

FILTROS PARA IMOBILIZAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS DE IODO
RESULTANTE DA MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS RADIOATIVOS EM
SERVIÇO DE MEDICINA NUCLEAR

Vitor Santos Ramos

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

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão

Rio de Janeiro
Dezembro de 2010

FILTROS PARA IMOBILIZAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS DE IODO
RESULTANTE DA MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS RADIOATIVOS EM
SERVIÇO DE MEDICINA NUCLEAR

Vitor Santos Ramos

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

Examinada por:

Profa. Verginia Reis Crispim, D.Sc.

Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Prof. Eduardo Gomes Dutra do Carmo, D.Sc.

Dr. Júlio Cezar Suíta, D.Sc.

Dr. Francisco José de Oliveira Ferreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2010

Ramos, Vitor Santos

Filtros para imobilização de efluentes gasosos de iodo resultante da manipulação de materiais radioativos em serviço de medicina nuclear/ Vitor Santos Ramos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XXII, 170 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão.

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 142-149.

1. Adsorvedores/absorvedores de iodios radioativos.
 2. Meios porosos. 3. Modelos dispersivos. 4. Traçadores Radioativos. 5. Funções DTR. 6. Técnicas de Radiotraçadores. 7. Momentos estatísticos ponderados.
- I. Crispim, Verginia Reis *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

"O orgulho nos leva a fazer coisas bem feitas, mais é o amor que nos
leva a fazê-las com perfeição". É neste contexto que
dedico este trabalho aos meus pais, Jorge e Cilea,
por minha formação e carinho, a minha
amada Luisa, a Robson e Isis,
estimados irmãos e aos
meus sobrinhos.

“Uma paixão forte por qualquer
objeto assegurará o sucesso,
porque o desejo pelo
objetivo mostrará
os meios”
(William Hazlitt)

AGRADECIMENTOS

“A amizade é um contrato segundo o qual nos comprometemos a prestar pequenos favores para que nos retribuam com grandes” (Barão de Montesquieu).

Sendo assim, manifesto meus agradecimentos a todos aqueles que tornaram possível à realização deste trabalho:

Primeiramente agradeço a DEUS por tudo o que tenho e que já alcancei na minha vida.

Aos meus pais que compartilharam dos meus ideais e os alimentaram me incentivando a prosseguir na jornada, mostrando-me que os meus caminhos deveriam ser seguidos sem medos, fossem quais fossem os obstáculos. Minha eterna gratidão vai além dos meus sentimentos, pois a vocês foi cumprido o dom divino.

A minha amada companheira Maria Luisa, pela paciência, incentivo, carinho e dedicação.

Aos meus familiares pelo apoio, reconhecimento e compreensão, apesar da minha ausência constante e omissão em momentos importantes.

A prof^ª. Verginia, que colaborou no desenvolvimento do trabalho, pela confiança, dedicação, compreensão, e pela orientação segura demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao pesquisador Brandão pela orientação, companheirismo, amizade, incentivo e confiança nos trabalhos desenvolvidos no laboratório de traçadores radioativos do IEN/CNEN, e além de tudo, pelo grande privilégio de aprender diariamente com esse grande pesquisador.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), que através de sua estrutura (laboratório de radiotraçadores) e serviços (Biblioteca, Mecânica, Reator Argonauta e Cíclotron), tornou possível trabalhar com êxito e qualidade.

Ao CNPQ, órgão de fomento provedor da minha bolsa de doutorado, que confiou e forneceu todo o subsídio para o cumprimento da tese.

Aos professores e ao programa de engenharia nuclear (UFRJ/COPPE), pela oportunidade e pela qualificação profissional.

Aos amigos e funcionários do IEN, pela colaboração direta ou indiretamente, em especial a Ana Cristina e aos operadores do Reator Argonauta e do Cíclotron.

Aos funcionários do PEN que creditaram seus serviços para realização da tese.

Finalmente, a todos os meus amigos e àqueles que direta ou indiretamente tenham colaborado para a realização desse trabalho.

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

FILTROS PARA IMOBILIZAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS DE IODO
RESULTANTE DA MANIPULAÇÃO DE MATERIAIS RADIOATIVOS EM
SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR

Vitor Santos Ramos

Dezembro/2010

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão

Programa: Engenharia Nuclear

Nos serviços de medicina nuclear, a exposição ao radioiodo aumenta os riscos de contaminações internas ocupacionais, por se tratar de um radionuclídeo volátil. Na Iodoterapia, empregam-se altas atividades de radioiodo, que variam de 3,7 a 7,4 GBq por paciente. Para administração dessas dosagens, as amostras devem ser fracionadas com atividades superiores, aumentando o risco de contaminação. Visando reduzi-lo, foi desenvolvido um filtro de baixo custo e com tecnologia nacional para ser instalado na saída do sistema de exaustão dos laboratórios onde as doses são fracionadas. Foi construído na forma cilíndrica, com o material resistente PVC, possibilitando a variação de volume interno de 157 a 785 cm³, tendo, como elemento filtrante, cristais de sílica impregnada com prata [10%] (SiO₂ + Ag) e carvão ativo natural. O filtro mostrou ser eficiente para a imobilização do gás I₂ num volume de 157 cm³ de SiO₂ + Ag ou de carvão ativo natural. Entretanto, para reter o gás CH₃I, foi necessário um volume de 275 cm³ de carvão ativo natural, pois não foi adsorvido pelo SiO₂ + Ag. Concluiu-se que, para uma vazão de exaustão de (306 ± 4) m³/h, um filtro com duplo estágio de filtragem, usando-se SiO₂ + Ag no primeiro estágio e, no segundo, carvão ativo natural, atenderia os requisitos de segurança radiológica.

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

FILTERS FOR THE IMMOBILIZATION OF IODINE GASEOUS EFFLUENTS
RESULTING FROM HANDLING OF RADIOACTIVE MATERIALS IN NUCLEAR
MEDICINE SERVICES

Vitor Santos Ramos

December/2010

Advisors: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão

Department: Nuclear Engineering

The exposure to radioiodine, a volatile radionuclide, enhances the risks of occupational internal contamination in nuclear medicine services. High radioiodine activities, varying between 3,7 GBq and 7,4 GBq for each patient, are used in iodine therapy. In order to administer such dosages, samples with higher activities must be fractionated, increasing the risk of contamination. Aiming at reducing such risk, a low cost filter was developed with national technology to be placed at the exit of the exhaust system of the laboratories where such dosages are fractionated. It was constructed in a cylindrical shape, in resistant PVC, with possible internal volume variation from 157 cm³ to 785 cm³, using as filtering element silica crystals incorporated with silver [10%] (SiO₂ + Ag) and natural activated carbon. The filter proved to be efficient to immobilize I₂ gas in 157 cm³ of SiO₂ + Ag or natural activated carbon. However, to hold CH₃I gas, it was necessary a volume of 275 cm³ of natural activated carbon, because it was not adsorbed by SiO₂ + Ag. We concluded that, for an exhaust flow rate of (306 ± 4) m³/h, a double stage filter, using SiO₂ + Ag in the first stage and natural activated carbon in the second, is sufficient to attend radiological safety requirements.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
I.1 – Generalidades	1
I.2 – Objetivo	4
I.3 – Revisão Bibliográfica	5
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
II.1 – Iodo	20
II.1.1 – Características	20
II.1.2 – Propriedades físico químicas	20
II.1.3 – O iodo no corpo humano	21
II.1.4 – Obtenção e aplicações	22
II.1.4.1 – Terapia e diagnóstico com Iodo-131 (¹³¹ I)	23
II.1.5 – Metabolismo do iodo	25
II.1.6 – Radiofármacos	25
II.1.7 – Farmacocinética do iodo	26
II.1.8 – Formas químicas voláteis de iodo	27

	Página
II.2 – Métodos de remoção das formas químicas de iodos encontradas no ar atmosférico	29
II.2.1 – Absorvedores sólidos para compostos de iodo	30
II.2.1.1 – Carvão Ativo	30
II.2.1.2 – Adsorvedores inorgânicos	31
II.2.1.3 – Substratos impregnados com nitrato de prata	32
II.3 – Transporte de fluidos em meios porosos	33
II.3.1 – Modelo baseado em fenômenos de transporte e balanço de massa	34
II.3.2 – Modelo de fluxo dispersivo	39
II.3.3 – Técnica de estímulo e resposta com traçadores radioativos	45
II.3.3.1 – Distribuição do tempo de residência	47
II.3.3.2 – Modelos teóricos e as funções de distribuição do tempo médio de residência	51
II.3.3.2.1 – Modelo de fluxo pistão	51
II.3.3.2.2 – Modelo de fluxo dispersivo com pequena dispersão	53
II.3.3.2.3 – Modelo de fluxo dispersivo com grande dispersão	53
II.3.3.2.4 – Modelo de misturadores perfeitos, idênticos e em série	56
II.3.3.3 – Identificação de problemas em unidades industriais usando as funções de DTR	60
II.3.3.4 – Momentos estatísticos simples e momentos estatísticos ponderados	66
II.3.4 – Ajuste de parâmetros da função resposta para os sistemas de mistura	72
II.3.4.1 – Modelo de misturador perfeito simples	73

	Página
II.3.4.2 – Modelo para “N” misturadores perfeitos em série	74
II.3.4.3 – Modelo de reator do tipo pistão	75
II.3.4.4 – Modelo de reator com dispersão axial	77
II.3.4.5 – Associação entre modelos teóricos	79
II.3.4.5.1 – Sistemas em série	79
II.3.4.5.2 – Sistemas em paralelo	80
II.3.5 – Relação entre momentos ponderados para as principais funções respostas	82
II.4 – Cálculo dos erros referentes aos ajustes matemáticos	82

CAPÍTULO III: MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 – Sistema de aquisição e análise de dados	84
III.2 – Calibração de detectores cintiladores NaI	85
III.2.1 – Determinação da eficiência de fotopico	86
III.3 – Preparação dos traçadores radioativos	87
III.3.1 – Produção do Brometo de Metila (CH_3Br)	88
III.3.2 – Produção do Iodo elementar (I_2)	89
III.3.3 – Produção do Iodeto de Metila (CH_3I)	90
III.4 – Projeto e construção do Leito de Teste para o estudo de imobilização de efluentes gasosos de iodo	90
III.5 – Sistema exaustor de efluentes gasosos	93

	Página
III.6 – Sistema de injeção do radiotraçador no duto de PVC	95
III.7 – Tratamento dos substratos usados como adsorvedores/absorvedores	96
III.7.1 – Preparação da superfície de sílica para deposição da prata	96
III.7.2 – Limpeza e ativação do carvão ativo	98
III.8 – Sistema experimental para estudos de meios porosos	99
III.9 – Posicionamento dos detectores e ângulo sólido	100

CAPÍTULO IV: DISCUSSÃO DE RESULTADOS

IV.1 – Calibração do sistema de detecção	107
IV.2 – Caracterização do tipo de fluxo com o gás de $\text{CH}_3^{82}\text{Br}$	109
IV.2.1 – Análises qualitativas através das funções de distribuições do tempo médio de residência (DTR)	109
IV.2.2 – Análises quantitativas através do método de ajustes das funções de transferências e momentos ponderados	113
IV.3 – Instalação de um disco rígido na saída do filtro para aumentar o tempo de permanência do fluido em seu interior	122
IV.4 – Testes de retenção do gás $^{123}\text{I}_2$	127
IV.4.1 – Definição da geometria de medida dos detectores ao se empregar iodo radioativo	128
IV.4.2 – Testes com injeção instantânea e injeção contínua	129
IV.4.3 – Teste de imobilização do I_2 usando carvão ativo natural como substrato	131
IV.5 – Testes de retenção do gás $\text{CH}_3^{123}\text{I}$	135

	Página
IV.5.1 – Teste de retenção do gás CH ₃ I através de um volume de 275 cm ³ contendo SiO ₂ + Ag	135
IV.5.2 – Teste de retenção do gás CH ₃ I com volume de 275 cm ³ contendo grãos de carvão ativo natural	136
IV.6 – Cálculo da vazão de gases que são exaustados, quando se usa um filtro com duplo estágio, SiO ₂ + Ag e carvão ativo, formando um volume final de 432 cm ³	139
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
ANEXO A - Problemas relacionados com a glândula tireóide	150
ANEXO B - Controle de Radioproteção para monitoração individual	152
ANEXO C - Remoções das formas químicas de Iodo através de líquidos e peneira molecular	156
ANEXO D - Fundamentos de Mecânica de Fluidos	162

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO II:	
Figura II.1 – Localização da glândula tireóide	21
Figura II.2 – Relação das possíveis reações de efluentes gasosos do iodo	28
Figura II.3 – Fluxograma de balanço (massa, energia ou quantidade de movimento)	34
Figura II.4 – Elemento de volume em coordenadas cartesianas	35
Figura II.5 – Distância de boa mistura	41
Figura II.6 – Esquema da representação matemática da técnica de estímulo-resposta	46
Figura II.7 – Curvas teóricas representando um fluxo pistão	52
Figura II.7.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo pistão: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	52
Figura II.8 – Curvas teóricas para um fluxo dispersivo com pequena dispersão	54
Figura II.8.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo dispersivo com pequena dispersão: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	54
Figura II.9 – Curvas teóricas para um fluxo dispersivo com grande dispersão	55
Figura II.9.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo dispersivo com grande dispersão: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	55
Figura II.10 – Curvas teóricas representando fluxos com três tipos de misturadores idênticos em série	56

	Página
Figura II.10.1 – Função $E(q)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série	57
Figura II.10.2 – Função $F(q)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série	58
Figura II.10.3 – Função $I(q)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série	58
Figura II.10.4 – Função $N(q)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série	59
Figura II.11 – Representação esquemática de um fluxo com zona morta	61
Figura II.12 – Representação esquemática de um fluxo com recirculação	61
Figura II.13 – Representação esquemática de um fluxo canalizado	62
Figura II.14 – Curvas teóricas para um fluxo com canalização	63
Figura II.14.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo com canalização: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	63
Figura II.15 – Representação esquemática de um fluxo com zona de retenção	64
Figura II.16 – Curvas teóricas para um fluxo com zona de retenção	65
Figura II.16.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo com retenção: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	65
Figura II.17 – Desenho esquemático da injeção de um traçador em uma unidade registrada por dois detectores: um, na entrada, e outro, na saída	69
Figura II.18 – Desenho esquemático de uma unidade com função de transferência no espaço de Laplace, $H(s)$, de entrada, $X(t)$, e de saída, $Y(t)$, no espaço de tempo	72
Figura II.19 – Subsistemas em série	79
Figura II.20 – Subsistemas em paralelo	80

CAPÍTULO III:

Figura III.1 – Conjunto de módulos eletrônicos para o monitoramento do radiotraçador	84
Figura III.2 – Conjunto de aquisição e análise de dados	85
Figura III.3 – Unidade compacta para produção dos radiotraçadores gasosos	89
Figura III.4 – Peça A: Cilindro reto que acomoda o meio-poroso	91
Figura III.5 – (a) Peça B: Cone de redução para acoplar a mangueira de PVC (f=63,5mm) e (b) Peça C: Acoplamento entre o cone e o engate para a mangueira	91
Figura III.6 – Gabaritos de furação. (a) área lateral AA e (b) base do cilindro reto	92
Figura III.7 – Fotos do Leito de Teste. (a) desmontado e (b) montado	93
Figura III.8 – Foto da redução usada na conexão do exaustor à mangueira de PVC	94
Figura III.9 – Peça D: Cone redutor do exaustor	94
Figura III.10 – Foto do exaustor com o redutor para mangueira de PVC	95
Figura III.11 – Sistema Injetor da Unidade Compacta de Produção de Radiotraçadores Gasosos	95
Figura III.12 – Sistema de produção dos radiotraçadores gasosos no interior da capela química	99
Figura III.13 – Protótipo experimental para a condução do ar ambiente	100
Figura III.14 – Dependência da taxa de contagem registrada pelo detector em relação a distância fonte/detector	101
Figura III.15 – Primeira configuração: detectores sem colimadores e juntos à tubulação	102
Figura III.16 – Segunda configuração: sem colimadores e detectores distante 50 mm do tubo	103

	Página
Figura III.17 – Terceira configuração: colimadores com 50 mm de espessura de chumbo e 25 mm de abertura	103
Figura III.18 – Quarta configuração: colimadores com 50 mm de espessura de chumbo e 5 mm de abertura	104
Figura III.19 – Ângulo sólido do sistema visto sob corte vertical	105
Figura III.20 – Ângulo sólido do sistema visto sob corte horizontal	106
CAPÍTULO IV:	
Figura IV.1 – Curva de eficiência de fotopico para os detectores A, B e C	108
Figura IV.2 – Curvas de resposta dos detectores A e B para o filtro contendo 250 g de SiO ₂	110
Figura IV.2.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 250 g de SiO ₂ : (a) E(q); (b) F(q); (c) I(q); (d) N(q).	110
Figura IV.3 – Curvas de resposta dos detectores A e B para o filtro contendo 500 g de SiO ₂	112
Figura IV.3.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 500 g de SiO ₂ : (a) E(q); (b) F(q); (c) I(q); (d) N(q)	112
Figura IV.4 – Curvas ajustadas pela relação de momentos ponderados do primeiro experimento, ao se empregar meio filtrante com 250 g de SiO ₂	114
Figura IV.5 – Curvas ajustadas pela relação de momentos ponderados do primeiro experimento, empregando meio filtrante com 500 g de SiO ₂	118
Figura IV.6 – Curvas de resposta dos detectores A e B, na entrada e saída do filtro, respectivamente, para o experimento sem a restrição na base do filtro	123
Figura IV.6.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 400 g de SiO ₂ + Ag, sem restrição: (a) E(q); (b) F(q); (c) I(q); (d) N(q).	123

