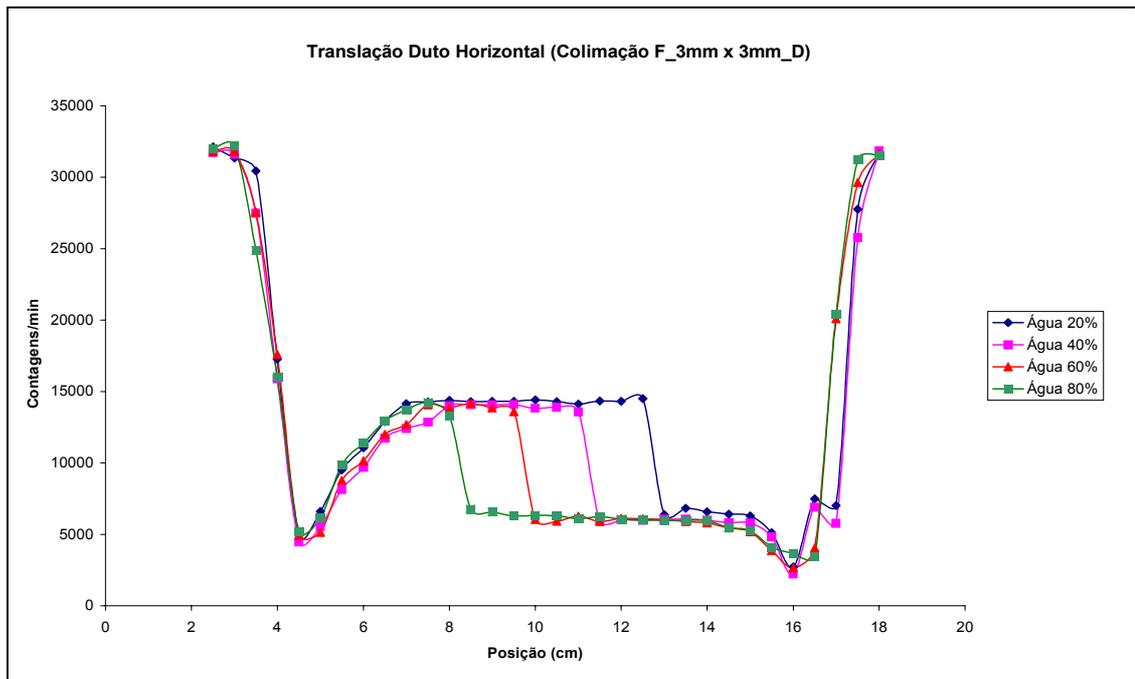


Figura 4.6 – Variação do nível de água dentro do duto.

A figura 4.7 apresenta o perfil para o conteúdo areia.

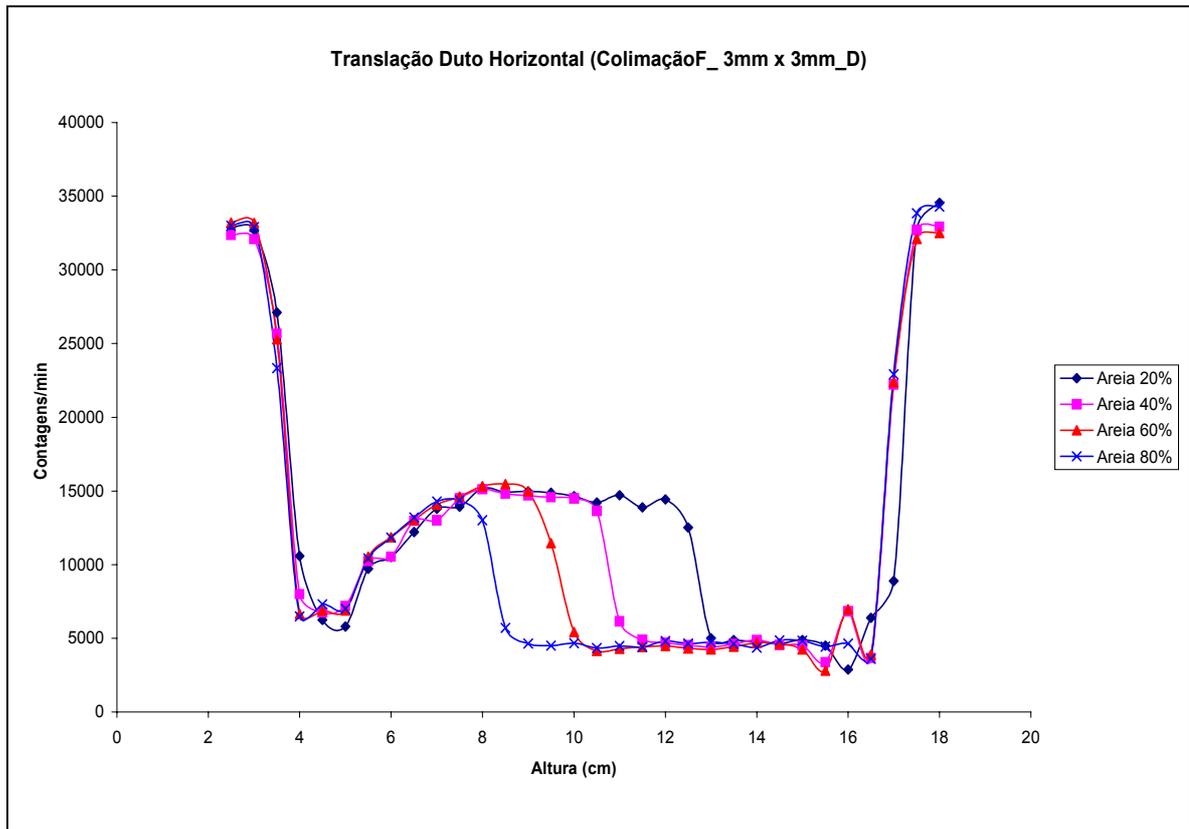


Figura 4.7 – Variação do nível de areia dentro do duto.

Na figura 4.8 relaciona-se as regiões de incidência do feixe de fótons gama no duto flexível com as taxas de alta e baixa contagens no gráfico, que correspondem as regiões de baixa e alta densidades respectivamente.