	Página
Figura IV.7 – Deconvolução da resposta do detector A, posicionado na entrada do filtro	124
Figura IV.8 – Deconvolução da resposta do detector B, posicionado na saída do filtro	125
Figura IV.9 – Resposta dos detectores A e B, na entrada e saída do filtro, respectivamente, para o experimento com a restrição na base do filtro	126
Figura IV.9.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, com restrição: (a) $E(q)$; (b) $F(q)$; (c) $I(q)$; (d) $N(q)$	126
Figura IV.10 – Curvas de resposta dos três detectores, durante a passagem do I_2 por um filtro com 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$: (a) A e B; (b) C	128
Figura IV.11 – Curvas de resposta dos três detectores, após injeções instantânea e contínua: (a) A e B; (b) C	129
Figura IV.12 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com volume menor de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$ (157 cm^3): (a) A e B; (b) C	131
Figura IV.13 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com 275 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C	132
Figura IV.14 – Curvas de resposta dos três detectores, durante o teste de liberação de I_2 retido no filtro contendo carvão ativo com volume de 275 cm^3 : (a) A e B; (b) C	133
Figura IV.15 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com 157 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C	134
Figura IV.16 – Curvas de respostas dos três detectores quanto a liberação de I_2 , após sua retenção num filtro com 157 cm^3 : (a) A e B; (b) C	135
Figura IV.17 – Curvas de resposta dos três detectores, para medir a eficiência de retenção do CH_3I pelo filtro com 275 cm^3 de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$: (a) A e B e (b) C	136
Figura IV.18 – Curvas de resposta dos três detectores, relativo à eficiência de retenção do CH_3I num filtro com 275 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C	137
Figura IV.19 – Curvas de resposta para os três detectores, usados no teste de liberação de CH_3I retido no filtro com 275 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C	137

Figura IV.20 – Curva de resposta dos três detectores usados no teste de retenção do CH_3I por um filtro com 157 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C	138
--	-----

ANEXO:

Figura D1 – Escoamento de um fluido sob a ação de uma força tangencial	163
Figura D2 – Decomposição de uma força em suas componentes tangencial e normal	165
Figura D3 – Experiência das duas placas planas	166
Figura D4 – Classificação de fluidos em função da tensão de cisalhamento	168

LISTA DE TABELAS

Página

CAPÍTULO II:

Tabela II.1 – Principais características químicas dos compostos de iodos voláteis	27
Tabela II.2 – Pressão de vapor do iodo elementar e do iodo metálico	28
Tabela II.3 – Relação entre momentos ponderados de primeira ordem e de ordem zero	83

CAPÍTULO III:

Tabela III.1 – Parâmetros relativos às fontes padrões utilizadas na determinação da eficiência de fotóptico	87
Tabela III.2 – Radiotraçadores gasosos	87

CAPÍTULO IV:

Tabela IV.1 – Ponto de operação e resolução energética dos detectores NaI (Tl)	107
Tabela IV.2 - Valores ajustados para a função, $\ln(\epsilon) = A + B.\ln(E) + C.\ln(E)^2$, sendo E a energia em keV	107
Tabela IV.3 – Eficiência para a energia principal do ^{123}I	108

	Página
Tabela IV.4 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo pistão, para um filtro contendo 250 g de SiO ₂	115
Tabela IV.5 – Parâmetros ajustados para o modelo de misturador perfeito, para um filtro contendo 250 g de SiO ₂	116
Tabela IV.6 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo com dispersão axial, para um filtro contendo 250 g de SiO ₂	117
Tabela IV.7 – Parâmetros ajustados para o modelo de N misturadores perfeitos em série, para um filtro contendo 250 g de SiO ₂	118
Tabela IV.8 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo pistão, para um filtro contendo 500 g de SiO ₂	119
Tabela IV.9 – Parâmetros ajustados para o modelo de misturador perfeito, para um filtro contendo 500 g de SiO ₂	119
Tabela IV.10 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo com dispersão axial, para SiO ₂ contendo 500 g	120
Tabela IV.11 – Parâmetros ajustados para o modelo de N misturadores perfeitos em série, para um filtro contendo 500 g de SiO ₂	121

ANEXO:

Tabela B1 – Fatores de segurança referentes ao manuseio	153
Tabela B2 – Fatores de segurança referentes à proteção	154

GLOSSÁRIO

Absorção: É o processo pelo qual as moléculas se fixam, fisicamente, em microporos, existentes em substratos com o carvão ativo ou o óxido de silício (SiO₂).

Adsorção: É o processo pelo qual as moléculas se fixam por uma reação química, gerando uma ligação forte, entre o substrato (prata) e um reagente (iodo).

Desorção: É o processo que ocorre com o carvão ativo, em que seu grão, estando saturado, começa a liberar seus contaminantes.

Fluidos compressíveis: São aqueles fluidos cujos volumes dependem da pressão, isto é, apresentam volumes próprios dependentes da pressão a que estão submetidos, tais como os gases.

Fluidos dilatáveis: São aqueles fluidos cujos volumes dependem da temperatura, isto é, apresentam volumes próprios dependentes da temperatura à qual estão submetidos, tais como os gases.

Fluidos incompressíveis: São aqueles fluidos cujos volumes não dependem da pressão, isto é, apresentam volumes próprios independentes da pressão a que estão submetidos, tais como os líquidos.

Fluidos não dilatáveis: São aqueles fluidos cujos volumes independem da temperatura, isto é, apresentam volumes próprios independentemente da temperatura à qual estão submetidos, tais como os líquidos.

Substrato: É o material que serviu como base para reter o iodo, ou seja, é o elemento filtrante.

Velocidade facial ou velocidade superficial: São as velocidades geradas pelas frentes de ondas, geradas pela nuvem radioativa, ao passarem por dois detectores. É calculado pela razão do espaço entre os detectores e o intervalo de tempo que o traçador leva para passar por eles.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 – Generalidades.

Na evolução da história da concepção de riscos ocupacionais, a Organização Mundial de Saúde (1973) classificou-os em biológicos, físicos, químicos, ergonômicos e psicossociais. Consideram o ambiente hospitalar como risco não só devido aos acidentes decorrentes do contato com pacientes portadores de doenças infecciosas, mas, também, daqueles decorrentes de caráter industrial que tem nas instituições hospitalares; dentre eles, estão os riscos químicos existentes no ambiente de trabalho que dependem da sua natureza, concentração, intensidade e tempo de exposição. Na Medicina Nuclear, esses riscos químicos são mais agravantes, quando se utilizam radioisótopos.

A Medicina Nuclear é uma especialidade médica que emprega fontes abertas ou seladas de radionuclídeos com finalidade diagnóstica e/ou terapêutica. Geralmente, os materiais são administrados *in vivo* e apresentam uma distribuição diferenciada para determinados órgãos ou tipos celulares.

A CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) é responsável pelo licenciamento de todas as instalações radiativas em operação no Brasil, inclusive as instalações do Serviço de Medicina Nuclear. Existem no Brasil cerca de 750 instalações radiativas que desenvolvem práticas relacionadas às aplicações das radiações ionizantes em medicina. São cadastradas aproximadamente 20 novas instalações de Serviço de Medicina Nuclear, anualmente, acarretando um aumento de trabalhadores com riscos de exposição externa e contaminação interna pelos radionuclídeos manipulados na forma de fontes abertas (Vidal, 2004).

A exposição à radiação por profissionais da área médica pode acontecer durante o preparo da dose, sua administração ao paciente ou obtenção da imagem. As doses externas ou internas recebidas, durante a preparação do composto a ser administrado, variam em função do procedimento adotado.

Um dos elementos mais utilizados na Medicina Nuclear é o iodo (I), devido sua grande afinidade pelo tecido da glândula tireóide. A glândula tireóide é tema de estudos sobre carcinogênese, sendo diagnosticada através de iodios radioativos, e a absorção da glândula é de aproximadamente 30% do iodo inalado (THRALL, 1995).

Ao administrar este radionuclídeo, sua grande volatilidade aumenta o risco de incorporação pelos profissionais que exercem essa atividade ocupacional. A manipulação rotineira de soluções contendo iodo radioativo envolve significativos riscos de contaminação interna dos profissionais que atuam nesta prática. Geralmente, um farmacêutico ou um técnico de Medicina Nuclear é responsável pelo fracionamento das doses a serem utilizadas, tanto para diagnósticos, quanto para tratamentos.

Segundo a CNEN, *“um serviço de medicina nuclear (SMN) deve ser constituído por, no mínimo, médico qualificado em Medicina Nuclear responsável pelo SMN, um supervisor de radioproteção com qualificação certificada pela CNEN e um ou mais técnicos de nível superior e/ou médicos qualificados para o exercício de suas funções específicas, conforme Norma CNEN-NE-3.02 “Serviço de Radioproteção” e com qualificação certificada pela CNEN, necessários para o cumprimento dos requisitos dessa Norma. O médico qualificado em Medicina Nuclear pode acumular as funções de supervisor de radioproteção, desde que compatibilizadas as respectivas cargas horárias.”* (CNEN-NN-3.05,1996).

No relatório europeu, encontra-se uma melhor definição do técnico de medicina nuclear, assim como suas responsabilidades: - “o Técnico de Medicina Nuclear é um Profissional de Saúde que é capaz de efetuar a gama completa de procedimentos existentes em Medicina Nuclear. Ele é parte integrante de uma equipe multidisciplinar que pode incluir médicos, físicos, radioquímicos, radiofarmacêuticos, outros cientistas clínicos, técnicos diversos, enfermeiros e outros que apoiam e cuidam do doente durante os procedimentos, sejam eles de natureza diagnóstica ou terapêutica, sob a direção de um clínico especialista em Medicina Nuclear.”

“As responsabilidades do técnico de Medicina Nuclear consistem na manutenção dos resultados dos procedimentos efetuados, os quais podem incluir os procedimentos diagnósticos e terapêuticos, marcação de produtos, procedimentos terapêuticos,

manutenção dos mais altos níveis de cuidados ao doente e manutenção de níveis de irradiação, em relação aos doentes, profissionais da saúde e público em geral, sendo as doses tão baixas quanto possível.” (European Association Nuclear Medicine Technologist – EANM, 1998).

Segundo o relatório sobre bases de padrões de segurança para proteção contra radiações ionizantes e para segurança de fontes de irradiação (IAEA - Basic Safety Series-115), é responsabilidade do Titular da instalação, onde se manipulam materiais radioativos, informar os trabalhadores sobre os riscos de exposição externa e contaminação interna e prover os meios necessários para que os mesmos sejam submetidos à monitoração apropriada, de forma a demonstrar a eficácia das medidas de radioproteção, a serem implementadas, e manter as doses tão baixas, quanto razoavelmente exequíveis (ALARA).

Dentre as normas estipuladas pela CNEN, sobre os requisitos de radioproteção e segurança, em 1996, foi criada a norma CNEN – NN – 3.05, destinada aos Serviços de Medicina Nuclear, estabelecendo:

“O laboratório de manipulação e armazenamento de fontes em uso deve ser construído com material impermeável que permita descontaminação, ter pisos e paredes com cantos arredondados, bancadas, tanque com no mínimo 40 cm de profundidade e torneiras sem controle manual. Nos casos de fontes voláteis (iodo-131) ou de serviços que realizem estudos de ventilação pulmonar, é necessário um sistema de extração de ar.” (CNEN-NN-3.05,1996).

Estes sistemas de extração de ar não são simples, pois estes materiais voláteis não são capturados por um filtro convencional de ar. Em geral, nestes ambientes encontram-se filtros conhecidos como HEPA (High Efficiency Particulate Air), utilizados em capelas de exaustão de ar em laboratórios, que é um tipo de filtro que retém apenas particulados de até 0,3 µm (aerossóis, pós-tóxicos, bactérias, ácaros, fungos, etc.). Para reter os gases que são gerados por soluções voláteis, necessita-se de filtros especiais para captura do radionuclídeo específico.

I.2 – Objetivo.

O radioiodo é um material volátil que oferece grande risco aos profissionais que o manipulam rotineiramente. As atividades equivalentes de iodo para cada paciente são altas, em torno de 3,7 a 7,4 GBq (100 a 200 mCi) para tratamento e em alguns casos especiais, como câncer metastático, podem chegar a 1,48 GBq (400 mCi). Segundo o princípio ALARA, as doses devem ser tão baixas quanto razoavelmente exequíveis e a norma da CNEN-NN 3.05, 1996 (Normas para o Serviço de Medicina Nuclear), cada instalação deve ter um laboratório, equipado com capelas de exaustão para manipular materiais voláteis. Porém, a norma da CNEN não explicita que, para cada radiofármaco manipulado, existe um filtro específico para imobilizá-lo. Constata-se que, na totalidade das clínicas de medicina nuclear, não existem instalados filtros específicos para manipular os radiofármacos com segurança. Os filtros, quando instalados nas clínicas, protegem não só o trabalhador que o manipula, como, também, as pessoas do público e o meio ambiente na saída dos exaustores.

Os filtros de iodo existentes no mercado são caros, para implementá-los em clínicas radiológicas, e são projetados para utilização em grandes usinas nucleares ou indústrias de reprocessamento de combustíveis nucleares.

O objetivo principal deste trabalho é projetar e desenvolver um filtro para imobilizar os possíveis compostos voláteis de iodo radioativo, presentes no ambiente de uma clínica de medicina nuclear, utilizando tecnologia nacional, sendo de baixo custo e possibilitando a regeneração do meio filtrante.

Como objetivos secundários do trabalho de pesquisa, citam-se:

- a. Estudar os procedimentos de adsorção de gases contendo iodios radioativos por elementos filtrantes;
- b. Desenvolver um procedimento para avaliar filtros industriais pela técnica de radiotraçadores;

Este trabalho está subdividido em capítulos, onde, no capítulo II, são apresentados os fundamentos teóricos sobre o iodo, incluindo as técnicas de adsorção das diferentes formas químicas de iodios radioativos voláteis; a técnica de radiotraçadores de estímulo-

resposta associado à análise pela metodologia de momentos estatísticos. No capítulo III, é descrito o protótipo a ser usado nos testes experimentais, desenvolvido para o estudo de imobilização dos iodios radioativos, assim como os materiais usados para os testes. O capítulo IV contém os resultados e comentários das análises dos experimentos. No capítulo V, encontram-se as conclusões deste trabalho, além das sugestões que possibilitam ampliar o emprego deste filtro para outros gases de exaustão.

I.3 – Revisão Bibliográfica.

Nos últimos anos, vários estudos têm sido desenvolvidos, visando à captura de resíduos radioativos dispersos no ar, com a finalidade de se evitar a contaminação de funcionários e da população nas proximidades de usinas nucleares ou indústrias de reprocessamento de combustíveis nucleares.

Após a segunda guerra mundial começaram as pesquisas para a construção de centrais nucleares. Em dezembro de 1951, surgiu o primeiro reator nuclear experimental em Idaho, Estados Unidos. Em 1953, o presidente norte-americano Eisenhower propôs o programa “Átomo pela paz”, que visava a utilização da energia nuclear de forma benéfica. Um ano mais tarde, a União Soviética instalou sua primeira usina nuclear. Com as usinas nucleares surgiram também os problemas, quanto à geração de lixo radioativo e de subprodutos da fissão nuclear.

Em 1951, cientistas, visando o problema dos subprodutos radioativos gerados pelo processo da fissão nuclear, criaram um grupo de pesquisa, cujo objetivo era garantir a liberação segura de gases por chaminés, e assim, minimizar os problemas de contaminação ambiental. Surgiu, assim, a Conferência Educacional Anual de Limpeza do Ar ou AEC (Annual Educational Conference - Air Cleaning Conference). A AEC começou com um pequeno grupo de engenheiros e, por isso, as três primeiras conferências foram chamadas de AEC Divisão de Engenharia. Na segunda conferência, o comitê decidiu por uma edição de relatórios sobre as conferências (Handbook on Air Cleaning). Já a terceira conferência foi marcada pelo levantamento dos problemas do ar contaminado, relatados por um grupo de trabalhadores. A quarta conferência foi marcada pelas apresentações de artigos referentes ao levantamento meteorológico sobre

a dispersão do ar nas proximidades das usinas e pela criação de uma divisão de desenvolvimento e tecnologia em reatores, visando a limpeza do ar. Na quinta edição, ficou registrada a entrada das empresas de indústrias privadas, onde se relataram os problemas dos líquidos metálicos gerados pelos processos. A sexta conferência foi marcada pela participação de estrangeiros, que contribuíram com relatos sobre os problemas gerados pela não captura simples de diversas formas químicas de iodo volátil. Os primeiros artigos com dados sobre o estudo de filtros absorvedores para capturar formas de iodos radioativos surgiram somente na décima primeira edição da conferência. Com o passar dos anos, devido ao grande crescimento tecnológico e científico, foi melhorando, cada vez mais o controle e conseqüentemente a qualidade do ar liberado.

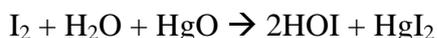
Em 1970, a Agência Internacional de Energia Atômica gerou um relatório em que se descrevia a importância de filtros em instalações nucleares e se recomendava a utilização de filtros do tipo HEPA, que apresenta uma eficiência de até 90% para retenção de impurezas no ar das instalações (IAEA, Technical Reports Series - 122). Porém, isso não significava que este tipo de filtro poderia ser utilizado nas saídas de ar de exaustão de gases tóxicos. Esse relatório apresentou também alguns dados importantes para a produção de filtros para exaustão, tais como: materiais resistentes a ácidos, temperatura, fluxos, dimensão, etc.

Alguns dos artigos que relatavam o processo de captura de iodos radioativos, apresentados em congressos da AEC, foram relevantes, tais como:

KELLER, J. H., *et al.* (1970a) selecionaram e quantificaram cada uma das principais formas químicas de iodos voláteis na atmosfera, nas proximidades de usinas nucleares ou de reprocessamento; desenvolveram um filtro com meios adsorvedores, seletivos para cada forma química de iodo encontrada: iodo elementar, ácido hipoiódico e iodeto de metila (orgânico). Cada adsorvedor deveria ser efetivo para apenas uma forma de iodo. Os testes foram executados em um sistema com vazão de 50 ft/min, em um leito de 0,5 polegadas de diâmetro interno, contendo “Chromosorb-P”, zeólitas impregnadas com cobre, zeólitas impregnadas com prata e carvão ativo, respectivamente, sendo de uma polegada o comprimento de adsorvedor em cada camada. Para gerar as diversas formas químicas de iodo, utilizaram um gerador de

particulados. Para capturar iodo elementar foi usado como substrato, “Chromosorb-P” impregnado com CdI_2 (iodeto de cádmio), que apresentou eficiência para capturar iodo elementar maior que 99%; menor que 0,1%, para capturar iodeto de metila; e entre 3 e 4 %, para a captura do ácido hipoiódico. Para capturar ácido hipoiódico, foram usados zeólitas impregnadas de cobre, com uma proteção de H_2S (não reage com o iodo) contra oxidação, utilizaram também a alumina impregnada de 4-iodofenol para capturar ácido hipoiódico. Para capturar o iodeto de metila foram utilizadas zeólitas impregnadas com prata e o carvão ativo foi usado apenas por segurança. Os resultados não foram efetivos para adsorver ácido hipoiódico, em meios com alta concentração de umidade no ar, sendo aconselhado utilizar substratos com tamanhos de grãos menores. Os testes mostraram que o filtro seletivo poderia ser utilizado para quantificar separadamente cada uma das formas químicas de iodos voláteis.