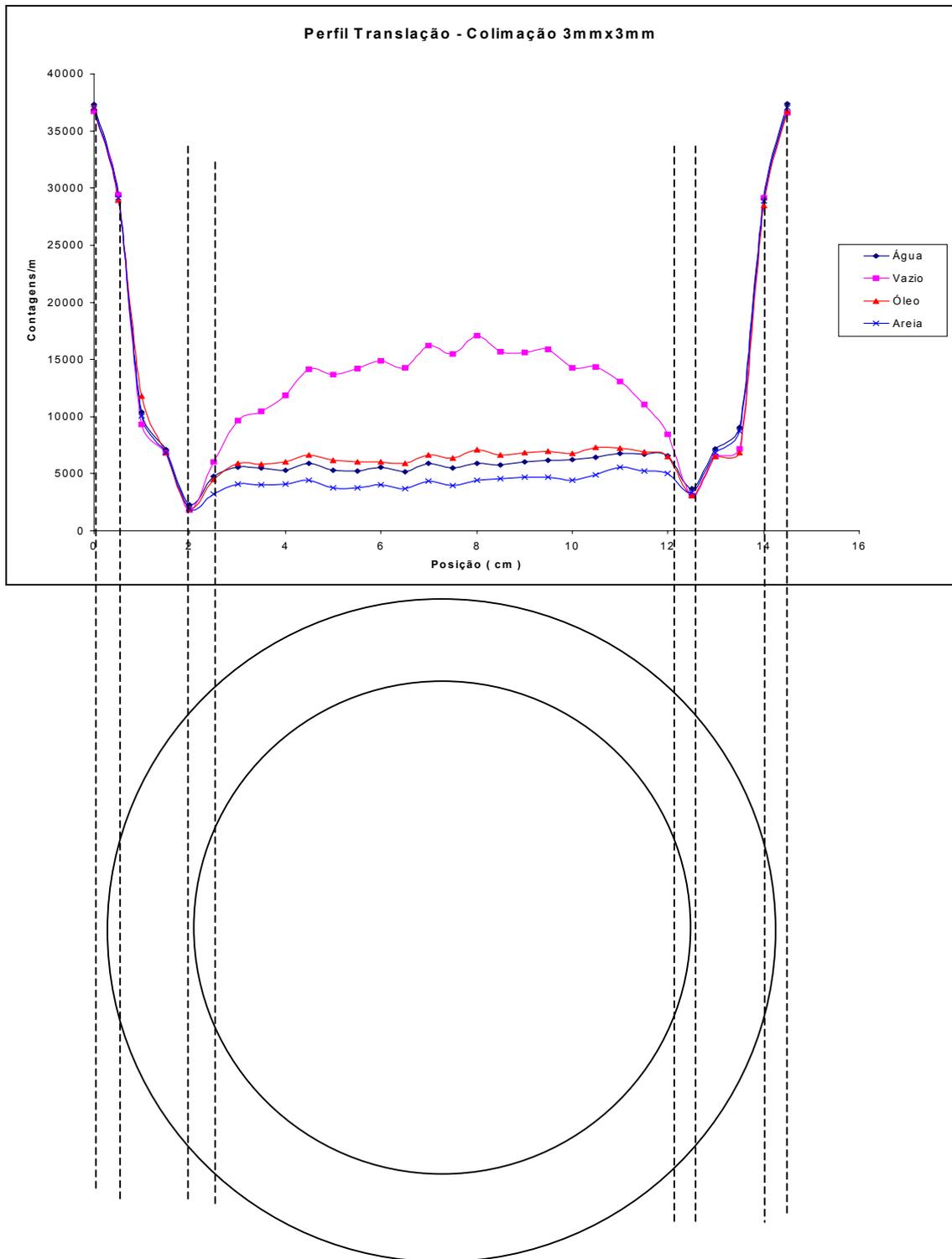


Figura 4.8: Translação do duto posicionado verticalmente.

As figuras 4.8 e 4.9 apresentam os perfis de translação do duto vazio posicionado verticalmente para uma colimação de 2mm e 4mm no detector respectivamente.

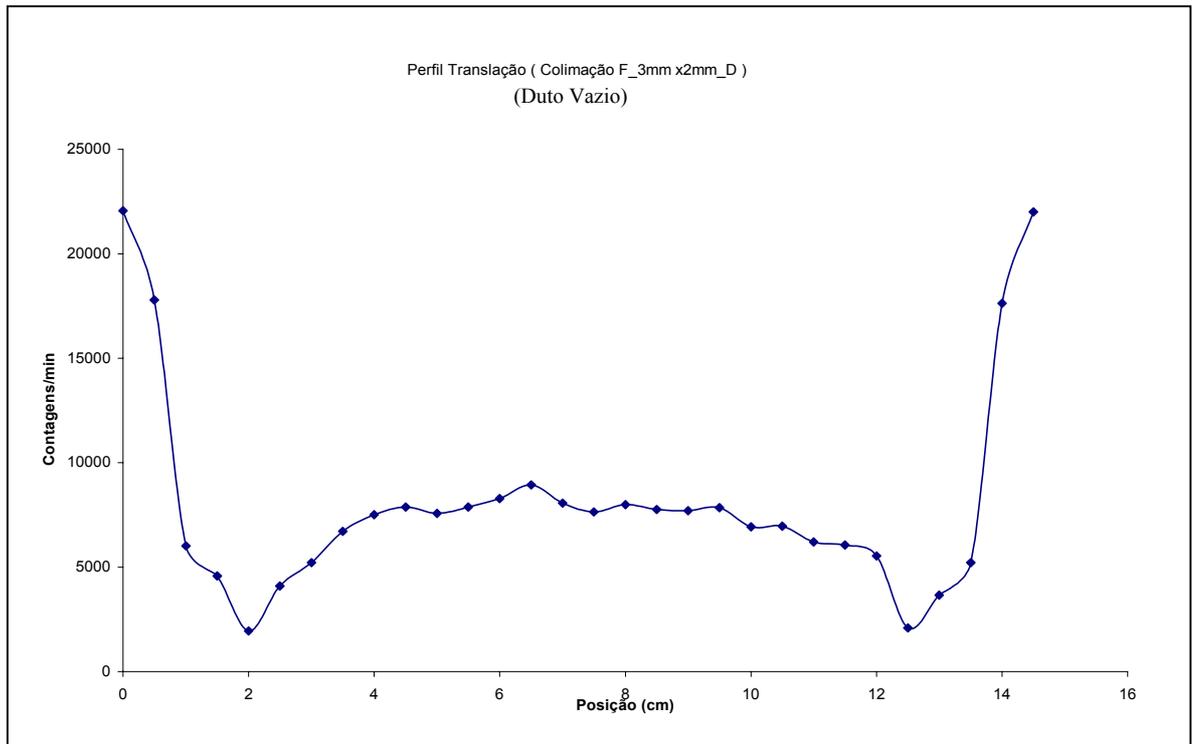


Figura 4.9 – Perfil de translação Com colimação de 2mm no detector (duto vazio ).