KELLER, J. H., *et al.* (1970b) em seus estudos descobriram que é possível encontrar o ácido hipoiódico (HOI) em sistemas de exaustão de gases em usinas nucleares, na ocorrência de algum acidente radiológico. Porém, para que ocorra alguma liberação desse radioisótopo, são necessárias algumas condições, como: passar um líquido a uma temperatura de 90 °C, num meio com pH de 10. Para os testes foi gerado o HOI, através da seguinte reação:



Nota-se que o iodo elementar é convertido para o ácido hipoiódico, causando uma diminuição no aparecimento de I_2 . Para testar a teoria, executaram testes gerando as principais formas de iodos voláteis (I_2 , HOI e CH_3I). Para reter cada espécie, usaram um cartucho adsorvedor, para cada tipo de forma química: iodeto de cádmio, zeólita impregnada de cobre, zeólita impregnada de prata e carvão ativo como segurança, respectivamente.

PENCE, D.T., *et al.* (1971) utilizaram apenas o carvão para absorver qualquer forma de iodo radioativo, que apresentou várias desvantagens, como: desorção a baixa temperatura; baixa eficiência para altas taxas de umidade relativa do ar, ponto de ignição maior que 100 °C; baixa capacidade de absorção de iodo; e, ainda, pode provocar reações explosivas, ao absorver vapores de ácido nítrico. O projeto teve o objetivo de desenvolver um material inorgânico como adsorvedor de iodo com alta eficiência de remoção, baixa ignição, alta eficiência de remoção em ambientes com altas

taxas de umidade atmosférica e variações bruscas de temperatura. Para isso, foram gerados gases de I_2 (iodo elementar) e CH_3I (iodeto de metila), com a simulação de altas umidades relativas de 80 a 100 %; variação de velocidade facial (velocidade superficial do fluxo, calculada entre os pontos de medida) de 45 a 100 ft/min e temperaturas de 60, 90 e 125 °C. Para testar a eficiência, além do carvão ativo (MAS 85851), também foram utilizadas zeólitas impregnadas com prata, cádmio, cobre, chumbo e tálio. As zeólitas são ótimos substratos adsorvedores para as formas de iodo, tendo apenas, quando impregnadas com prata, a eficiência de 95,0 a 99,9 %, que depende das condições de velocidade e umidade relativa do ar. Também apresenta grande resistência à temperatura e aos efluentes de gases corrosivos provenientes de ácidos (NO_2 e SO_2). As zeólitas impregnadas com cádmio, cobre, chumbo e tálio não foram eficientes. Já o carvão, quando foi testado apenas para o CH_3I , sua eficiência variou de 90 a 98,0 %.

ACKLEY, R. D., *et al.* (1972) estudaram o desempenho de absorvedores de radioiodo a serem aplicados em usinas de reprocessamento de combustíveis. Foram três os absorvedores estudados: zeólita impregnada de prata com 1/8 polegada de mesh, um substrato inorgânico composto de sílica com alumina impregnada de prata (GX135) e carvão ativo de 8 a 14 mesh, impregnado com iodo. A novidade incluída neste trabalho é que, para aperfeiçoar a captação de iodo metílico, adicionou-se um cartucho de oxidação catalítica (Hopocalite), que converte as formas orgânicas de iodo em iodo elementar. No processo de simulação, marcou-se o iodo metílico com ^{130}I ($T_{1/2}=12,3$ horas) e o iodo elementar com ^{125}I ($T_{1/2}=60$ dias). O carvão ativo não apresentou bons resultados, sendo a zeólita a mais eficiente, apresentando um fator de descontaminação constante. O substrato inorgânico apresentou boa eficiência com a adição do cartucho de “Hopocalite”.

EVANS, A. G. (1972) estudou os efeitos da adsorção de iodo orgânico em carvão ativo não impregnado e impregnado de TEDA (trietilenodiamina) e/ou KI_3 , sob um intenso campo de irradiação, com fonte de ^{60}Co . Através de cromatografia gasosa, encontrou a forma orgânica, como a principal forma química gerada de iodo (acidente radiológico). Dentre elas estão iodeto de metila (CH_3I), iodeto de metileno (CH_2I_2), iodeto de etila (C_2H_5I) e iodeto de vinil (C_2H_3I), sendo também encontradas também formas químicas inorgânicas sem a presença de iodo como o metanol e o nitrometano. Os testes foram executados para avaliar os adsorvedores de iodo com o aumento da

temperatura e a umidade relativa do ar. O sistema foi composto de cartuchos de duas polegadas de diâmetro, 1 ft de comprimento, e com velocidade facial de 55 ft/min (velocidade entre a distância dos detectores com o respectivo intervalo de tempo da passagem do traçador pelos mesmos). Os resultados mostraram que a desorção era maior, quanto menor fosse a umidade de ar, e a absorção é maior apenas com os tamanhos das partículas de 8 a 12 mesh (34,2%) e de 12 a 16 mesh (65,8%). Concluiu-se que os adsorvedores de carvão ativo impregnados foram mais efetivos para captura das formas orgânicas de iodo do que os não impregnados, e que a taxa de desorção era função do tamanho da partícula, comprimento do campo radioativo, temperatura, umidade do ar e da mistura dos gases liberados.

KITANI, S., *et al.* (1972) realizaram estudos com 27 tipos de impregnantes (orgânicos e inorgânicos) em carvão ativo, de granulometria de 10 a 14 mesh, sob alta umidade (90%), para reter formas orgânicas de iodos voláteis (CH_3I), num sistema com um fluxo de velocidade facial de 24 cm/s, composto de 5 cartuchos em série de 30 mm de diâmetro interno e 5 mm de comprimento cada um. Os impregnantes que apresentaram eficiência acima de 90% foram os inorgânicos: bromo 10% wt, iodeto de potássio, tiocianato de potássio e o iodeto de estanho 1% wt; e o orgânico: trietilenodiamina (TEDA). Porém, os que mais se destacaram foram os impregnantes contendo iodeto de estanho 1% wt e o tiocianato de potássio 10% wt, por se manterem eficientes para adsorver iodo metílico, mesmo a temperaturas de 135 °C e por apresentarem ponto de ignição acima de 400 °C.

PENCE, D. T., *et al.* (1972), na busca pelo melhor substrato para adsorção das formas químicas de iodos radioativos, concluíram que este deve apresentar as seguintes características: não inflamável a uma temperatura de 900°C, operacional a altas temperaturas (400°C) ou altas taxas de umidade com alta eficiência de adsorção, não reativo com óxidos de nitrogênio (causando explosões), e que apresente alta eficiência de captura para todas as formas químicas voláteis de iodo. Foram estudadas zeólitas impregnadas com cátions (Cd, Cu, Hg, Pb, Tl e terras raras) com diversas granulometrias. A principal característica de produção das zeólitas é a razão entre (Si/Al), sendo que, quanto menor for a razão, mais eficiente será a capacidade de adsorver as formas químicas de iodo. Nesse trabalho, essa razão foi de 2,5. Um sistema experimental foi montado com cartuchos (2,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura), por

onde fluíam gases com formas químicas voláteis de radioiodo e velocidade facial variável de 23 a 50 cm/s. A zeólita mais eficiente (99,9%) foi a que utilizava como impregnante o cátion prata, mesmo sob alta umidade (98%), alta temperatura de 140 °C, granulometria de 12 a 14 mesh e velocidade facial de 25 cm/s. Porém, quando utilizados gases contaminados contendo (H_2S ou SO_2), os resultados mostraram uma perda de eficiência de adsorção de iodo metálico para 40%. Para comparar a eficiência de adsorção dos substratos, foi testado também carvão ativo impregnado de TEDA ou $KI-I_2$, sendo mais eficientes as zeólitas impregnadas com prata (AgX).

WILHELM, J. G., *et al.* (1972) levantaram dados sobre adsorção de iodos gasosos em substratos sólidos, para estudo de caso após acidente numa usina nuclear. Utilizaram carvão ativo impregnado de KI e também não impregnado, durante 700 dias, a uma velocidade facial de 30 cm/s. O sistema possuía uma série de seis cartuchos de 2,5 cm de comprimento e, para cada cartucho, foi quantificada a eficiência de adsorção. Os testes foram executados numa chaminé de liberação de gases de uma usina nuclear alemã. Os resultados mostraram que os carvões não impregnados apresentavam um decréscimo rápido de sua eficiência de adsorção, quando expostos a altas taxas de umidade. Além disso, esse decréscimo era menor, quando o carvão estava impregnado com KI. Outro fato interessante foi registrado, em relação à eficiência de adsorção de um cartucho para outro. Num determinado momento, quando o primeiro cartucho fica saturado, não retendo mais, o seguinte aumenta a quantidade recebida de iodo, assim, sucessivamente. Por este motivo, naquela época, utilizavam filtros com grande comprimento.

Os artigos mencionados foram importantes, pois serviram de base para o projeto de filtros para usinas nucleares, dando ênfase à captura dos radioisótopos voláteis, principalmente, o iodo que necessita reagir quimicamente para ser adsorvido pelo substrato, quer seja orgânico ou inorgânico.

Em 1973, a IAEA (International Atomic Energy Agency) lançou, em relatório técnico, recomendações sobre o controle de iodo nas Indústrias Nucleares. Os procedimentos necessários a se adotar numa usina de potência nuclear ou numa indústria de reprocessamento de combustíveis nucleares foram revisados, gerando o tratamento adequado para os efluentes gerados por essas práticas. Os efluentes poderão

ser liberados para a atmosfera, somente quando não ultrapassarem os limites de dose recomendados pelo órgão fiscalizador de cada país. Sendo assim, o relatório sugere que toda instalação radiativa, que libera radioisótopos para o ambiente, deve adicionar ao sistema de exaustão de gases um filtro correspondente a cada tipo de efluente liberado (IAEA, Technical Reports Series - 148).

São vários os trabalhos gerados após este relatório que visam a melhoria na produção de um meio adsorvedor para reter gases de exaustão contendo espécies químicas de iodo:

GAL, I. J., *et al.* (1974) testaram a capacidade de adsorção do iodo metálico em substratos de alumina impregnados com vários tipos de nitratos de Ag, Cu, Pb, Ni, Co, Ce, Cd e Zn, com cartuchos de granulometria de 0,08 a 0,16 cm de cinco centímetros de diâmetro e cinco centímetros de comprimento, variação de temperatura de 50 a 150 °C, velocidade facial de 8 a 20 cm/s e umidade relativa do ar de 27 a 90 %. O único que apresentou eficiência de adsorção acima de 90 % foi o de substrato de alumina impregnada com nitrato de prata. Os testes revelaram que, quanto mais se aumentava a umidade do ar, diminuía consideravelmente a eficiência de retenção para o iodo metálico e a velocidade facial que apresentou a maior eficiência de retenção variou entre 8 a 16 cm/s.

WILHELM, J. G., *et al.* (1976), visando melhorar a captura das formas de radioiodo em usina de reprocessamento da Alemanha, basearam seus estudos no substrato conhecido como AC 6120 (base em ácido de silício amorfo), impregnado com nitrato de prata a 7% wt, para desenvolverem um substrato com uma maior quantidade de nitrato de prata com 12% wt, que recebeu o nome de AC 6120/H₁. Os testes para comparar a eficiência de retenção dos substratos foram efetuados, empregando um sistema com quatro cartuchos de 2,5 cm de comprimento, velocidade facial de 25 cm/s, granulometria de 1 a 2 mm, sob a temperatura de 150 °C. Após 120 dias, os testes mostraram pouca diferença entre as eficiências de retenção: no primeiro cartucho, 99,85 %, para a AC 6120, e, 99,97 %, para AC 6120/H₁. Os autores concluíram o trabalho, comparando a capacidade de impregnação com nitrato de prata entre os AC 6120/H₁ com as zeólitas, sendo que este novo substrato apresentou maior número de sítios ativos que recebem prata, sendo superior aos baseados nas zeólitas.

JOLLEY, J. G., *et al.* (1984), ao estudarem a adsorção de moléculas orgânicas gasosas em zeólitas impregnadas com prata (AgX), desenvolveram um sistema de teste, dotado de uma coluna de vidro com 0,4 cm de diâmetro interno e 12 cm de comprimento, com fluxo de velocidade facial de 50 cm/s. A zeólita foi ativada num meio com gás de hélio a 200 °C por 24 h. Para os testes foram gerados contaminantes como gases, contendo alcanos, alcinos, aromáticos, cetonas, álcool e halogênios. Para avaliarem o gás retido, foram utilizadas técnicas de espectroscopia com infravermelho, difração de raio-X e espectroscopia por espalhamento fotoelétrico. Os resultados mostraram que, para cada 12 g de grãos medidos de 0,1 a 0,3 g, são formados gases orgânicos, ou seja, ocorre adsorção cinética com orgânicos. O espectro de infravermelho indicou a adsorção de hidrocarbonetos não halogênados. Além disso, com todos os halogênios, ocorreu uma quebra da molécula orgânica, formando uma ligação com a prata (AgI, AgCl, AgBr, etc.).

HERRMANN, F. J., *et al.* (1988) testaram o desempenho de um sistema com colunas de AC 6120/H₁ na usina de reprocessamento da Alemanha, Karlsruhe Reprocessing Plant (WAK), onde o filtro AC 6120/H₁ era utilizado rotineiramente, desde 1987. O sistema era composto de um filtro de HEPA para particulados, seis colunas de AC 6120/H₁, para reter formas de iodos radioativos, e dois cartuchos adicionais. Os cartuchos adicionais, posicionados no final de cada coluna, continham carvão ativo impregnado com iodeto de potássio 1,5 % wt (SS 207 B), sendo usado por medida de segurança, caso alguma forma de iodo escapasse das colunas anteriores. Cada coluna apresentava 0,025 m de diâmetro, uma vazão de 2,4 m³/h, operando com temperaturas de até 150 °C. Para avaliar a eficiência de retenção de iodos, os cartuchos foram analisados de 50 em 50 dias, encontrando uma eficiência de retenção de até 99,8 %, com um fator de descontaminação (FD) maior que 100, onde $FD = 1 / (1 - \text{Eficiência de Adsorção})$. Outro fato importante citado neste trabalho foi a necessidade de regeneração do material adsorvedor com NO₂, que é aplicado fora do sistema, quando o fator de descontaminação diminui para 20.

MOSTOVAYA, L. Ya., *et al.* (1988) estudaram a impregnação de nitrato de prata em dois tipos de substratos que apresentaram diferentes propriedades de ácido-base, dióxido de silício e óxido de alumínio, para adsorver formas gasosas de iodos radioativos. Os substratos foram preparados com concentração de nitrato de prata que

variou de 1 a 10 % wt. Todos apresentaram problemas durante a preparação, causados pela hidrólise, no processo de lavagem com água deionizada, que foram, entretanto, solucionados, adicionando, no processo de impregnação, ácido nítrico. O óxido de alumínio também apresentou este problema, mas porque uma grande quantidade de íons de (OH⁻) foi trocada por íons de (NO₃⁻). Ambos os substratos puderam ser utilizados para adsorver moléculas de iodo, necessitando apenas a impregnação com nitrato de prata em presença de ácido nítrico.

DILLMANN, H. G., *et al.* (1990) desenvolveram um sistema para limpeza de ar de reatores nucleares na Alemanha. O sistema de filtro era composto de fibras seletivas (HEPA, removendo partículas menores que 1 µm), adequadas para separar particulados em usinas nucleares, e de um cartucho adicional, peneira molecular (zeólitas de prata), para reter subprodutos de fissão voláteis contendo iodo resistente a altas temperaturas (200 °C). Os testes com leitos de granulometria de 1,5 a 3 mm, 5 cm de comprimento e velocidade facial de 32 cm/s, mostraram-se eficientes, retendo 99 % de iodo elementar (inorgânicos) e 90 % de iodeto de metila (orgânicos).

HERRMANN, F. J., *et al.* (1991) descobriram que o nitrato de prata não era o responsável pela adsorção das formas de iodo, mas, sim, o elemento prata. Adicionaram ao sistema um cartucho que adsorve apenas a forma inorgânica de iodo, DSM 11 (composto por um substrato de SiO₂ impregnado com 6% Al₂O₃ e 7% de KI). Dividiram a entrada do sistema, que apresentava uma vazão de 500 l/h, em quatro leitos com DSM 11 (80 °C), quatro leitos com AC 6120/H₁ (80 °C), quatro leitos com SS 207 B (80 °C) e quatro, com AC 6120/H₁ (180 °C). Cada leito tinha de 32 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. Concluíram que, das formas de iodo liberadas da usina de reprocessamento da Alemanha, 85% são formas orgânicas e 15% são formas inorgânicas, mas o responsável pela captura de iodetos inorgânicos era o elemento prata. Sugeriram que novos estudos poderiam empregar substratos impregnados com prata, sem a necessidade de estar na forma de nitrato de prata.

LEE, B. S., *et al.* (1991) caracterizaram química e isotopicamente as formas químicas de iodetos voláteis liberadas do laboratório de reprocessamento de materiais radioativos. Através de um sistema de exaustão de ar com vazão de 236 cm³/s, passando por um filtro de alumínio com cartuchos sequenciais seletivos para cada forma de iodo a

ser capturado (5,8 cm de diâmetro e 2,6 cm de comprimento cada cartucho), um filtro tipo HEPA no início, para particulados sólidos; cartucho adsorvedor de iodeto de cádmio, para iodo elementar (I₂); cartucho de iodofenol, para ácido hipoiódico (HOI); cartucho de zeólitas impregnada com prata, para iodos orgânicos (CH₃I); e, caso alguma forma de iodo ainda conseguisse passar, utilizaram um último cartucho de carvão impregnado com TEDA. Foram encontrados ¹³¹I (21,5 %), ¹³³I (10,4 %), ¹³⁵I (1,6 %) e ¹³²I (66,5 %); esta última não era esperada, porém, constatou-se que era do decaimento por emissão beta do ¹³²Te. Todas as formas químicas de iodos esperadas (I₂, HOI e CH₃I) foram capturadas, sendo em maior quantidade as formas orgânicas de iodo (72 %). Outro fato inusitado foi que grande quantidade de iodetos de metano atravessaram os cartuchos, inclusive, o cartucho de zeólitas impregnadas de prata, sendo apenas capturadas pelo filtro de carvão impregnado com TEDA (segurança), no final do sistema.