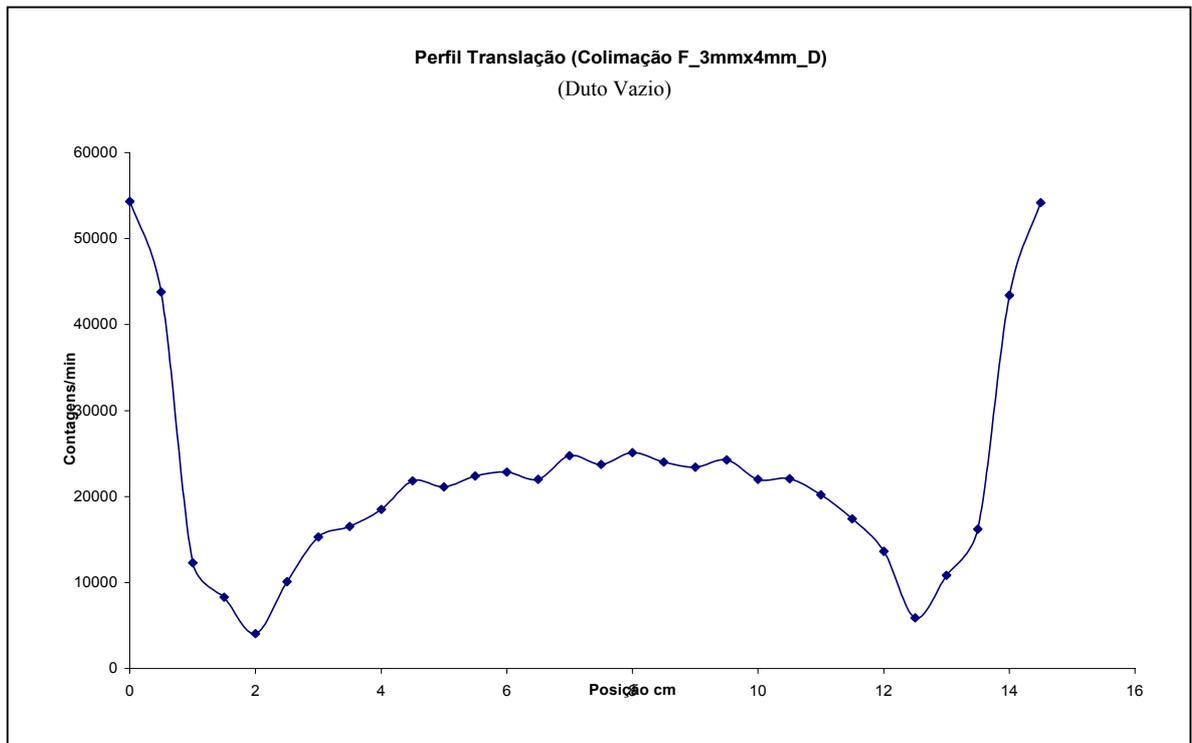


Figura 4.10 – Perfil de translação Com colimação de 4mm no detector (duto vazio ).

Observa-se na figura 4.9 que existem dois vales (região de baixa contagem) que correspondem ao percurso do feixe de radiação dentro da parede do duto, na região de maior espessura de material.

Analisando as regiões descritas pode-se avaliar com razoável aproximação a espessura do duto e seus diâmetros interno e externo (figura 4.11).

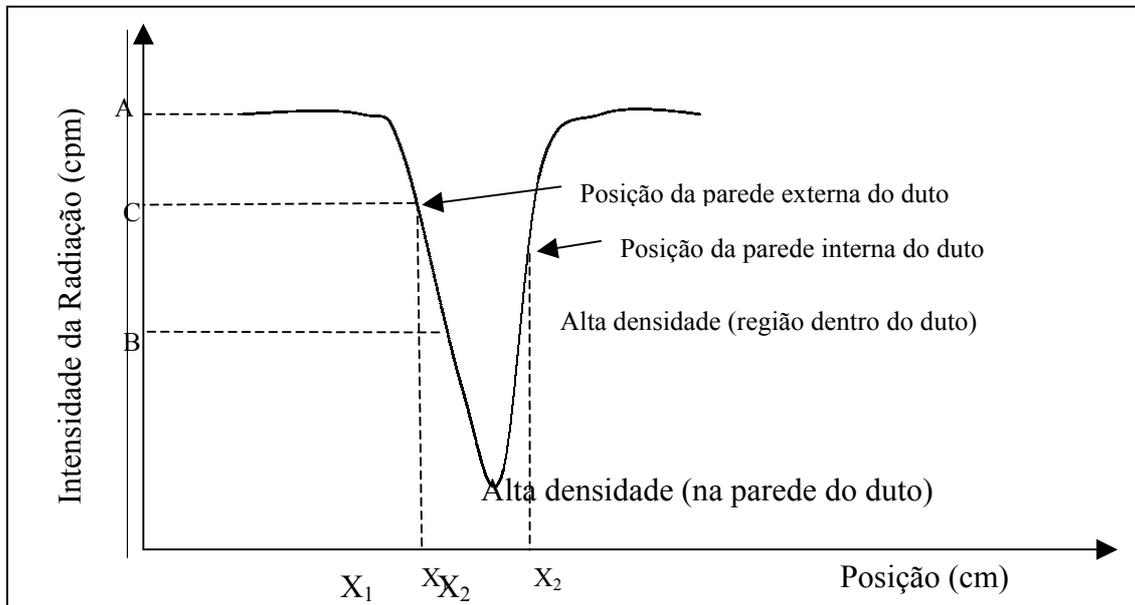


Figura 4.11 – 1º Método para determinar a espessura ( $X_2 - X_1$ ) e o diâmetro do duto.

$$\text{Ponto médio } C = (A+B)/2$$

O primeiro método para determinação da espessura e diâmetros do duto consiste em escolher dois pontos, um fora do duto (região de baixa densidade (A)) e outro dentro do duto (região de alta densidade (B)), considerando assim o ponto médio (C) a localização da parede do duto.

Um segundo método para avaliar a espessura do duto foi a aplicação da equação do modelo teórico.  $\varepsilon = R - \{R^2 - [(\ln(I_0/I)/2 - \mu_{ar}R) / (\mu_s - \mu_{ar})]\}^{1/2}$  (eq. 2.5)

Para essa aplicação foram feitas algumas considerações:

A função mostra que para se determinar a espessura média do duto, deve-se conhecer:

- O diâmetro externo do duto;
- O coeficiente de atenuação linear do material do duto (no caso avaliado experimentalmente) para a energia em questão;
- O coeficiente de atenuação linear do ar para energia de 662 keV(valor tabelado).

Para o cálculo de  $\mu_s$  utilizou-se o valor de  $I_m$  das tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e valores do gráfico 4.7 (sempre com o duto vazio).

Dessa forma calculou-se  $\mu_s$  ( $\mu_s = (1/x) [ \ln( I_0/I_m ) - \mu_{ar}x_{ar} ]$ ) para cada valor de colimação e a partir desses valores obteve-se o coeficiente médio.

A tabela 4.5 apresenta os valores relacionados para o cálculo de  $\mu_s$ .

Tabela 4.5 - Coeficiente de atenuação linear médio da parede do duto.