FUNABASHI, K., *et al.* (1994) objetivaram capturar iodo metílico (CH₃I) com uma eficiência maior que 90% em ambientes com altas taxas de umidade relativa do ar. Desenvolveram, então, um meio adsorvedor com alumina impregnado de prata (AgA), instalado na saída de ventilação do sistema de exaustão de gases radioativos. Simularam o gás radioativo por um método convencional, reagindo Na¹³¹I com sulfato dimetílico, formando CH₃¹³¹I com atividade de 37 MBq/g (1 mCi/g). Foi estudado o melhor diâmetro de poro para o substrato de 10, 60 e 100 nm, com maior captura de iodo em filtros com 2 e 5 cm de altura. Concluíram que a melhor impregnação ocorria para a estrutura com diâmetro de poro com 60 nm, numa umidade relativa de 90 % do ar atmosférico e para filtros com cartuchos de 5 cm de altura.

TAKESHITA, K., *et al.* (1995) estudaram o efeito do tamanho dos grãos de nitrato de prata, usados na impregnação de substratos sólidos, para adsorver iodo metílico. Os métodos utilizados para impregnação do substrato “styrene-divinylbenzene copolymer”, SDB ([CH₂CH(C₆H₅)]_x[CH₂CH[C₆H₄(CHCH₂)]]_y), foram: 1) mistura de “dioxano” (C₄H₈O₂) com 50 % wt de AgNO₃, com uma temperatura de 70 °C por 1 dia; 2) um complexo de prata-amina formada pela solução do complexo [Ag(C₄H₉NH₂)₂]⁺NO₃⁻ e um fluxo de gás N₂ a uma temperatura de 180 °C (íon nitrato). No processo designado como “íon nitrato”, o tamanho dos cristais de AgNO₃ foi de 60% menor do que no processo “dioxano”. Foram feitos testes em um leito de 1,5 cm de

diâmetro e 1 cm de comprimento. Os resultados mostraram que, quanto menor o tamanho do grão de AgNO_3 , mais eficiente era a capacidade de adsorção de CH_3I . Também foram executados testes, aumentando-se a quantidade de nitrato de prata no substrato com: 0,10; 0,37 e 0,68 ((g) AgNO_3 / (g)SDB). Concluiu-se que, quanto mais se aumentava a quantidade de nitrato de prata, menor era a capacidade de adsorção, devido à diminuição de volume do poro do substrato.

LEE, H. K., *et al.* (1996), através do método de isotermas, testaram a adsorção de iodo elementar e iodo metálico em substratos de carvão. Utilizaram três tipos de leitos contendo carvão ativo de 8 a 16 mesh: natural, impregnado com TEDA 2 % e TEDA 5%. Os testes foram executados em tubos de vidro de 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Concluíram que o leito contendo carvão ativo foi o mais efetivo, seguido do impregnado com TEDA 2 % e, por último, TEDA 5 %, isso devido à diminuição da estrutura de volume do poro (cc/g) do substrato, que diminui com a impregnação, ou seja, quanto mais impregnado o carvão, menos efetivo se torna para adsorver formas de iodo.

SAKURAI, T., *et al.* (1997) estudaram o aprisionamento de ^{129}I em substratos inorgânicos (sílica gel), granulometria de 1 a 2 mm, impregnados com 12 % wt de prata (AgS ou AC6120). Para avaliar a penetração do iodo, montaram um sistema com velocidade facial de 22 cm/s e temperatura de 150 °C e posicionaram dez cartuchos adsorvedores em série com 25 mm de diâmetro e 10 mm de espessura cada um. As análises dos resultados foram feitas pelas contagens registradas por um detector de germânio, sendo feitas as contagens pela frente e por trás de todos os cartuchos adsorvedores. Também foram avaliadas contagens feitas, misturando os grãos após a passagem do iodo. Variaram a quantidade de iodo injetada de 34 a 768 mg, na forma química de NaI^{129} . Concluíram que, quanto maior a concentração de iodo injetado, maior é a penetração no filtro, sendo que, para uma massa de 768 mg de NaI , chegou até o sétimo filtro.

PARK, G. LL., *et al.* (2000) avaliaram a capacidade de adsorção e desorção de iodo metálico em substratos para altas temperaturas (380 °C). Utilizaram em seus estudos três tipos de substratos de zeólita-13X impregnada com prata, com granulometria de 8 a 16 mesh, “zeocarbon” (40 % wt de carvão e 60 % wt de zeólita

5A), com granulometria de 2 a 3 mm e carvão ativo, com granulometria de 8 a 16 mesh. A zeólita (AgX) foi preparada, a partir da zeólita natural (NaX), ativada com um fluxo de vapor de água contínuo, lavada com água deionizada e impregnada com nitrato de prata 1,2 N, por oito horas, e seca a 180 °C, por 24 horas. Os cartuchos tinham 0,022 m de diâmetro, 0,6 m de comprimento, velocidade facial de 0,18 m/s. Os testes com temperaturas de 30 °C, para AgX, zeocarbon e carvão ativado e 170 °C, para AgX e o carvão ativado, indicaram que o carvão ativo à 30 °C foi o que apresentou o maior nível de adsorção do iodo metílico. Ocorreu uma diminuição da adsorção (indicando desorção), quando se aumentava a temperatura para 170 °C, para carvão ativo e o “zeocarbon”, porém, a zeólita aumenta sua capacidade de adsorção. Neste artigo, também foram executados testes de impregnação com íons de prata em zeólitas-X, com 10 % wt, 20 % wt e 30 % wt. A que apresentou melhor capacidade de adsorção de iodo metílico foi a impregnação com 10 % wt e a melhor temperatura de operação de 150 a 250 °C. A justificativa foi que quando a quantidade de prata supera a 10 % wt, o volume do poro do substrato diminuía, aumentando sua desorção.

KORNIENKO, V. I., *et al.* (2004), com o objetivo de desenvolver um novo adsorvedor para recuperação de iodios radioativos, estudaram a concentração de impregnantes com os agentes adsorvedores: AgNO₃, TEA, KI, BaI₂, etc e tendo a zeólita (OU-A) como substrato principal. A concentração de AgNO₃ e TEA variou de 1 a 25 % wt. Encontraram uma eficiência de remoção de iodo, através de zeólitas impregnadas com: AgNO₃, de 96,0 a 99,7 %; TEDA, de 99,7 %; TEA, de 95,7 a 99,4%; KI, de 97,0 a 99,3 %; BaI₂, de 99,8 % e uma mistura contendo 2AgNO₃ + KI + 2TEA a 99,9 %. Concluíram que, quando aumentavam a densidade de superfície de 50 a 120 g/m² ou, quando aumentavam a concentração do agente impregnante de 1 a 25 wt %, aumentava também a eficiência de remoção de iodo de 95,7 a 99,8 %. Outra importante observação foi que a eficiência de adsorção diminuía com o tempo (1.000 horas). Assim, foi designado como Filosorb-D (TU 696 800-010-00210234-99) esse novo adsorvedor de iodo, resistente a altas temperaturas de 120 a 150 °C. O novo adsorvedor consiste de duas camadas densas de material filtrante, sendo de FPA e PP-PE (material baseado em fibras de polipropileno e poliéster), impregnado nas zeólitas, e uma camada de FSB-75-11 (papel de fibra de vidro) ou MVFE-22 (material com baixa permeabilidade e alta resistência aerodinâmica). Operando numa velocidade facial de 6 cm/s, esse adsorvedor apresentou eficiência de remoção de 99,0 a 99,9 %, durante

10.000 a 15.000 horas, e de 1 a 2 % de liberação do iodo radioativo, na saída do adsorvedor.

KOARASHI, J., *et al.* (2006), ao monitorarem a saída de exaustão de gases contendo ^{129}I , derivado da fissão nuclear de uma usina de reprocessamento (TOKAI), utilizaram várias combinações diferentes de meios adsorvedores de iodo. O teste foi realizado na saída da chaminé de exaustão da usina, onde, um sistema foi acoplado em paralelo à chaminé com uma bomba de sucção, em série com os filtros, ajustado numa vazão permitida variar de 40,6 a 75,0 l/min. Os adsorvedores foram deixados por 24 horas na chaminé e, após isso, foram realizadas as contagens individuais num contador de Ge(Li), em laboratório. Os testes mostraram-se eficientes, com eficiência maior que 90 %, para uma combinação em série de carvão vegetal impregnado num papel de filtro (CP-20, Haruna Co., Ltd., Japan) e um cartucho de carvão ativado impregnado com TEDA (10% wt) (CHC-50, Haruna Co., Ltd, Japan).

LIN, C. C., *et al.* (2006) evidenciaram a volatilização do iodo e que diferentes moléculas de iodo podiam ser formadas, dependendo das condições e formas químicas encontradas no meio ambiente próximo às amostras de iodo. Mesmo em baixas concentrações de iodo, podiam gerar formas químicas voláteis, onde eram gerados aerossóis de iodo sob várias condições químicas. As principais formas encontradas, quando as amostras eram oxidadas, foram: I_2 e HOI. Estavam presentes também formas orgânicas geradas a partir de KI ou NaI com fragmentos orgânicos dispersos no local. Experimentos com oxidação e redução do iodo foram executados para provar este fato. Para absorver as formas químicas voláteis de iodo, foram utilizados cartuchos diferentes: cartuchos de CdI_2 para absorver o I_2 ; cartuchos de iodofenol, para absorver HOI; cartuchos de zeólitas impregnadas com prata, para as formas orgânicas de iodo; e um cartucho com carvão ativo de segurança, caso alguma das formas conseguisse escapar dos cartuchos anteriores. A eficiência de remoção foi de 95% para esta configuração de cartuchos adsorvedores. Os resultados mostraram que realmente era possível encontrar, através de transformações químicas de iodo radioativo, formas químicas voláteis do mesmo, que dependam das condições químicas ambientais de gases carregadores e das próprias soluções com iodo.

- Técnica de estímulo e resposta:

Neste trabalho, serão empregados sílica e carvão ativo, como substratos, para adsorver/absorver as formas químicas voláteis de iodo. Para se avaliar esses elementos filtrantes, será aplicada a técnica de estímulo e resposta com traçadores radioativos que consiste na introdução do radiotraçador e no registro do sinal da passagem da nuvem radioativa por dois detectores posicionados do seguinte modo: um, antes, e o outro, logo após o filtro. As análises são baseadas nos momentos estatísticos referente à relação entre estas curvas registradas pelos detectores. Alguns artigos referentes a essa metodologia podem ser citados:

MICHELSEN, *et al.* (1969), para calcularem o tempo médio de residência e o número de Peclet, que são parâmetros muito utilizados e importantes na Engenharia Química, montaram um sistema de medidas experimentais constando de um tubo na vertical, contendo anéis de Raschig, com altura de 4,4 m, por onde fluíam água (líquido) e ar atmosférico (gás), e posicionaram dois detectores cintiladores colimados de 1 cm, em dois pontos da coluna sobre a horizontal, sendo marcadas com radiotraçadores tanto a fase líquida e como a gasosa. Aplicaram a técnica de momentos ponderados para os valores experimentais e ajustaram os modelos teóricos da função de transferência. Devido a não terem encontrado valores constantes para o número de Peclet, pela técnica de momentos, desaconselharam a utilização do método empregado, para fluidos turbulentos, porém, para o cálculo do tempo médio de residência, encontraram valores satisfatórios e reprodutíveis.

ØSTERGAARD, *et al.* (1970) desenvolveram uma metodologia para o cálculo de tempo médio de residência e da dispersão, em um fluxo do tipo pistão contínuo. Aplicaram a técnica de radiotraçadores, através da análise pela metodologia de relação de momentos, baseada nas equações de transferência de massa. Partindo do modelo da dispersão axial (teórico), chegou a três relações de momentos estatísticos (ordem 0, 1, 2), gerando funções logarítmicas, sendo todas elas bem sucedidas; porém, atentou para a escolha do melhor valor da variável Laplaciana, S , que depende de diversos fatores incluindo a forma de injeção e a distância do ponto de medida. E quanto maior a relação da ordem do momento, maior é a dispersão de seus cálculos.

ANDERSSEN, *et al.* (1971) estimaram parâmetros de escoamento, detalharam a metodologia de momentos estatísticos simples, comparando com a metodologia de momentos ponderados, assim como, as limitações, quanto à escolha do melhor valor para a variável Laplaciana, S , mostrando, através de exemplos, que o erro aumentava para uma escolha inadequada de “ S ”. Concluíram que o melhor método para se estimar parâmetros físicos, como o tempo médio de residência e a dispersão, seria o método dos momentos ponderados, mesmo quando não se tivesse um pulso de entrada perfeito.

FAHIM, *et al.* (1982) publicaram uma revisão que objetivava comparar a precisão entre os métodos de momentos simples, momentos ponderados, função de transferência, análise de Fourier e análise pelo domínio do tempo, ao estimarem o tempo médio de residência, τ , e o número de dispersão, N_d . O artigo mostrou detalhadamente cada metodologia e suas particularidades. Concluíram que todos os métodos eram viáveis, obtendo medidas precisas para estimar o τ e o N_d , com exceção do método de momentos simples, onde foi encontrado um valor de N_d muito disperso, em relação ao teórico. Os métodos mais precisos, em relação ao teórico, para a estimativa dos valores de τ e N_d foram os dos momentos ponderados, análise de Fourier e análise pelo domínio de tempo.

CHRYSIKOPOULOS, C. *et al.* (1992) estudaram um fator de retardo do fluxo (líquido/sólido) e o coeficiente de dispersão que são parâmetros importantes na geoquímica. Os autores executaram testes experimentais para comprovar a versatilidade da técnica de traçadores, através da análise pelas equações dos momentos, que foi modificada por Brenner, baseada na equação de dispersão de Taylor-Aris. Para os testes, foram marcadas, tanto a fase líquida, quanto a fase sólida, numa unidade com fluxo contínuo, isotérmico e sem reações químicas (conservativo). Os resultados se basearam em modelos macroscópicos de transporte e apresentaram valores precisos do fator de retardo e da dispersão para um dado sistema.

BUFFHAM, *et al.* (1993) fizeram uma revisão detalhada da metodologia dos momentos e das medidas baseadas no balanço de massa, para calcularem o tempo médio de residência e dispersão de traçadores num sistema de fluidos.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1 – Iodo.

O iodo foi descoberto em maio de 1811, pelo químico francês Bernard Courtois, que estava encarregado de produzir nitrato de potássio para os exércitos de Napoleão. O processo de Courtois consistia na conversão de nitrato de cálcio, oriundo de depósitos de salitre, em nitrato de potássio, por intermédio da potassa, obtida a partir das cinzas de algas marinhas. Courtois verificou que, quando lavava essas cinzas com ácido sulfúrico, para extrair impurezas, surgia um leve fumo que se condensava nos instrumentos de cobre, corroendo-os. Posteriormente, observou a formação de um precipitado, que, ao ser aquecido, dava origem a um vapor de cor violeta. As propriedades dessa nova substância foram primeiro investigados por F. Clement e J. B. Desormes e, posteriormente, por Gay-Lussac, que a identificou como um novo elemento. Gay-Lussac chamou-a de “iodo”, que deriva da palavra grega *ioeides* (violeta).

II.1.1 – Características.

O iodo é um elemento químico de símbolo I, pertencente ao grupo dos halogênios, do qual também fazem parte o flúor, o cloro, o bromo e o ástato. É encontrado na natureza sob a forma de diferentes compostos ou moléculas diatômicas. O iodo tem função fisiológica na composição de hormônios da glândula tireóide, além de formar compostos largamente empregados na indústria química.

II.1.2 – Propriedades físico químicas.

À temperatura ambiente, o iodo é um sólido altamente volátil, de aspecto e coloração quase negra. O iodo é pouco solúvel na água, mas altamente solúvel em compostos como o dissulfeto de carbono, tetracloreto de carbono e clorofórmio, aos quais confere coloração violeta. Quando dissolvido em álcool ou éter, forma soluções de

cor marrom. Seus isótopos radioativos apresentam um número de massa entre 119 a 139 (u.m.a.). Como os demais halogênios, o iodo não ocorre na natureza em estado livre.

II.1.3 – O iodo no corpo humano.

As células da tireóide são o principal sítio de captação seletiva de iodo no corpo humano. Essa glândula tem a forma de borboleta, é dura, lisa e tem cor vermelho-castanho. Compõe-se de dois lobos alongados, de cada lado da traquéia, unidos por um delgado istmo de tecido ao nível da cartilagem cricóide, como mostrado na figura II.1. Sua estrutura consiste em numerosos folículos, cada um com cerca de 300 μm de diâmetro e formado por células circundando um lúmen preenchido por colóide. O colóide é uma solução de proteínas, das quais a tireoglobulina totaliza cerca de 80 % (GUYTON, 1988).

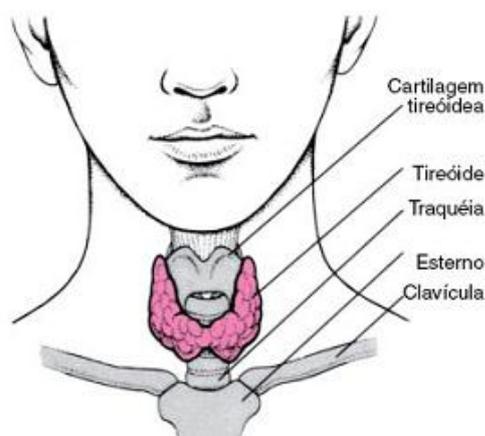


Figura II.1 – Localização da glândula tireóide.

As células tireoideanas têm 15 μm de altura e as bordas voltadas para o lúmen apresentam numerosas microvilosidades, as quais se atribuem atividades de secreção e reabsorção. Certas células não entram em contato com a superfície do lúmen, apresentam propriedades corantes ligeiramente diferentes e secretam o hormônio calcitonina, que regula o metabolismo do cálcio.

As principais funções da glândula tireóide são sintetizar e secretar hormônios para a corrente sanguínea, que distribui para os tecidos do organismo. Nas células, os hormônios tireoidianos produzem o seu estímulo metabólico e depois são degradados. A glândula tireóide secreta cerca de 75 µg de tiroxina (T₄) e 25 µg de triiodotironina (T₃) por dia. Se os níveis de hormônios no sangue diminuírem, essa alteração será detectada pelo hipotálamo e pela hipófise que, por sua vez, aumentarão a secreção do hormônio estimulador da tireóide (TSH). O TSH estimula a secreção do hormônio pela tireóide em um sistema de controle da regeneração, até que o suprimento de hormônio circulante volte ao nível original.

O iodo mantém uma relação especial com a fisiologia da tireóide porque é o elemento principal e constituinte característico dos hormônios tireoidianos. O Conselho de Pesquisa da América do Norte recomenda a ingestão de 150 µg/dia de iodo para um adulto de 70 kg, ou seja, 2,1 µg/kg/dia (ATSDR, 2004). Uma dieta normal contém de 150 a 600 µg de iodetos, dependendo em parte, do consumo de certas variedades de pão e leite que contém considerável quantidade de iodetos. Outras fontes ricas de iodeto são os frutos do mar e o sal marinho, estando também presente em numerosos legumes (vagem, agrião, cebola, alho poró, rabanete, nabo) e em certas frutas (ananás, groselha, ameixa). Esses hormônios são indispensáveis ao desenvolvimento e manutenção harmoniosos do organismo, agindo sobre a maioria dos órgãos e das grandes funções do corpo: o sistema nervoso, a termogênese (que nos permite conservar uma temperatura estável), os sistema cardiovascular, os músculos esqueléticos, as funções renais e respiratórias. No ANEXO A podem ser encontrados alguns problemas típicos gerados pela disfunção da tireóide.

II.1.4 – Obtenção e aplicações.

O iodo é encontrado em pequenas proporções (entre 1 e 50 mg/kg) na água do mar, na forma de iodeto de sódio (NaI), e nos compostos petrolíferos, na forma de iodeto de potássio (KI). É extraído industrialmente das águas salgadas dos poços de petróleo e como subproduto do processo da obtenção de salitre no Chile, em cujos depósitos ocorrem na forma de iodato de sódio (NaIO₃). Estão presentes nos tecidos

orgânicos animais e vegetais em pequenas quantidades, mas é abundante nas algas marinhas que são concentradoras de iodo.

Pouco tóxico, o iodo é matéria prima para produção dos hormônios da glândula tireóide no corpo humano e, em solução alcoólica (tintura de iodo), era usado como antisséptico, até que se descobriu que retardava o restabelecimento dos tecidos. Diversos sais de iodo são empregados no tratamento de afecções como arteriosclerose, hipertensão arterial, sífilis, actinomicose, enfisemas, bronquite crônica e algumas formas de artrite. Na indústria, o iodo é componente de películas fotográficas, corantes, reagentes e produtos intermediários usados na síntese de compostos orgânicos e em laboratórios de análise.

II.1.4.1 – Terapia e diagnóstico com Iodo-131 (^{131}I).

A administração do ^{131}I é uma forma eficaz no tratamento de hipertireoidismo e neoplasias da tireóide. Para fins de diagnóstico, geralmente, outros radiotraçadores são também empregados, como o iodo-123 (^{123}I). Quando administrado por via oral em solução de iodeto de sódio, o iodo é rapidamente absorvido e retido pela tireóide nos folículos de armazenamento, com meia-vida efetiva de cinco dias, em caso de realização de exames.

O efeito terapêutico do ^{131}I está associado à emissão de nêutrons (β^-), a qual apresenta uma faixa de penetração no tecido tireoidiano de 400 a 2000 μm . Após a administração, ocorre destruição do parênquima tireoidiano, evidenciada pelo intumescimento e necrose do epitélio, desorganização dos folículos de armazenamento, edema e infiltração de leucócitos. Além de não invasiva, a terapia com iodo radioativo inclui vantagens como: fácil administração, elevada eficácia, baixo custo e reduzido desconforto ao paciente.

A cintilografia de tireóide com iodo radioativo possibilita a detecção do foco e anomalias globais na anatomia da tireóide. Tal exame correlaciona anatomia com função, e permite a detecção de alterações do tecido tireoidiano de metástase ou ainda de tecido tireoidiano residual (após terapia). O teste de captação de tireóide permite a

avaliação da função global da glândula tireóide, através da quantificação do radiotraçador acumulado pela glândula.

São aplicações importantes, no que se refere ao emprego de ^{131}I :

- Avaliação do volume e localização do tecido tireoidiano e de massas tireoidianas suspeitas;
- Avaliação de nódulo tireoidiano;
- Avaliação de anormalidades tireoidianas congênitas;
- Diferenciação do hipertireoidismo de outras formas de tireotoxicidade;
- Identificação e localização de tecidos tireoidianos residuais funcionais e também de metástase de câncer de tireóide, após a tireoidectomia e após a terapia ablativa.

O exame de captação de tireóide é útil nos seguintes casos:

- Cálculo da dosagem de ^{131}I para o tratamento de pacientes hipertireóidicos ou para terapia ablativa;
- Diferenciação do hipertireoidismo de outras formas tóxicas.

A imagem de corpo inteiro para carcinoma de tireóide é indicada nos seguintes casos:

- Determinar a presença e localização de resíduos teciduais tireoidianos funcionais, após a cirurgia para câncer de tireóide e após a terapia ablativa com iodo radioativo;
- Determinar a presença e localização de metástases decorrentes de câncer da tireóide (KATZUNG, 2003).

II.1.5 – Metabolismo do iodo.

A absorção gastrintestinal de iodeto é praticamente total e as duas principais fontes de depuração plasmática são a tireóide e os rins. O elemento entra no organismo, através do alimento ou da água, como iodeto iônico (I^-), Iodo (I_2) ou como iodo em combinação orgânica. A maioria das formas é reduzida durante a digestão, sendo absorvida como iodeto inorgânico, mas alguns compostos iodados orgânicos, incluindo a tiroxina, podem ser absorvidos intactos no trato gastrointestinal. Todo o iodeto absorvido distribui-se em um espaço de aproximadamente 25 litros de líquido, atingindo uma concentração plasmática no adulto normal entre 0,05 e 0,1 mg/l. O organismo perde o iodo, principalmente, através da urina e, em menor quantidade, nas fezes (ASDR, 2004).

A quantidade de iodo eliminada diariamente na urina depende da ingestão e é maior numa área onde o sal de mesa é o iodado ou onde se consome muito peixe marinho e/ou frutos do mar. A maior parte dos hormônios circulantes liberam iodo e parte desse iodo retorna à reserva de iodo no plasma. O corpo humano contém uma quantidade de 20 a 50 mg de iodo e a maior parte dele se encontra na tireóide. No adulto, são movimentados 60 a 120 mg de iodo hormonal por dia e o estoque de hormônio tireoidiano constitui uma reserva de 7 a 15 semanas <<http://www.geocities.com/bioquimicaplicada/hormone/resumohormone4e.htm>, em:15/02/2007>.

II.1.6 – Radiofármacos.

Por ser o iodo um precursor na síntese do hormônio tireoidiano, os principais radiofármacos usados para a imagem da glândula tireóide incluem o ^{131}I e o ^{123}I . Normalmente, moderadas concentrações desses radiotraçadores na tireóide permitem excelente visibilidade da glândula, a menos que a captação ou a função desta esteja prejudicada.

Os radioisótopos do iodo, mais empregados no ambiente hospitalar são: ^{123}I , ^{125}I e ^{131}I . Tanto o ^{125}I quanto o ^{131}I são produzidos em reatores e, portanto, menos dispendiosos e mais facilmente disponíveis do que o ^{123}I , obtido em ciclotron. Entretanto, a dose de radiação absorvida pelo paciente em uso de ambos os produtos de reatores é elevada. O ^{123}I , do ponto de vista da radioproteção, é ideal por emitir gama (γ) de 159 keV, ter meia vida de 13,3 horas e liberar baixas taxas de doses de radiação.

O ^{131}I decai por emissão de nêutrons (β^-) com energia de 606 keV e um fóton gama associado com energia de 364 keV. Sua meia-vida física é de 8,06 dias. O ^{131}I é fornecido para uso clínico na forma de solução ou cápsulas de sal de iodeto de sódio (Na^{131}I). A presença da partícula β^- , a alta energia do fóton gama e a meia-vida longa, constituem desvantagens do uso deste radiotraçador, resultando assim, em dose de radiação acima da pertinente à realização do procedimento, fato este que restringe a atividade administrada ao paciente (ROCHA, 1979).

II.1.7 – Farmacocinética do iodo.

O iodo radioativo, após a administração oral, é rapidamente absorvido no trato gastrointestinal. A radioatividade é detectada na glândula em poucos minutos e, nos indivíduos eutireoideos, chega aos folículos de 20 a 30 minutos. A captação e a organificação são muito rápidas. O intervalo de tempo decorrido para realizar as imagens (várias horas para o ^{123}I , e 24 horas, para o ^{131}I) adotadas é em função da necessidade em reduzir a radiação de fundo; e não porque a captação pela tireóide seja lenta. A faixa normal de captação nas 24 horas é de 10 % a 30 % da dose administrada. O iodo é liberado pelo leite materno (devendo ser suspensa a amamentação), pelos poros do corpo humano inteiro, pelo suor, pela saliva e pela urina do paciente (THRALL, 1995).

II.1.8 – Formas químicas voláteis de iodo.

O iodo, quando em meio aquoso, é liberado facilmente para o ambiente por processos naturais de agitação, luz solar ou outras formas de aquecimento ou até mesmo pela simples diferença de temperaturas.

Os principais compostos voláteis de iodo encontrados no ar atmosférico são moléculas inorgânicas ou orgânicas. As moléculas formadas dependerão das condições químicas encontradas no local de manipulação, sendo as formas químicas mais prováveis de serem produzidas: iodo elementar (I_2), ácido iodídrico (HI), ácido hipoiódoso (HOI) e iodeto de metila (CH_3I). A tabela II.1 mostra as principais características desses compostos.

Tabela II.1 – Principais características químicas dos compostos de iodios voláteis.

<i>Composto</i>	<i>Estado Físico (natural)</i>	<i>Ponto de Fusão (°C)</i>	<i>Ponto de Ebulição (°C)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>	<i>Solubilidade</i>
CH₃I	Líquido	-66,40	42,43	2,28	A
HI	Gás	-50,76	-35,55	5,23	B
I₂	Sólido	113,70	184,40	4,93	C

Onde, em relação à solubilidade, tem-se que:

A: Pouco solúvel em água, mas, solúvel em acetona, clorofórmio, etanol e éter dietílico e em benzina.

B: Muito solúvel em água e solúvel em solventes orgânicos.

C: Solubilidade na água de 0,03 g/(100g H₂O à 20 °C), solúvel em etanol, éter dietílico, clorofórmio e em benzina.

O ácido hipoiódoso, HOI, só é gerado em condições especiais, onde a temperatura deve ser de 90 °C e pH 10 (básico) (KELLER,1970b).

Como se pode notar, na tabela II.1, o ácido iodídrico é naturalmente gasoso e que o iodeto de metila e o iodo elementar necessitam de energia para os converter a gás, por isso, outra característica importante é a pressão de vapor conveniente, como mostra a tabela II.2.

Tabela II.2 – Pressão de vapor do iodo elementar e do iodo metílico.

<i>Composto</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Pressão de Vapor (atm)</i>
I₂	8,85	9,87 10 ⁻⁵
	35,85	9,87 10 ⁻⁴
	68,85	9,86 10 ⁻³
CH₃I	20,00	4,93 10 ⁻¹
	25,30	5,26 10 ⁻¹
	55,00	5,41 10 ⁻¹

Os fenômenos físicos e químicos que ocorrem com as espécies de iodo, quando liberados para o ar, são muito complexos. A dinâmica de geração das espécies químicas de iodo no ar é mostrada na figura II.2.

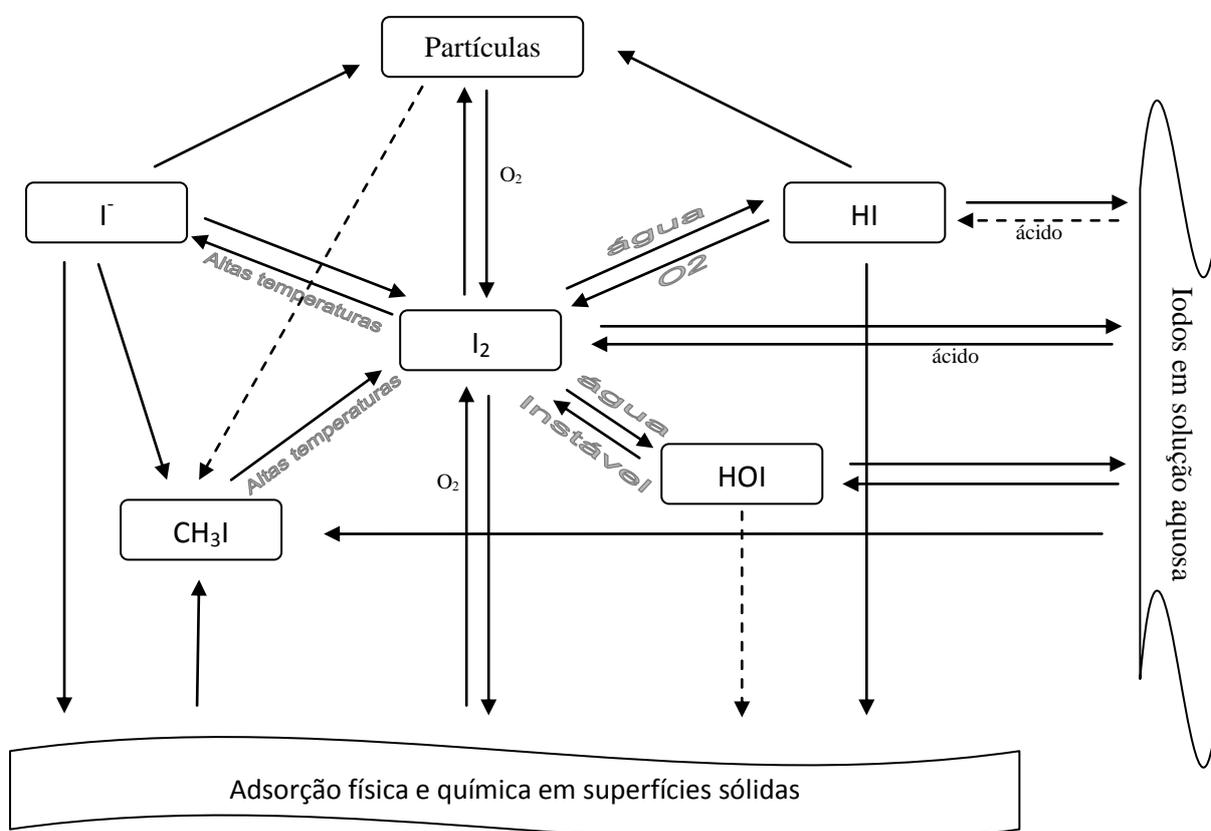


Figura II.2 – Relação das possíveis reações de efluentes gasosos do iodo. (IAEA, 1973)

Conforme mostra o esquema da figura II.2, existem grandes possibilidades de adsorver/absorver compostos livres de iodios dispersos no ar, através de superfícies sólidas, particulados, ou então, de serem dissolvidos em soluções aquosas. Alguns

pré-requisitos são necessários em determinados processos, por exemplo: altas temperaturas, captura de oxigênio, vapores de água ou ácidos.

A reação que converte o iodo elementar em íons de iodeto e a reação que converte iodeto de metila em iodo elementar só ocorre em presença de altas temperaturas, ou seja, necessita de uma alta entalpia para a formação (reação endotérmica). Já a reação que converte o iodo elementar em ácido hipoiódico ou ácido iodídrico só ocorre em presença de vapores de água devido à necessidade da reação de hidrólise. A reação entre o iodo elementar e o ácido hipoiódico é altamente instável.

Em clínicas de Medicina Nuclear, o perigo desses gases é grande, pois, se o material não for manipulado em um local apropriado, pode ocorrer liberação de gases contaminados com iodo radioativo para o meio ambiente ou, até mesmo, contaminar suas áreas, através do duto de refrigeração interna, acarretando doses para pacientes, médicos e funcionários da instituição.

Os funcionários envolvidos com práticas em Medicina Nuclear estão sempre sujeitos ao risco de exposição interna devido à manipulação rotineira de fontes abertas. Assim, há a necessidade de monitoração individual interna e essa monitoração é avaliada, através de metodologias recomendadas pela IAEA (1999), que são adotadas pelos órgãos reguladores de cada país. O controle de radioproteção para monitoração individual encontra-se no ANEXO B.

II.2 – Métodos de remoção das formas químicas de iodos encontradas no ar atmosférico.

Os métodos utilizados para remover as formas químicas de iodo são bem conhecidos, devido aos estudos desenvolvidos para se remover produtos de fissão liberados em usinas nucleares e indústrias de reprocessamento.

Os métodos adsorvedores devem ser capazes de remover com eficiência formas químicas orgânicas e inorgânicas de iodos, diante de gases contendo ou não vapor d'água, dióxido de carbono, gases nobres, óxido de nitrogênio e compostos orgânicos.

São conhecidos vários métodos adsorvedores que podem operar em meio líquido ou vapores. Os adsorvedores que operam em meio líquido se encontram no ANEXO C.

II.2.1 – Adsorvedores sólidos para compostos de iodo.

A remoção de iodo na forma gasosa, empregando adsorvedores sólidos, é mais indicada para instalações industriais do que a remoção de iodo por soluções líquidas, devido à adsorção de iodo sobre sólidos ser mais confiável. Os processos são mais simples e de menor custo, permitindo também a regeneração do elemento filtrante.

Vários adsorvedores sólidos podem ser empregados: carvão ativo, adsorvedores de alumina e silicatos carregados com metais, resinas macrorreticulares e peneira molecular (zeólita). O adsorvedor sólido conhecido como peneira molecular, não será abordado nesse texto de tese, por isso sua descrição se encontra no ANEXO C.

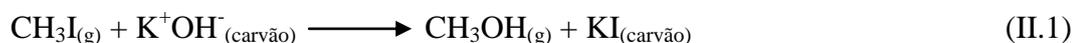
II.2.1.1 – Carvão Ativo.

O carvão ativo é um dos substratos mais usados para absorver iodo, porém, algumas de suas características desfavorecem a utilização em indústrias de reprocessamento para a captação das formas químicas de iodo. O carvão apresenta baixo ponto de ignição, não podendo ser utilizado em altas temperaturas. Perde sua eficiência de remoção, quando exposto a óxidos ou quando submetidos a altas taxas de umidade. Pode causar ainda explosão ao absorver grandes quantidades de nitrato. Alguns impregnantes são utilizados para diminuir essa perda de eficiência, como: KI, KI₃, aminas como a hexametilenotetramina (HMTA) e o trietilenodiamina (TEDA).