Colimação 3x2 (tabela 4.1)	Colimação 3x3 (tabela 4.2)	Colimação 3x4 (tabela 4.3)	Gráfico 4.7
(cpm)			
$I_0 = 22057 \pm 224$	$I_0 = 38041 \pm 403$	$I_0 = 54675 \pm 446$	$I_0 = 38041 \pm 403$
$I = 7655 \pm 437$	$I = 14437 \pm 573$	$I = 21761 \pm 1068$	$I = 2922 \pm 33$
(cm <sup>-1</sup> )			
$\mu_s = 0,265 \pm 0,017$	$\mu_s = 0,243 \pm 0,013$	$\mu_s = 0,230 \pm 0,015$	$\mu_s = 0,262 \pm 0,012$
$\mu_s = 0,250 \pm 0,017$			

É importante chamar a atenção para esse “coeficiente de atenuação médio” que apesar da composição não homogênea do material do duto e de ter características não isotrópicas, ele apresentou valores médios com pequenos desvios, o que para o objetivo em questão, que era o da verificação do modelo teórico para determinação da espessura do duto, mostrou-se relevante.

A tabela 4.6 apresenta os valores de espessuras do duto encontrados, aplicando o segundo método.

Tabela 4.6 – espessura calculada para cada colimação.

Colimação 3x2 Figura 4.8		Colimação 3X3 Figura 4.7		Colimação 3x4 Figura 4.9	
Espessura (cm)	Var. (%)	Espessura (cm)	Var. (%)	Espessura (cm)	Var. (%)
$\varepsilon_1 = 1,95 \pm 0,23$	2,5	$\varepsilon_1 = 2,24 \pm 0,34$	12	$\varepsilon_1 = 2,31 \pm 0,38$	15,5
$\varepsilon_2 = 1,81 \pm 0,23$	9,0	$\varepsilon_2 = 1,61 \pm 0,34$	19,5	$\varepsilon_2 = 1,59 \pm 0,38$	20

$\varepsilon_1$  é a espessura calculada pelo lado esquerdo do duto e  $\varepsilon_2$  a espessura pelo lado direito.

A tabela 4.7 mostra os resultados encontrados pela aplicação do 1º método e os resultados considerados padrão (medidos através de um paquímetro).

	Valor Padrão (cm)	Valor Experimental (cm)	Variação (%)
Diâmetro Externo	14,00± 0,01	13,75 ± 0,50	1,8
Diâmetro Interno	10,10± 0,01	11,50 ± 0,50	13,9
Espessura	2,00± 0,01	2,25 ± 0,25	12,5

Tabela 4.7 – Resultados encontrados pela aplicação 1º método.

#### 4.3.2 – COLUNA INDUSTRIAL

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados para aplicação numa coluna industrial, obtidos relacionando, o perfil de densidades com as respectivas simulações de perda de material refratário, localização de bandejas, dano em bandeja e espessura de uma bandeja.

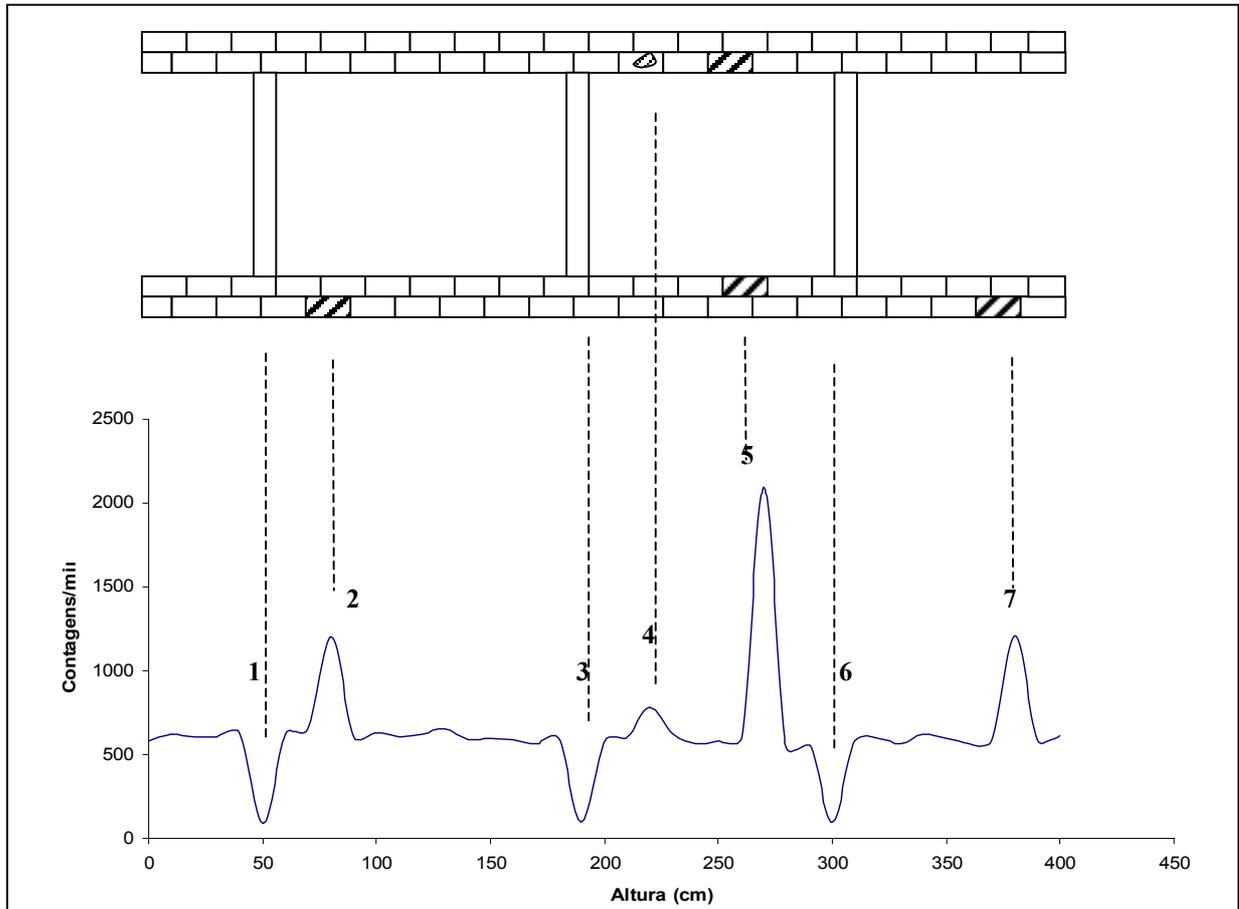


Figura 4.11 – Localização de bandeja e perda de material refratário.