A adsorção física é facilitada pela natureza intrínseca do carvão ativo, isto é, alta porosidade e grande área superficial interna. O teor de álcalis do carvão é um fator a ser considerado na remoção do iodo, especialmente em temperaturas elevadas.

O mecanismo recentemente proposto por Sales (SALES, 1981), para explicar o aumento da eficiência de remoção com o aumento de pH, é a captação do iodeto de

metila por um processo catalítico, no qual o carvão serviria como um suporte catalítico. Contudo, ele não seria inerte na reação. O mecanismo proposto é mostrado nas seguintes reações químicas:



A reação em cadeia envolvendo a regeneração da espécie ativa OI^- poderia ser interrompida pela acidificação decorrente dos venenos orgânicos (NO_2 e SO_2) retidos, pelo produto da remoção (CH_3OH), ou pelos venenos inerentes do próprio carvão. (SALES, 1981)

II.2.1.2 – Adsorvedores inorgânicos.

Adsorvedores sólidos impregnados com metais têm sido amplamente utilizados para remover formas de iodos radioativos, porém, a prata é o metal mais eficiente para essa finalidade, devido a sua grande afinidade com o iodo. Nos primeiros estudos, foram utilizados substratos como a alumina, zeólitas e sílica impregnada de prata ou baseada na troca iônica com a mesma.

As principais características de substratos com prata são:

- Retenção efetiva do iodo elementar e dos iodos orgânicos (mesmo em altas temperaturas, permitindo reações com iodos orgânicos);
- Alta capacidade de captura de iodo com alta eficiência;
- Meios não inflamáveis (apresentando alto ponto de ignição).

A principal desvantagem desses materiais é o alto custo da prata; por isso, diversos estudos têm sido promovidos para encontrar um metal alternativo, como: chumbo, cobre, cádmio, manganês, paládio, tálio, mercúrio e troca iônica de cobre em zeólitas. Todos apresentam grande capacidade de adsorção para o iodo elementar, mas

nenhum foi efetivo para as formas de iodios orgânicos (PENCE, 1971; PENCE, 1972; ACKLEY, 1972; GAL, 1974).

A vantagem do uso de substratos inorgânicos contendo prata é a possibilidade da regeneração, permitindo a recuperação de 100% do elemento filtrante, minimizando o custo total.

II.2.1.3 – Substratos impregnados com nitrato de prata.

Na Europa e Japão, absorvedores sólidos, contendo prata na forma de nitrato de prata, têm sido amplamente estudados com êxito na captura de iodo elementar e de iodios orgânicos, principalmente a do iodo metílico.

O nitrato de prata reage com o iodo elementar, formando iodeto de prata estável, de acordo com as reações químicas:



Já, os iodios orgânicos, principalmente o iodeto metílico, também reagem com o nitrato de prata, segundo a reação química:



onde: R é um radical contendo carbono.

Os dois principais substratos que se tem impregnado com nitrato de prata para captura de iodo são a alumina e a sílica. Na Alemanha, processos de remoção de iodo foram desenvolvidos, usando nitrato de prata impregnado com ácido silícico amorfo,

conhecido como Ag-KTC e Ag-KTB. O Ag-KTB é o mais estável, quanto à adsorção física entre os dois, sendo conhecido como AG-6120. Esse apresenta uma área de 65 a 110 m²/g, granulometria de 1 a 2 mm, volume do poro de 0,6 ml/g e pode ser impregnado com prata de 8 a 12 % wt. Testes laboratoriais indicaram que, sobre vapores, esse substrato apresentou redução da eficiência de retenção do iodo; por isso, seu melhor desempenho ocorreu na temperatura de 150 °C (ausência de umidade). Esse material apresenta uma eficiência maior que 99,99 %, usando-se um leito com 10 cm de comprimento, velocidade facial de 25 cm/s e um gás de NO₂ adicional, numa concentração de 1 a 5 % (HERRMANN, 1991; HERRMANN, 1988; WILHELM, 1976).

O nitrato de prata impregnado em alumina (AgA) tem sido desenvolvido e testado. Adsorvedores desse tipo apresentam 24 % wt de prata e os testes indicaram que são muito eficientes para captura do iodeto de metila e do iodo elementar, apresentando eficiência de 99,6 % para um fluxo de velocidade facial de 20 cm/s e temperatura de 150 °C (FUNABASHI, 1994).

O nitrato de prata, impregnado em substratos adsorvedores, fornece altos fatores de descontaminação para o iodo elementar e os iodios orgânicos, sob temperaturas elevadas (150 °C). Os adsorvedores apresentam alta resistência aos gases contendo NO₂. A eficiência de remoção diminui, na presença de altas taxas de umidade. O custo do nitrato de prata em alumina ou silicatos é de 3 a 10 vezes menor que o custo das zeólitas de prata (HAEFNER, 2007).

II.3 – Transporte de fluidos em meios porosos.

Nas análises e caracterização do escoamento em meios porosos, será empregado método matemático, baseado no balanço de massa registrada nas posições de entrada e saída do filtro. Para isso, alguns conceitos básicos de mecânica de fluidos são necessários para o entendimento dos procedimentos adotados; esses conceitos encontram-se no ANEXO D.

II.3.1 – Modelo baseado em fenômenos de transporte e balanço de massa.

O princípio básico para a construção de um modelo que descreva um processo real é baseado no transporte de massa ou energia ou quantidade de movimento, que entra e sai de uma determinada unidade. Estas grandezas podem ou não reagir com o meio e esse processo é mostrado no fluxograma representado pela figura II.3.

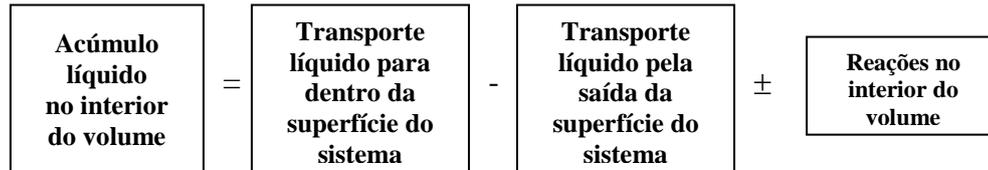


Figura II.3 – Fluxograma de balanço (massa, energia ou quantidade de movimento).

Considerando a hipótese do contínuo, onde são desprezados os detalhes das interações moleculares, pode-se representar esse transporte de fluxo por equações diferenciais, através de uma fração do fluido. Generaliza-se, assim, o conhecimento dos fenômenos físico/químicos representados por diversas variáveis associadas ao escoamento do fluido, tais como, velocidade e pressão.

Para construir a equação diferencial, considera-se, primeiramente, um cubo de coordenadas cartesianas x , y e z , sendo o elemento de volume $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$, que representa a menor fração do mesmo, conforme mostra a figura II.4.

O transporte líquido de um dado componente será igual ao transiente da difusão molecular e o transiente do fluxo volumétrico, que entra no elemento de volume, menos o transporte de fluxo que sai pelos mesmos mecanismos. Quando o fluxo passa através dos três pares de superfícies, xy , xz e yz , as reações ocorridas no interior do volume podem ser de consumo ou geração do componente. Caso não ocorram reações, esse termo é desprezado.

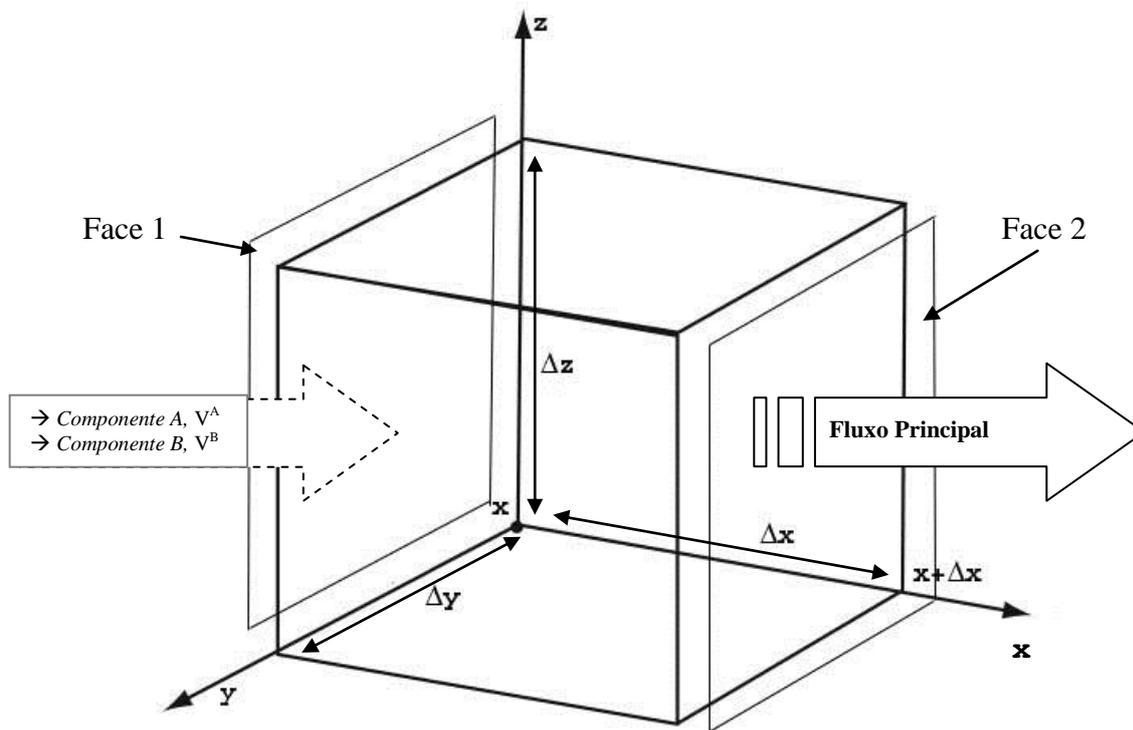


Figura II.4 – Elemento de volume em coordenadas cartesianas.

onde:

ρ é a densidade de massa do fluido (g/cm^3),

ρ_A é a densidade de massa do componente A (g/cm^3),

J_i^A é a densidade de corrente das partículas de A, difundindo no sistema (g/s.cm^2),

v_i é a velocidade média do fluido (cm/s),

V_i^A é a velocidade relativa do componente A (cm/s),

t é o tempo (s),

R_A é a taxa de reações de A no fluido,

D_{AB} é o coeficiente de difusão (cm^2/s).

M_A é o peso molar do componente A.

Quando o componente A interage com o elemento de volume ΔV , o acúmulo em seu interior será a taxa de massa transferida; o transporte volumétrico será igual ao produto entre velocidade axial, a densidade e a área referente à face axial, por unidade de tempo. A difusão molecular no elemento de volume será proporcional ao produto da densidade de corrente pela área da face axial, por unidade de tempo, conforme

expressam as equações II.1, II.2, II.3 e II.4, considerando que o fluxo entra na face 1 localizada em “x” e sai na face 2, em “x + Δx”. Considerando-se também um comportamento similar nas outras faces, tem-se que: (HIMMELBAU, 1968)

1 – se o acúmulo for expresso por:

$$\left[\rho_A (\Delta x \Delta y \Delta z) \right]_{t+\Delta t} - \left[\rho_A (\Delta x \Delta y \Delta z) \right]_t \quad (\text{II.1})$$

2 – o transporte de fluxo volumétrico, por:

$$\begin{aligned} \text{X: } & \left[v_x \rho_A (\Delta y \Delta z) \Delta t \right]_x - \left[v_x \rho_A (\Delta y \Delta z) \Delta t \right]_{x+\Delta x} \\ \text{Y: } & \left[v_y \rho_A (\Delta x \Delta z) \Delta t \right]_y - \left[v_y \rho_A (\Delta x \Delta z) \Delta t \right]_{y+\Delta y} \\ \text{Z: } & \left[v_z \rho_A (\Delta x \Delta y) \Delta t \right]_z - \left[v_z \rho_A (\Delta x \Delta y) \Delta t \right]_{z+\Delta z} \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

3 – o transporte de difusão molecular, por:

$$\begin{aligned} \text{X: } & \left[J_x^A (\Delta y \Delta z) \Delta t \right]_x - \left[J_x^A (\Delta y \Delta z) \Delta t \right]_{x+\Delta x} \\ \text{Y: } & \left[J_y^A (\Delta x \Delta z) \Delta t \right]_y - \left[J_y^A (\Delta x \Delta z) \Delta t \right]_{y+\Delta y} \\ \text{Z: } & \left[J_z^A (\Delta x \Delta y) \Delta t \right]_z - \left[J_z^A (\Delta x \Delta y) \Delta t \right]_{z+\Delta z} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

4 – as reações, por:

$$\pm R_A \quad (\text{II.4})$$

E se as equações II.1, II.2, II.3 e II.4 forem aplicadas, segundo o fluxograma representado na figura II.3, após serem rearranjadas e divididas pelo campo de densidade ($\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$), tem-se que:

$$\begin{aligned}
& \frac{[\rho_A]_{t+\Delta t} - [\rho_A]_t}{\Delta t} + \frac{[v_x \rho_A]_{x+\Delta x} - [v_x \rho_A]_x}{\Delta x} + \frac{[v_y \rho_A]_{y+\Delta y} - [v_y \rho_A]_y}{\Delta y} + \frac{[v_z \rho_A]_{z+\Delta z} - [v_z \rho_A]_z}{\Delta z} = \\
& = - \frac{[J_x^A]_{x+\Delta x} - [J_x^A]_x}{\Delta x} - \frac{[J_y^A]_{y+\Delta y} - [J_y^A]_y}{\Delta y} - \frac{[J_z^A]_{z+\Delta z} - [J_z^A]_z}{\Delta z} \pm R_A
\end{aligned} \tag{II.5}$$

Sendo a equação proporcional ao campo de densidade, então, a condição limite, quando $(\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ou $\Delta t)$ tendem a zero (equação II.6), resultará numa equação diferencial parcial, representada pela equação II.7.

$$\frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y, z, t) - f(x, y, z, t)}{\Delta x} \tag{II.6}$$

A equação II.7 representa a *Equação Geral de Transferência de Massa*, na forma diferencial.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\rho_A v_x] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho_A v_y] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_A v_z] = - \frac{\partial}{\partial x} [J_x^A] - \frac{\partial}{\partial y} [J_y^A] - \frac{\partial}{\partial z} [J_z^A] \pm R_A \tag{II.7}$$

Pode-se também representar a equação II.7 por operadores divergentes, $(\nabla \cdot \vec{F})$, conforme a equação II.8.

$$\text{div } \vec{F} = \nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \tag{II.8}$$

A equação de Transferência de Massa para o componente A pode ser representada pela equação vetorial II.9.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_A \vec{v}) = - \nabla \cdot \vec{J}_A \pm R_A \tag{II.9}$$

A equação de Transferência de Massa para o componente B, que também entra no sistema, será representada da mesma forma pela equação II.10.

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_B \vec{v}) = -\nabla \cdot \vec{J}_B \pm R_B \quad (\text{II.10})$$

Sendo a densidade de corrente das partículas, \vec{J}_A , proporcional ao divergente de concentração, $\partial n / \partial x$, e a constante de proporcionalidade, D_{AB} , a dispersão. Segundo a primeira lei de Fick, a equação II.9 pode ser representada então pela equação II.11, na forma diferencial:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \sum_i \rho_A \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \sum_i v_i \frac{\partial \rho_A}{\partial x_i} = -D_{AB} \sum_i \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x_i^2} \pm R_A \quad (\text{II.11})$$

Considerando um fluido de velocidade constante e o deslocamento apenas na direção “x”, o gradiente da velocidade, no segundo termo da equação II.11, tende a zero, simplificando a equação:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + v \frac{\partial \rho_A}{\partial x} = -D_{AB} \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} \pm R_A \quad (\text{II.12})$$

Dividindo-se pelo peso molecular, encontra-se a equação II.13.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v \frac{\partial C_A}{\partial x} = -D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \pm R_A \quad (\text{II.13})$$

onde: $C_A = \rho_A / M_A$.

Nessa equação, o primeiro termo representa o acúmulo de massa, em função do tempo; o segundo termo representa o fluxo do material passando pelo volume; o terceiro termo representa a difusão da massa no sistema, que pode ser radial, D_r , ou longitudinal, D_L ; e o último termo representa a quantidade de reações, podendo gerar ou consumir a massa no interior do sistema. Esta é conhecida como *Equação Geral de Transporte de Massa ou Equação da Continuidade* (HIMMELBAU, 1968).

Considerando-se agora um fluxo nas condições de $v = 0$ e $R_A = 0$, onde ocorre apenas uma difusão natural (sem fluxo) e sem a ocorrência de reações no meio, a

equação, então, é simplificada, resultando na conhecida *Equação de Difusão* ou segunda Lei de Fick:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \cdot \nabla^2 C_A \quad (\text{II.14})$$

Como os experimentos neste trabalho são realizados em tubulações, convém a utilização de coordenadas cilíndricas (r,φ,z). Por isso, converteu-se a equação II.13 para sua representação em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \left(v_r \frac{\partial C_A}{\partial r} + v_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_A}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] \pm R_A \quad (\text{II.15})$$

onde: $x = r \cos \varphi$;

$y = r \sin \varphi$;

$z = z$.

A equação II.15 permite diversas soluções analíticas, algumas particulares, que comportam simplificações, dependendo de cada aplicação específica, necessitando, inclusive, de condições iniciais e de contorno, para se encontrar uma solução relacionada ao tipo de problema. Para se resolver essas equações diferenciais, aplicam-se técnicas numéricas, pelo método de separação por variáveis, cuja solução geral em coordenadas cartesianas está descrita em WAYLAND,1957.

II.3.2 – Modelo de fluxo dispersivo.

Os escoamentos em meios porosos são complexos e caracterizados como um escoamento não ideal. O mais conhecido é o modelo de fluxo dispersivo, que se baseia na analogia entre o processo de transporte tipo fluxo pistão associado a um processo de mistura devido ao fenômeno da dispersão. Os modelos variam com a complexidade; modelos com um parâmetro, por exemplo, representam adequadamente meios porosos e recipientes tubulares. Por outro lado, modelos com dois a seis parâmetros são usados para caracterizar leitos fluidizados.

O fluxo dispersivo é contínuo, arbitrário e pode ser utilizado para descrever as condições de fluxo da maioria dos sistemas denominados reatores, onde se define como reator o tanque ou volume genérico que possibilite o acontecimento de reações químicas ou bioquímicas em seu interior (VON SPERLING, 1996).

O modelo de escoamento tubular disperso ou simplesmente modelo de dispersão é um escoamento de um fluido, em um tubo, no qual é inserida uma mistura, cuja grandeza independe da porção no recipiente, sem formação de bolsões estagnantes, regiões não banhadas ou curto circuito do fluido no recipiente. As perturbações ocorridas nessa mistura, durante o escoamento do fluido, neste modelo, são consideradas de natureza estatísticas e análogas a de uma difusão molecular.

O fluxo disperso ocorre, quando dois meios se misturam origina uma difusão molecular no recipiente. No caso de um ser o fluido e o outro, o traçador, encontra-se um problema devido ao fluido levar certo tempo para se difundir no outro (mistura binária), quando se inicia o fenômeno de difusão entre os mesmos.

Esta difusão inicial entre os meios é um dos principais problemas que ocorre em medidas experimentais. Quando se utiliza a técnica de radiotraçadores, é primordial que se escolha um traçador com características semelhantes às do meio, pois assim, essa difusão inicial (difusão radial), D_r , poderá ser desconsiderada. Esse problema foi solucionado por Taylor, ao condicionar em seus experimentos, que os pontos de medidas se localizem sempre após certa distância. Essa distância é conhecida como distância de boa mistura. Um exemplo de uma injeção real é mostrado na figura II.5. A distância de boa mistura para fluidos newtonianos, em escoamentos tubulares com velocidade constante, é de aproximadamente dez vezes a secção reta do tubo. Essa difusão inicial é a que gera uma dispersão radial em tubos, D_r (IAEA, 1990).

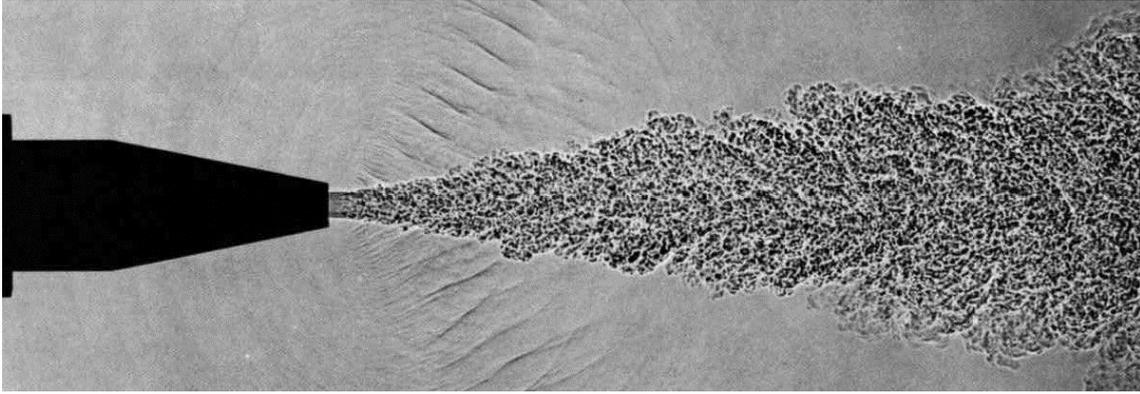


Figura II.5 – Distância de boa mistura (An Album of Fluid Motion, Dyke, M. V, 1982).

Simplificando o modelo de transporte de massa em coordenadas cilíndricas equação II.15, supõe-se agora, um sistema sem reações, ($R_A = 0$), em um escoamento tubular, onde só se apresenta variação na direção, z , com raio constante, onde o sistema consistirá em um fluxo com dispersão axial e radial, como mostra a equação simplificada abaixo. A equação II.16 representa o *Modelo de Fluxo Dispersivo* (LEVENSPIEL, 1980).

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + D_L \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (\text{II.16})$$

Quando o ponto de medida é localizado, após a distância de boa mistura, a dispersão radial é nula ($D_r = 0$) e a equação é simplificada ainda mais. A equação II.17 denomina-se *Modelo de fluxo com dispersão Axial ou longitudinal*, sendo igual à de Transporte de Massa, equação II.13, na forma unidimensional e sem reações.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_L \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (\text{II.17})$$

onde: v_z é a velocidade axial (cm/s);
 D_L é a dispersão axial (cm²/s);
 C_A é a concentração do traçador.

Dessa forma, o escoamento é unidimensional e todas as contribuições à mistura do fluido escoam em apenas uma dimensão e o parâmetro D_L caracteriza o grau de mistura, durante o escoamento. Duas grandezas podem ser bastante diferentes em valores, por exemplo, no escoamento laminar de fluidos através de tubos, a mistura axial é devida, principalmente, aos gradientes de velocidade do fluido, enquanto que a mistura é devida apenas à difusão molecular (TAYLOR, 1954).

Em problemas de engenharia, para se encontrar uma solução analítica, é conveniente, utilizar-se medidas de unidade adimensional; para isso, pode-se representar o tempo adimensional, θ , dado por:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (\text{II.18})$$

onde: t é o tempo transcorrido no experimento;
 τ é tempo médio de residência.

Sendo a velocidade média expressa por:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{L}{\tau} \quad (\text{II.19})$$

onde: L é a distância entre dois pontos arbitrários, após a injeção do traçador;
 Δt é o intervalo entre esses dois pontos arbitrários.

Substituindo-se a equação II.19 na equação II.18 pode-se representar a variável θ , pela expressão:

$$\theta = \frac{vt}{L} \quad (\text{II.20})$$

Para se considerar as constantes de comprimento (L) e concentração (C) adimensionais, deve-se normalizá-las, conforme mostram as equações II.21 e II.22.

$$z = \frac{x}{L} \quad (\text{II.21})$$

$$C = \frac{C_{saída}}{C_{entrada}} \quad (\text{II.22})$$

onde: $C_{entrada}$ é a concentração do traçador na entrada do sistema;

$C_{saída}$ é a concentração do traçador na saída do sistema.

Considerando-se uma injeção instantânea de traçador no sistema, a função que representa a fonte de injeção, S , poderá ser representada por uma função de Dirac, a saber:

$$S = C_0(t) \delta(x-x_0) \quad (\text{II.23})$$

onde: $C_0(t)$ é a concentração de injeção do traçador em relação ao tempo, sendo que $x = x_0$;

x_0 é a posição de injeção do traçador no sistema.

Para se converter a equação II.17 temporal, na forma adimensional, foram utilizadas as equações II.20, II.21, II.22, com suas respectivas derivadas e a constante de Peclet expressa na equação D8 do ANEXO D:

$$\frac{\partial C(z, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial C(z, \theta)}{\partial z} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 C(z, \theta)}{\partial z^2} + Q(\theta) \delta(z - z_0) \quad (\text{II.24})$$

sendo:

$$\frac{1}{P_e} = N_d = \frac{D_L}{vL}$$

N_d é o número de dispersão (adimensional);

P_e é o número de Peclet (adimensional).

Dessa forma, a constante adimensional, P_e , pode ser representada pelo número de dispersão, N_d , sendo esse o parâmetro que mede a dispersão axial, indicando que, quando:

- $D_L/vL \rightarrow 0$, a dispersão é desprezível e, portanto, o escoamento é tubular;
- $D_L/vL \rightarrow \infty$, há uma grande dispersão e, portanto, ocorre o escoamento em mistura.

Esse modelo, em geral, representa satisfatoriamente um escoamento que não se desvia muito do pistonado, como os leitos de enchimentos e tubos.

Considerando-se um fluxo com grande dispersão, representado pela equação II.24, aplica-se a técnica de separação por variáveis, supondo-se um fluxo tubular infinito para ambos os lados, ou seja, $-\infty \leq z \leq +\infty$, a partir do ponto de medida (condições de contorno), sendo, inicialmente, zero a concentração do traçador (t_0 , condição inicial). As condições podem ser representadas pelas equações:

$$C(z,0) = 0; \quad (\text{II.25})$$

$$C(+\infty,0) = \text{finito}; \quad (\text{II.26})$$

$$C(-\infty,0) = \text{finito}. \quad (\text{II.27})$$

A solução analítica para estas condições é dada pela equação II.28.

$$C(z, \theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_\theta}{\pi\theta} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{-P_\theta(z - \theta)^2}{4\theta} \right] \quad (\text{II.28})$$

No ponto de medida, onde, $x = L$, ou seja, z tem valor unitário, a equação II.28 pode ser simplificada, gerando a equação II.29.

$$C(1, \theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_\theta}{\pi\theta} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{-P_\theta(1 - \theta)^2}{4\theta} \right] \quad (\text{II.29})$$

Sendo o tempo adimensional, a média será sempre 1 e a variância expressa por:

$$\sigma_\theta^2 = 2 \frac{D_L}{vL} + 8 \left(\frac{D_L}{vL} \right)^2 \quad (\text{II.30})$$

O fluxo com grande dispersão apresenta uma assimetria considerável entre as curvas de entrada e saída, ou seja, a curva de saída apresenta um grande prolongamento, devido ao processo de mistura na unidade, expresso pelo gradiente de velocidade, $\partial C/\partial z$, na equação diferencial II.24 (LEVENSPIEL, 1980).

Quando o fluxo apresenta pequena dispersão, a curva de saída não apresenta assimetria em relação à curva de entrada, sendo um fluxo puramente dispersivo, ou seja, o gradiente de velocidade, $\partial C/\partial z$, tende a zero, originando a equação de difusão, conforme equação II.14. Sua solução analítica é baseada nas mesmas condições iniciais e de contorno II.25, II.26 e II.27, podendo ser representada pela equação II.31, sendo sua variância dada pela equação II.32.

$$C(1, \theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{P_{\varepsilon}}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{-P_{\varepsilon} (1 - \theta)^2}{4} \right] \quad (\text{II.31})$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \frac{D_L}{vL} \quad (\text{II.32})$$

II.3.3 – Técnica de estímulo e resposta com traçadores radioativos.

Quando se trata de um modelo real, as análises são baseadas nos perfis dinâmicos medidos, onde os registros são retirados na entrada e na saída de um dado sistema, como na indústria, onde geralmente não se tem acesso ao interior das máquinas em funcionamento. A técnica mais aplicada em estudos de fluidodinâmica, utilizando radiotraçadores, é conhecida como “Técnica de Estímulo e Resposta”.

Atualmente, com a disponibilidade de uma grande variedade de radioisótopos no mercado, bem como o desenvolvimento de métodos de marcação dos mais variados compostos, e o aprimoramento das técnicas de medidas, o emprego de traçadores marcados com isótopos radioativos, no estudo do transporte de materiais e para a determinação de parâmetros característicos do fluxo de fluidos e sólidos em sistemas complexos, tornou-se uma das técnicas mais frequentes aplicadas em diversas atividades industriais e ambientais (RAMOS, 2006).

A técnica de traçadores consiste em se observar o comportamento de uma determinada porção do material, denominada de população marcada, que, ao interagir com o sistema, tem seus parâmetros físico/químicos continuamente modificados, cujos registros permitem obter informações sobre a movimentação e interação da população principal com o meio.

Assim, para que a informação do comportamento do traçador no meio represente as reais condições do fluxo principal, é necessário que as características do sistema (ponto de injeção do traçador; localização dos pontos de medida; geometria do sistema de detecção) sejam bem definidas, assim como, as propriedades físico/químicas do traçador escolhido devem ser similares às da população principal.

Pode-se representar um sistema em estudo por operadores matemáticos, onde $X(t)$ é a função de entrada (injeção do traçador); $Y(t)$, a função de saída (resposta do sistema ao estímulo de entrada); e $H(t)$, a função de transferência (ação do sistema depende dos processos internos), como mostram o fluxograma na figura II.6 e a equação II.33.

$$Y(t) = H(t) \otimes X(t) \quad (\text{II.33})$$

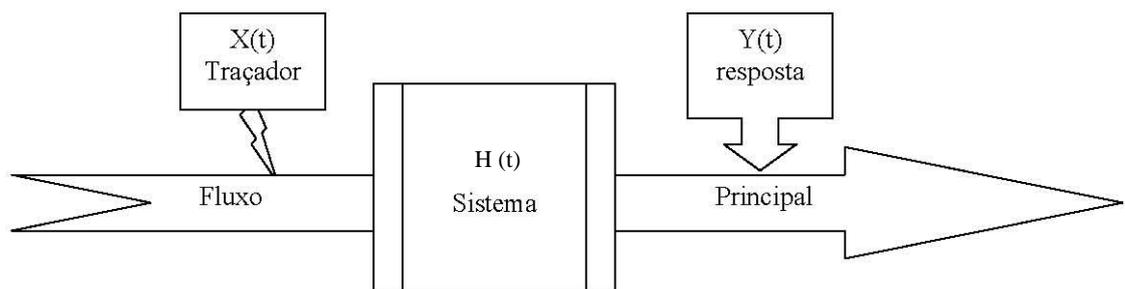


Figura II.6 – Esquema da representação matemática da técnica de estímulo-resposta.

Alterações causadas pela distribuição do traçador no meio, à medida que ele se desloca pela unidade, são características do processo, porém, a resposta registrada, $Y(t)$, depende tanto da ação do sistema, $H(t)$, como do processo de injeção do traçador, dada por $X(t)$ (IAEA, 1990).

Métodos apropriados para a identificação e o registro do traçador na saída da unidade permitem obter a curva de resposta, $Y(t)$, que representa o processo que se deseja estudar. Esses dados possibilitam o levantamento de informações sobre o comportamento dinâmico da unidade, indicando um funcionamento adequado ou então quais os possíveis fatores que estão contribuindo para a distorção da resposta. Essa propriedade do método permite que vários detectores sejam posicionados em pontos diferentes da unidade estudada, com o deslocamento do componente marcado registrado simultaneamente e com as curvas características da unidade obtidas por meio de métodos matemáticos de deconvolução.

Existem vários métodos para se analisar as curvas geradas pela resposta do sistema e os mais usuais são os Métodos de Momentos Estatísticos e as Funções de Distribuição do Tempo médio de Residência (DANKWERTS, 1953; RAMOS, 2006).

II.3.3.1 – Distribuição do tempo de residência.

Padrões de escoamento em meios porosos complexos podem ser facilmente monitorados, associando-se um formalismo probabilístico com a técnica de traçadores radioativos, de maneira a se relacionar parâmetros estatísticos ao perfil de deslocamento do material marcado pela unidade e se definir um conjunto de funções densidade de probabilidade para o tempo de permanência do fluido no interior da unidade. Por definição, considera-se que todas essas funções são normalizadas.

Processos complexos ocorrem no interior das unidades e alteram substancialmente o sinal de entrada do traçador. Dois modelos fundamentais, considerados como modelos de perfil de deslocamento ideal, descrevem, com limitações, o comportamento do traçador no meio:

- **Fluxo pistão:** ocorre quando a velocidade do fluido é única em toda uma seção reta da unidade. Isso implica que todo elemento de material marcado que entra na unidade, em um determinado instante, move-se com velocidade constante e em caminhos paralelos, de modo que

um não interfira no deslocamento do outro, e todos deixem a unidade em tempos iguais.

- **Misturador perfeito:** o traçador no interior da unidade é completamente misturado de maneira a garantir a completa homogeneidade. Essa condição implica que cada porção que deixa a unidade seja uniforme (mesma concentração de traçador) e tenha propriedades idênticas às da que se encontra no interior.

Os modelos de escoamento ideal servem somente como uma primeira aproximação, uma vez que sistemas reais sempre apresentam um perfil de deslocamento de fluidos extremamente complexos.

A técnica de medida das funções de distribuição do tempo de residência considera que cada partícula do traçador, ao percorrer a unidade, possui a sua “história”, com seu tempo de permanência no interior, definido, em termos estatísticos, como uma função distribuição de probabilidade (funções de idade). A principal vantagem é que essa metodologia permite estudar os processos e mecanismos básicos que ocorrem no interior da unidade.

A definição das funções de distribuição da idade foi postulada por Danckwerts e fornece informações sobre o comportamento estatístico da fração do traçador, ao interagir com o sistema. Essas funções são fundamentadas em conceitos de balanço macroscópico da população.

Para um determinado elemento de volume de fluido, define-se como “Tempo Médio de Residência” (TMR) o espaço de tempo médio entre a entrada e a saída do traçador na unidade e “idade”, como tempo transcorrido desde a entrada na unidade e um dado instante de tempo, t . Por definição, então, tem-se que a idade é igual ao tempo de residência para todas as frações do traçador que estão saindo da mesma. Em todas as formulações a seguinte terminologia foi adotada:

V_t representa o volume total da unidade;

Q , a vazão do efluente na unidade;

t, o tempo;

c(t), a concentração do traçador no meio, no instante de tempo t.

C(t), a taxa de concentração registrada no detector, no instante t.

t_i, o tempo de início do processo;

t_f, o tempo final do processo.

A concentração do traçador no meio é diretamente proporcional à taxa de contagem registrada no detector. Empregando-se um sistema de medida (detectores e eletrônica associada), calibrado e estável, para a maioria dos desenvolvimentos matemáticos necessários ao levantamento das características das unidades, é possível se representar a aproximação da concentração do traçador no meio, c(t), pela taxa de contagem registrada nos detectores, C(t).

Para um dado sistema com volume total, V_t, através do qual se desloca um fluido com vazão, Q, onde é injetado um sinal de material marcado com as mesmas características fluidodinâmicas do fluido, definem-se:

Função de Distribuição da Idade Interna, I(t) – representa a distribuição da idade de elementos dentro da unidade no intervalo de t e (t+Δt). I(t) é uma distribuição normalizada, de tal forma que:

$$\int_0^{\infty} I(t) dt = 1 \quad (\text{II.34})$$

Função de Distribuição do Tempo de Residência – E(t): também conhecida como distribuição de frequências da idade do fluido, representa a fração do material que passou pela unidade, no intervalo t e (t+Δt). E(t) é uma distribuição normalizada, de tal forma que:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (\text{II.35})$$

Função Acumulativa do Tempo de Residência – $F(t)$: representa a fração total de material que passou pela unidade, no intervalo de tempo, t e $(t+\Delta t)$. Assim, no instante da injeção ($t = 0$), nenhum material marcado percorreu a unidade, logo, $F(0) = 0$ e, nos casos em que todo o material é removido da unidade, $F(\infty) = 1$, sendo representada pela equação:

$$F(t) = \int_0^t E(\bar{t}) d\bar{t} \quad (\text{II.36})$$

onde: $E(\bar{t})$ é a fração de traçador com idade menor (mais jovem) do que t .