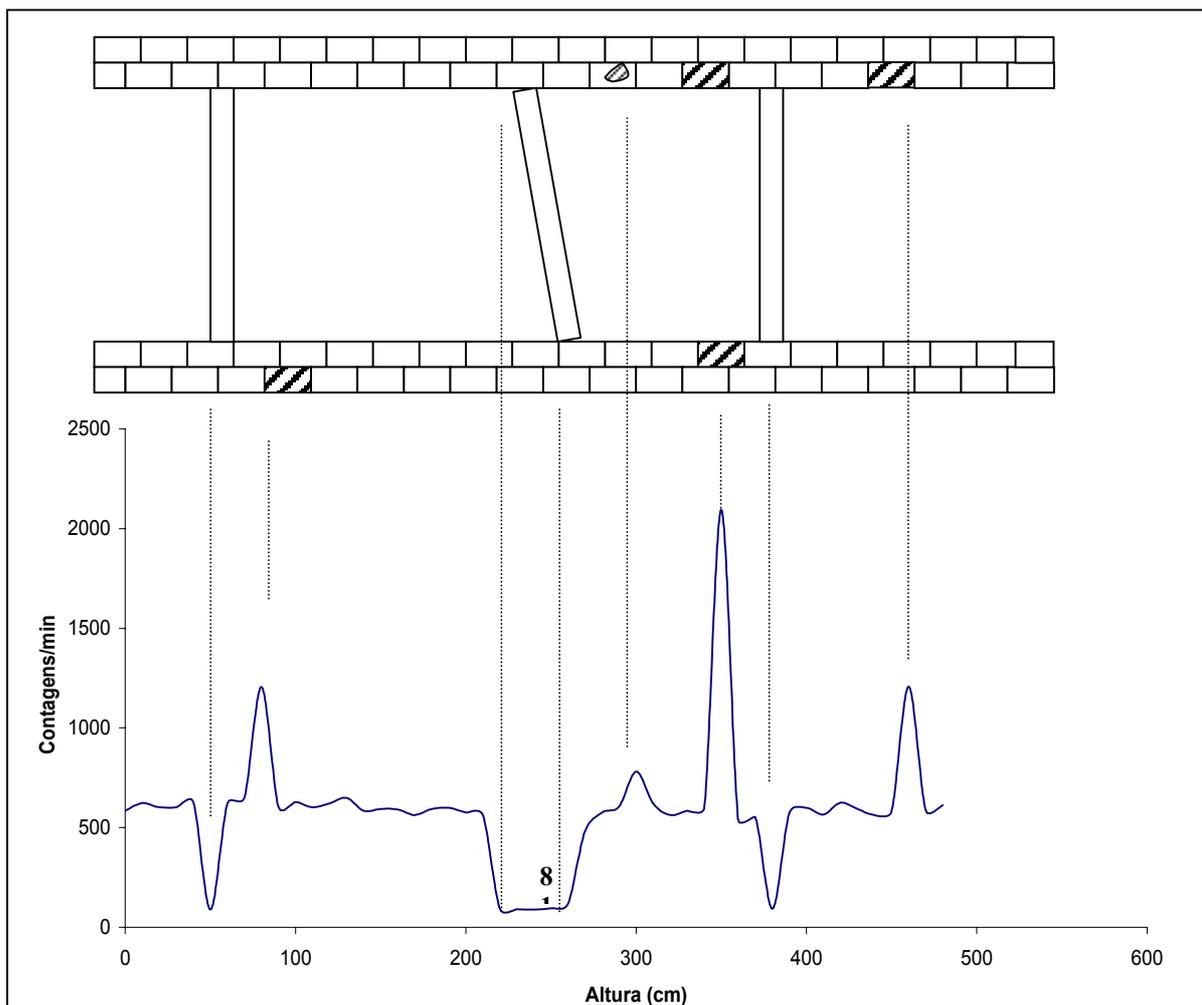


Figura 4.12 – Localização de Bandeja, perda de mat. refratário e dano em bandeja.

Os pontos de contagens mínimas (vales 1, 3, 6 fig. 4.11 e 8 fig. 4.12) representam regiões de altas densidades, caracterizando a localização das bandejas de aço. No caso da região 8 está configurado um dano na bandeja (a bandeja encontra-se inclinada).

Os pontos de contagens máximas (picos 2, 4, 5 e 7 fig. 4.11) representam regiões de menor densidade, caracterizando a perda de material refratário em diferentes graus.

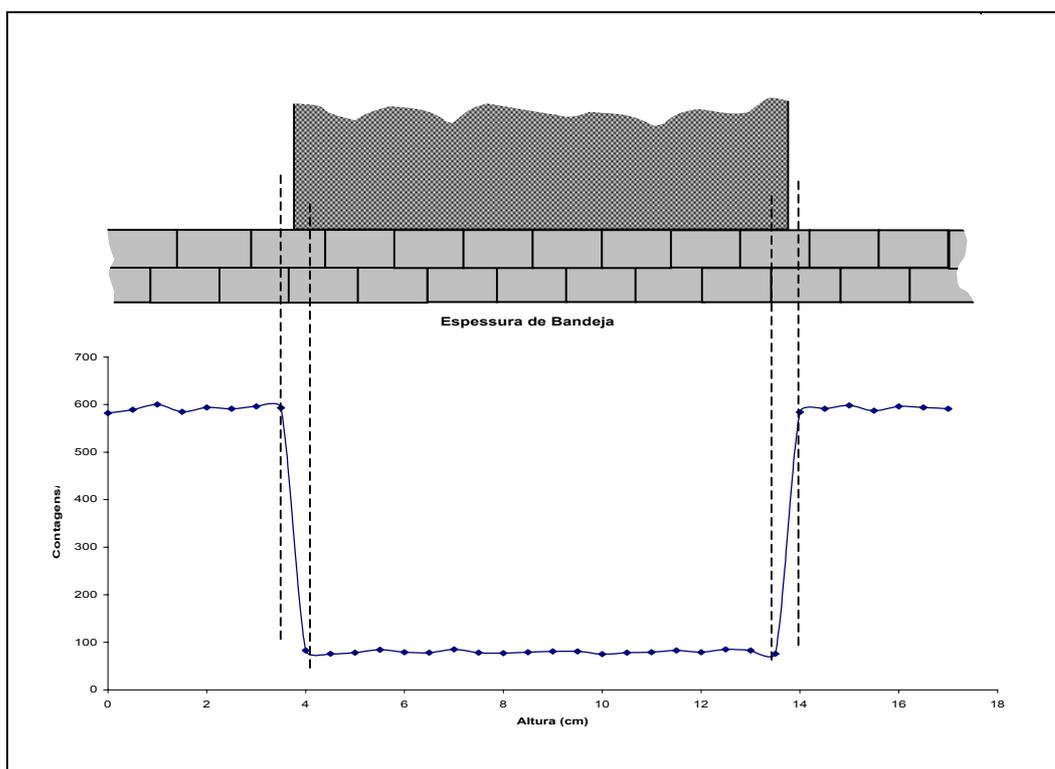


Figura 4.13 – Método de determinação de localização e espessura de bandeja.

Para a determinação da localização e espessura de uma bandeja, utilizou-se o mesmo método mostrado na figura 4.11. A tabela 4.8 apresenta a comparação dos valores encontrados com os valores pré-definidos como padrão.

Tabela 4.8 – Espessuras e posições relativas das bandejas.

Bandeja	Espessura (cm)		Variação (%)	Posição Relativa (cm)		Variação (%)
	Real	Exp.		Real	Exp.	
1	$10 \pm 0,01$	9,5	5	$50 \pm 0,1$	49	2
2	$10 \pm 0,01$	10,5	5	$180 \pm 0,1$	180,5	0,28
3	$10 \pm 0,01$	10,5	5	$300 \pm 0,1$	302	0,7

#### 4.4 - CONSIDERAÇÕES

Para se obter bons resultados nas determinações, dois fatores são importantes se bem que conflitantes: taxas de contagens elevadas e boa discriminação de energia. Um aumento da taxa de contagem pode ser conseguido através de: alta atividade da fonte; grande área de seção reta do colimador; pequena distância de colimação e grande abertura de janela. Fontes de radiação de altas atividades não são muito práticas para serem usadas, pois além de custo elevado, são difíceis de serem manuseadas (requer blindagens pesadas), por isso dificilmente se utiliza fontes com atividades superiores a 100 mCi. Grande área de seção reta do colimador e pequena distância de colimação são recursos altamente prejudiciais à precisão e sensibilidade do método, pois diminuem o poder de resolução, além de aumentar os erros devido ao efeito Compton. Por outro lado, para se melhorar o poder de discriminação em energia, é necessário adotar-se uma largura de janela a menor possível, usar-se detectores de alta resolução e boa colimação.

A sensibilidade do método de atenuação de radiação gama é função do coeficiente de atenuação de massa e da espessura do absorvedor. Tanto para uma amostra muito fina, como para outra muito espessa, a sensibilidade do método é baixa e os erros são grandes. Essa função, erro versus espessura, passa por um mínimo, quando:

$$\mu.x = 2$$

Segundo (BARÓ e CASTAGNET 1969), na prática, admite-se bastante flexibilidade no valor do produto  $\mu.x$ , visto que um mesmo sistema deve servir para uma larga faixa de espessuras, sendo aceitável sua utilização dentro do seguinte intervalo:

$$0,3 < \mu.x < 3$$

Pode-se então concluir que, a partir da espessura a ser medida, deve-se procurar uma fonte que emita radiação gama numa energia tal que a relação acima seja satisfeita ( visto que  $\mu$  depende da energia do fóton).

Uma vez esgotados os recursos disponíveis em escolha da fonte, do detector e geometria de colimação, o problema resume-se em se adotar uma forma de pulso e uma largura de janela do analisador monocanal que não seja excessiva a ponto de prejudicar a discriminação em energia e nem estreita demais, a ponto de prejudicar a taxa de contagens.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 – CONCLUSÕES

Analisando os perfis de rotação com colimações 2, 3 e 4mm, no detector e 3mm na fonte, apresentados nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, pode-se perceber que quando o conteúdo do duto é água ou óleo fica difícil a sua identificação, pois devido a sua configuração heterogênea, as contagens média ( $I_m$ ) apresentam desvios em torno de 5%. Já para a areia o estudo mostrou que é possível diferenciá-la de água ou óleo, como pode-se observar normalizando-se as intensidades médias em relação a intensidade inicial  $I_0$ :

$$(I_{\text{vazio}}/I_0) = 62\%$$

$$(I_{\text{óleo}}/I_0) = 30\%$$

$$(I_{\text{água}}/I_0) = 27\%$$

$$(I_{\text{areia}}/I_0) = 20\%$$

O perfil que simula as contagens em condições submarinas mostra que mesmo com a diminuição das contagens, (em torno de 22%) ainda assim, mantém-se as características observadas anteriormente.

Através do perfil de translação (gráfico 4.7) também foi possível chegar-se às conclusões anteriores. Esse perfil mostrou ainda que, através de uma varredura milimétrica e boa geometria de colimação, é possível medir com boa precisão os diâmetros interno e externo do duto, assim como sua espessura.

Para o caso do segundo método proposto para determinação da espessura do duto, os resultados mostram que o modelo funciona, mas não teve precisão, o que já era esperado, devido a estrutura da parede do duto.

Os perfis de translação com o duto disposto horizontalmente (figuras 4.5, 4.6 e 4.7) mostram que se pode identificar os níveis de volume de fluido no interior do duto.

Através dos resultados obtidos o sistema mostrou-se viável para os objetivos propostos. Pode ser aplicável não apenas em dutos flexíveis, mas em diversos tipos de oleodutos, de diâmetros diversos.

No caso da aplicação em torres de destilação o sistema também mostrou-se viável para os objetivos propostos como no caso de localização, identificação de danos e determinação de espessura de bandejas. Outra vantagem é sua aplicação em torres com a planta em funcionamento o que contribui muito para o aumento da produtividade.

## 5.2 - SUGESTÕES

O sistema pode ser aplicado para detectar entrada de água em componentes estruturais de aço de plataformas marítimas, onde essa entrada de água poderia dar a primeira indicação de defeito de soldagem ou defeito que atravessa a parede, determinando assim com precisão a integridade desses componentes tubulares de aço em estruturas submarinas.

As figuras 5.1 a 5.3 a seguir mostram sugestões de configuração do sistema adaptado a um ROV para inspeção em dutos.

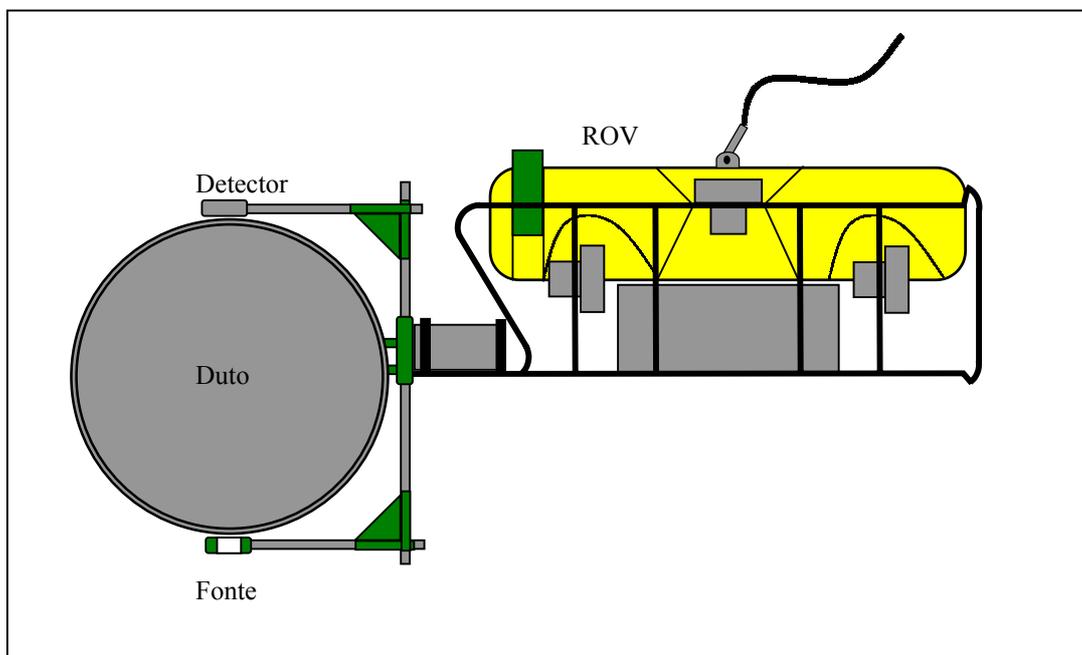


Figura 5.1 – Configuração para inspeção de componentes horizontais

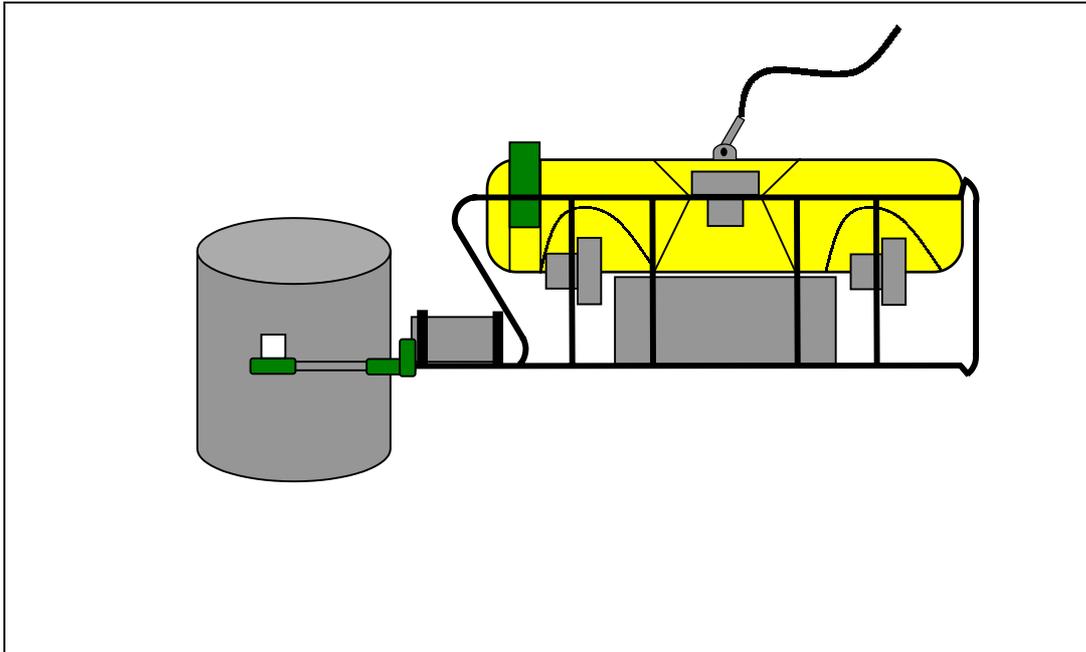


Figura 5.2 – Configuração para inspeção de componentes verticais

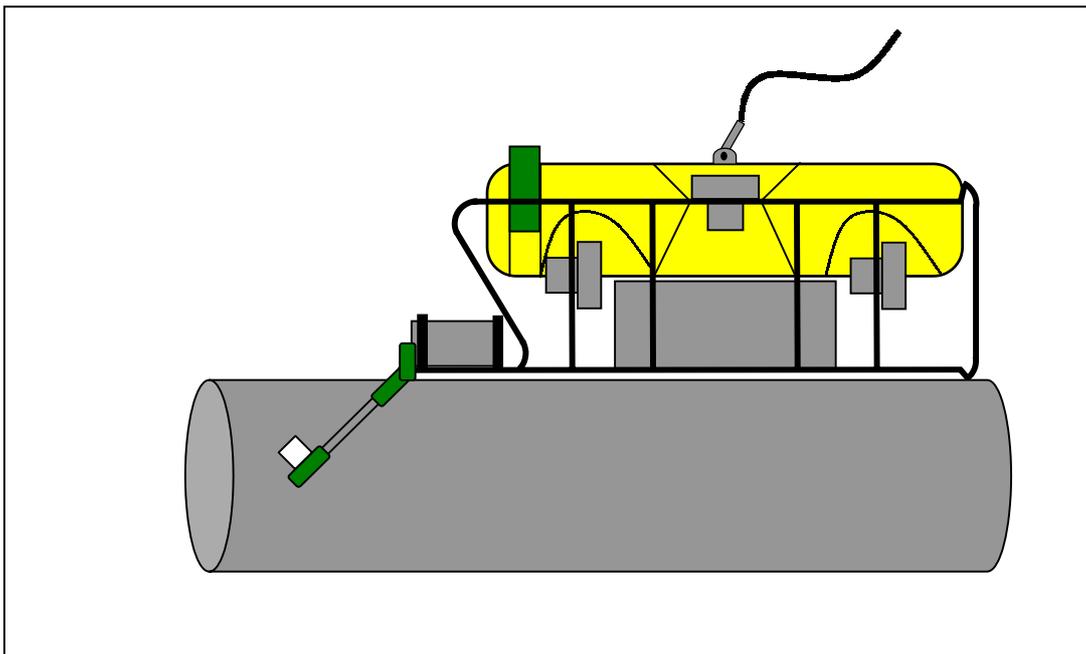


Figura 5.3 – Configuração para Inspeção de referência horizontal, pode determinar com precisão os componentes horizontais parcialmente inundados.

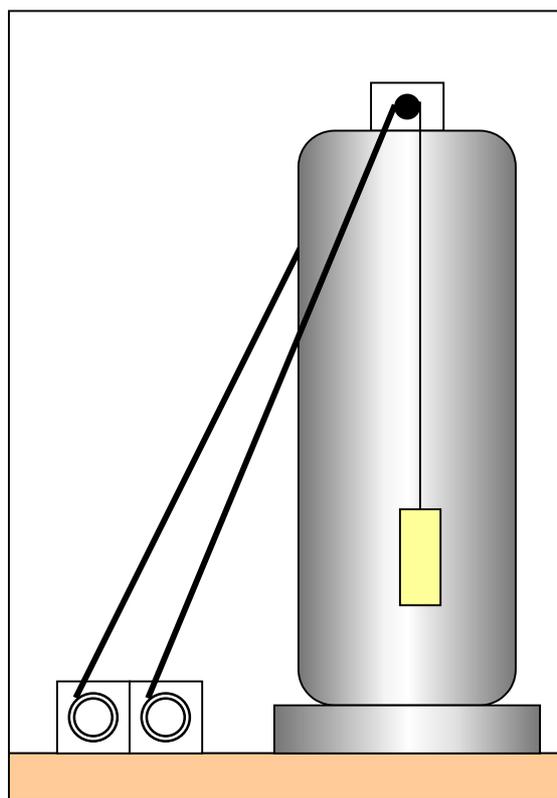


Figura 5.4 – Configuração de escaneamento numa torre.

A figura 5.4 mostra uma sugestão de configuração do sistema de escaneamento gama numa torre de destilação.

Basicamente o sistema consiste em deslocar simultaneamente e longitudinalmente ao longo da coluna, fonte e detector colocados diametralmente opostos, presos a um cabo de aço acoplados, através de polias, a motores de passo micro-controlados.

Uma sugestão seria a de implementação do sistema numa torre real em dois momentos distintos: Num primeiro momento com a torre funcionando em perfeitas condições, com o objetivo de se levantar um perfil padrão, e num segundo momento

havendo a possibilidade de diagnosticar a mesma torre quando esta apresentar algum tipo de problema a fim de se comparar os perfis levantados.

Outra sugestão é o de aplicar o sistema com uma colimação de 1mm de diâmetro e varredura com passo também de 1mm em dutos de paredes homogêneas a fim de se verificar a nível de precisão a eficiência do modelo proposto ( eq.2.5).

### 5.3 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, J.B. *Gamma Scanning for Troubleshooting, Optimization and Predictive Maintenance of Distillation Columns in Petroleum Refineries and Chemical Plants*, Proceedings of the International Nuclear Conference 2002, Kuala Lumpur, Malaysia (2002).

ASTUTO, A., *Desenvolvimento de um Sistema de Inspeção de Tubos usando a Técnica de Transmissão Gama*, Tese de Mestrado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 1995.

BARÓ, G. B. & CASTAGNET, A. C. – *Estado Actual y Perspectivas de la Aplicacion de Radioisótopos en la Industria Argentina*, publicación interna EM-9/16, CNEA, Buenos Aires, 1969.

BERMAN, A. I.; HARRIS, J. N., “Precision Measurement of Uniformity, of Materials by Gamma Ray Transmission”, *Review Scientific Instruments*, 1954.

CANO, M., “Manual de Aplicaciones de Fuentes Selladas en la Industria del Petróleo”, ARCAL XLIII, 1999.

CHARLTON, J.S., POLARSKI, M. , “Radioisotope Techniques Solve CPI Problems”, *Chemical Engineering*, 56 , pp 116-119., 1983.

DIEDERICHS, R., “Ultrasonic and Radiographic NDT of Butt Fusion Welds in Polyethylene Pipe”, *NDTnet*, Vol. 1, nº 4, 1996.

DRABKIN, L. A., “Sensitivity of the Combined Radiation Method of Measuring the Local Thickness in Metallic Pipes”, *6º Seminar of the IIE-INIM-IMP on Technological Specialities*, Salazar (Mexico), 15 p., July 1992.

DRAKE, S. G.; SEWARD, J. C., “Radiographic Detection of Pipe Corrosion Under Lagging”, *GB Patent Document 2211708/A/, UK Patent Application 87225125.2, Int. Cl. G01N 23/04*, 9 p., July 1989.

- FERRAZ, E. S. B., *Determinação Simultânea de Densidade e Umidade de Solos por Atenuação de Raios Gama do  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$* , Tese de Livre-Docente, ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ, São Paulo, 1974.
- FULHAM, M. J.; HULBERT, V. G., “Gamma Scanning of Large Towers”, *Chem. Eng. Prog.*, 71, p. 73-77, 1975.
- GARDNER, R. P.; ELY, R. L. Jr., “*Radioisotope Measurement Applications in Engineering*”, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1967.
- OIEA-ARCAL XLIII *Guía para Aplicaciones Industriales de Radiotrazadores y Fuentes Selladas de Radiación.*, 2000.
- GOUVEIA, J.M.G., *Inspeção de Tubos Usando Técnica de Transmissão Gama e Detectores CsI(Tl)*, Tese de Mestrado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 2000.
- HAMACHER, M. E. *Um Estudo da Sedimentação utilizando o Método de Atenuação de Raios Gama*, Tese de Mestrado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 1978.
- HARRISON, M. E., “Gamma Scan Evaluation for Distillation Column Debottlenecking”, *Chem. Eng. Prog.*, 86, p.37-44, 1990.
- HECHT, A., “On Line Radiographic Wallthickness-Measurement of Insulated Piping the Chemical and Petrochemical Industry”, *NDTnet*, Vol. 3, nº 10, October 1998.
- HILLS, A.E., “Practical Guidebook for Radioisotope-Based Technology in Industry, IAEA/RCA RAS/8/078, 1999.
- KHOROSHEV, V. N., “New Gamma Flaw Detectors for Testing the Welding of Main Pipelines”, *Soviet Atomic Energy*, Vol. 37, nº 1, p.784-786, July 1974.
- KNOLL, G. F., *Radiation Detection and Measurement*, New York, John Wiley and Sons, 1980.
- MONNO, A., “Tube Wall Thickness”, *GB Patent Document 2146115/A/*, *GB Patent Application 8323913*, Int. Cl. G01B 15/02, 9 p., April 1985.
- PLESS, L., BOWMER, J., “Scanning Columns with Gamma Rays”, *Chemical Engineering*, Aug. 1992, pp 127-132.

- POKROVSKII, A. V.; MALOFEEV, B. I., “Radiometric Gamma Flaw Detector for the Inspection of Cast Pipes”, *The Soviet Journal of Nondestructive Testing (Translation of Defektoskop)*, Vol. 10, n° 2, p. 183-186, 1975.
- PORCIÚNCULA, S. L., RIBEIRO, J. E. D., GONCALVES, R. C. F. Marlim field : risers, flowlines and umbilicals developed. *In: Offshore Technology Conference, Proceedings....Houston : Offshore Technology Conference, v. 2, p. 87-103, 1999.*
- RAMIREZ G. F.; FELICIANO, H. J., “Methodology to Calculate Wall Thickness in Metallic Pipes”, *6º Seminar of the IIE-INIM-IMP on Technological Specialities*, Salazar (Mexico), 15 p., July 1992.
- RECOPE-TECSUB, *Concepções Alternativas para Tubos Flexíveis*, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2003.
- SOUZA, A.P.F. , “ Colapso de Dutos Flexíveis Sob Pressão Externa.”, COPPE/UFRJ - CENPES – PETROBRÁS – Rio de Janeiro, 2000.
- TAUHATA, L. et al., *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*, 3ª v., Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 2001.
- TSOULFANIDS, N., *Measurements and Detection of Radiation*, New York, McGrawHill, 1983.
- TWOMEY, M., “Inspection Techniques for Detecting Corrosion under Insulation”, *NDTnet*, Vol. 3, n° 2, Nov/Dec 1996.