Tempo Médio de Residência - τ : define-se τ como o valor médio da distribuição das idades dos elementos que passaram pela unidade durante todo o percurso. Em um sistema com volume total V_t , para uma porção de material marcado movendo-se pelo seu interior com vazão Q , define-se o tempo médio de residência como o tempo médio gasto pelo traçador para percorrer toda a unidade. O tempo médio de residência é representado em função de $E(t)$ pela equação:

$$\tau = \int_{t_i}^{t_f} t E(t) dt \quad (\text{II.37})$$

Para sistemas contínuos e sem refluxo, tem-se:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (\text{II.38})$$

Função Intensidade - $N(t)$: definida como a fração do traçador com idade t e que deixará a unidade num tempo entre t e $t + dt$, isto é, mede a probabilidade de escape de uma partícula que permaneceu na unidade por um período de tempo t . A função de intensidade é definida na equação II.39 (DANCKWERTS, 1953; HIMMELBAU, 1968; BRANDÃO, 2001).

$$N(t) = \frac{1}{\tau} \frac{E(t)}{I(t)} \quad (\text{II.39})$$

II.3.3.2 – Modelos teóricos e as funções de distribuição do tempo médio de residência.

II.3.3.2.1 – Modelo de fluxo pistão.

Este modelo é caracterizado pela passagem de um traçador por dois pontos distintos com as suas curvas de respostas inalteradas, como mostra a figura II.7.

Nas funções de distribuição do tempo médio de residência (DTR) representadas pela figura II.7.1, $E(\theta)$ representa a curva experimental ($C(\theta)$), normalizada. Como θ é uma unidade de tempo adimensional, o tempo médio de residência é dado pelo valor de θ igual a um (θ médio), $\tau_\theta = 1$. Para este modelo, a função $E(\theta)$, que representa a saída do traçador da unidade, é sempre simétrica em relação a θ igual a um, mesmo quando medida em posições diferentes do sistema.

$F(\theta)$ representa o acúmulo da quantidade de elementos que sai da unidade, ou seja, é uma curva acumulativa da função de saída $E(\theta)$, onde, no início, não existindo traçador, a função é zero e, quando o traçador sai totalmente do sistema, a função é igual a um. No fluxo pistão, a curva cresce rapidamente até o θ médio, mudando de inflexão no instante de θ médio e tende a se estabilizar até todo o material sair do sistema, quando $F(\theta)$ é igual a um.

Note que a largura à meia altura e a intensidade total de ambas as curvas não se alteram em dois pontos de medidas arbitrários.

$I(\theta)$ representa a remoção do material da unidade, por isso, inicia em um e varia até zero, representando que todo o material saiu da unidade, não restando nenhum material no interior do sistema. Esta função inicia em um e é sempre decrescente mudando de inflexão no instante de θ médio e tende a se estabilizar até todo o material sair do sistema, quando $I(\theta)$ é igual a zero.

$N(\theta)$ é uma relação entre a entrada e a saída, mostrando um possível processo de mistura da unidade. Como num fluxo pistão não existe mistura, a curva apenas sobe no instante menor do que o θ médio.

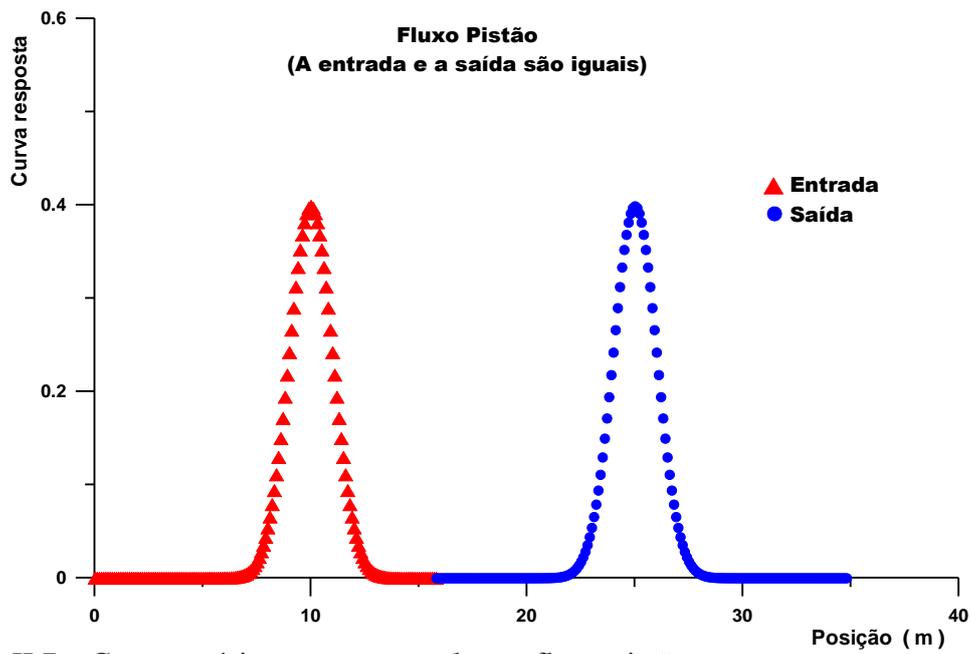


Figura II.7 – Curvas teóricas representando um fluxo pistão.

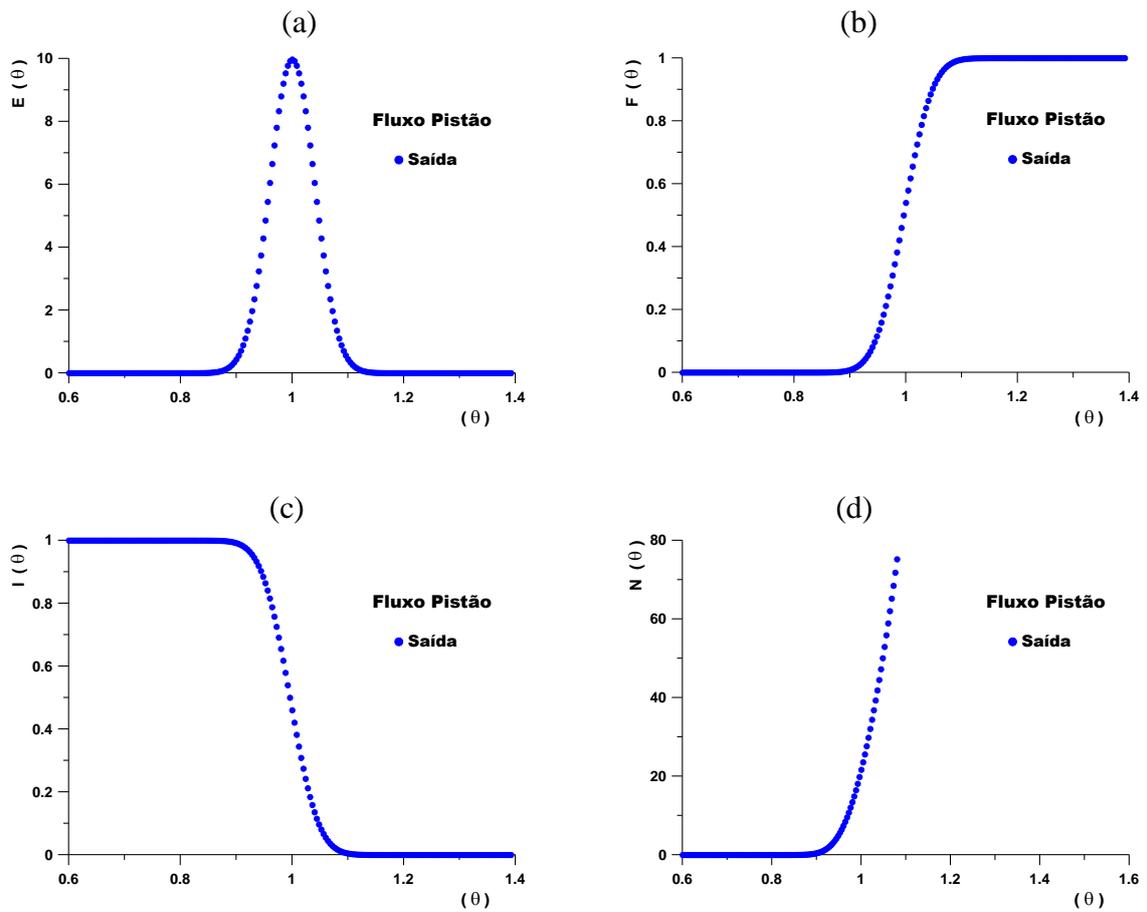


Figura II.7.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo pistão: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

II.3.3.2.2 – Modelo de fluxo dispersivo com pequena dispersão.

Este modelo representa um fluxo com um valor de dispersão pequena ($D < 0,001$). A curva temporal, em diferentes pontos de medidas, apenas aumenta à largura a meia altura e, em consequência, sua intensidade diminuiu com o aumento da distância do ponto de injeção. A figura II.8 representa um modelo de fluxo dispersivo.

Note na figura II.8.1 que as funções DTR são parecidas com as de fluxo pistão, porém, a largura à meia altura é maior, quanto maior for a distância do ponto de medida; assim, a inclinação de $F(\theta)$ e de $I(\theta)$ são menores. Por isso, um fluxo dispersivo com pequena dispersão tende a um fluxo pistão (fluxo meramente teórico) e a função $N(\theta)$, com variação igual a dos modelos anteriores, a subir antes do teta médio.

II.3.3.2.3 – Modelo de fluxo dispersivo com grande dispersão.

Quando o coeficiente de dispersão aumenta ($D > 0,01$), surge uma assimetria na curva resposta do sistema, iniciando-se, assim, um processo de mistura no meio. A assimetria é maior, quanto maior for a dispersão do traçador no meio. A figura II.9 representa um modelo de fluxo com grande dispersão.

Na figura II.9.1, nota-se que com a assimetria, o tempo médio de residência (teta médio) é deslocado do ponto de máximo da curva. Isso se deve ao fato do tempo médio de residência estar localizado no baricentro da curva. As extremidades das funções $F(\theta)$ e $I(\theta)$ são mais longas, indicando a assimetria da curva, que representa um processo de mistura. Pelo fato da dispersão ser grande, o traçador permanece por mais tempo na unidade.

A função $N(\theta)$ inicialmente cresce e, após um intervalo de tempo, forma um patamar, que indica o processo de mistura, ou seja, sendo a curva $N(\theta)$ uma relação entre a $E(\theta)$ e a $I(\theta)$, ela permanece constante durante esse intervalo de tempo, que representa o tempo em que o traçador se mistura no sistema. Quando o traçador é totalmente removido da unidade, volta a subir, de forma semelhante ao fluxo pistão.

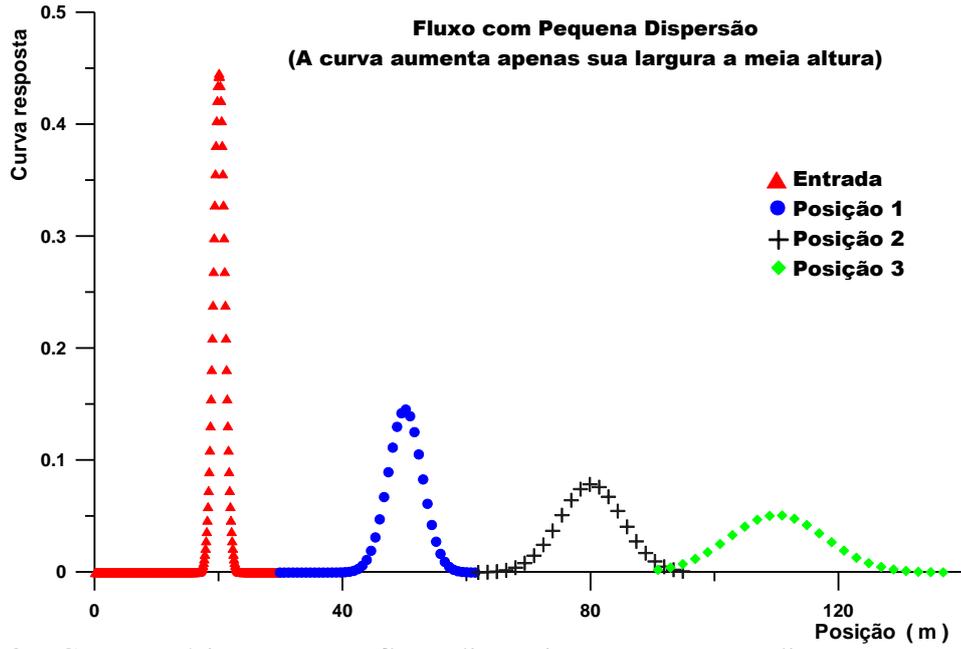


Figura II.8 – Curvas teóricas para um fluxo dispersivo com pequena dispersão.

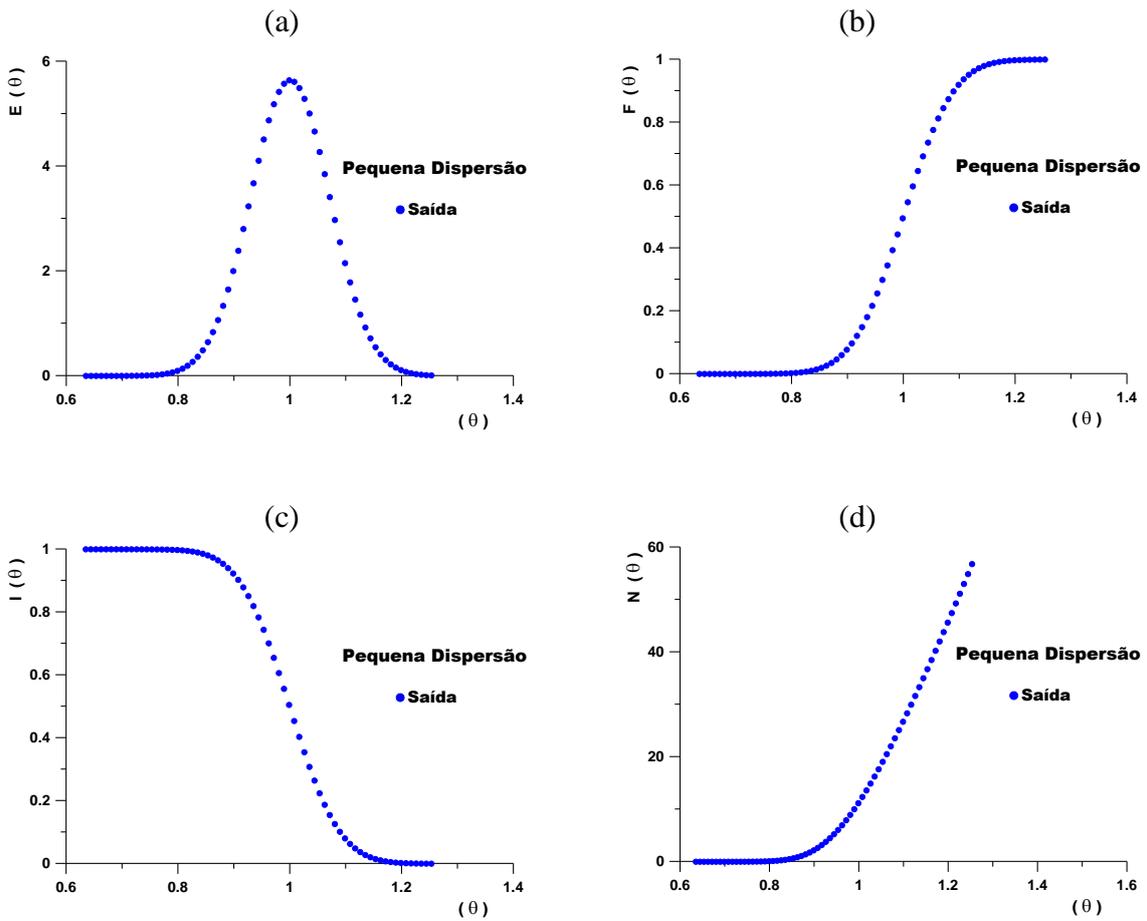


Figura II.8.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo dispersivo com pequena dispersão: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

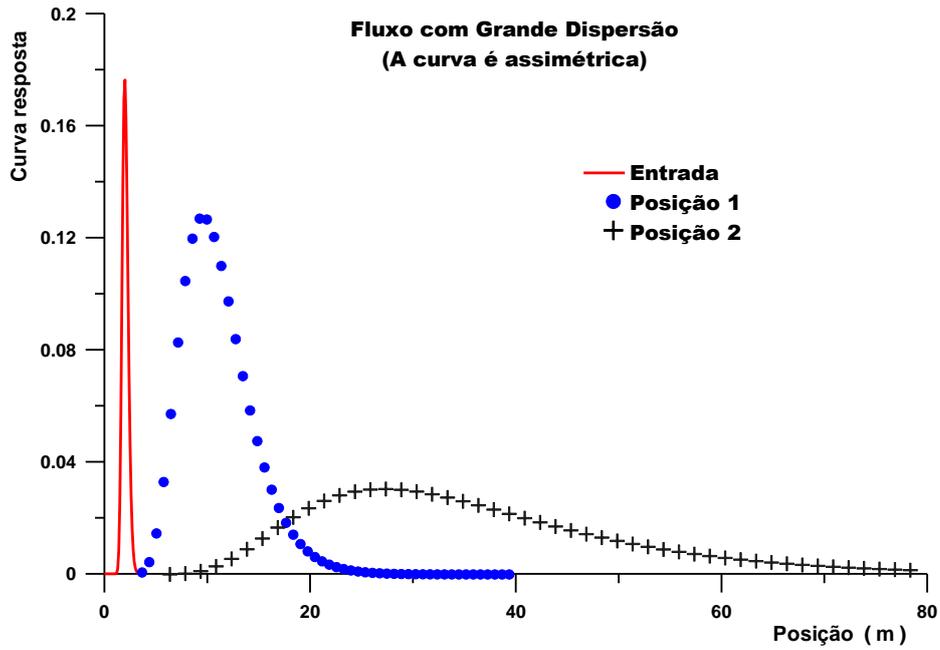


Figura II.9 – Curvas teóricas para um fluxo dispersivo com grande dispersão.

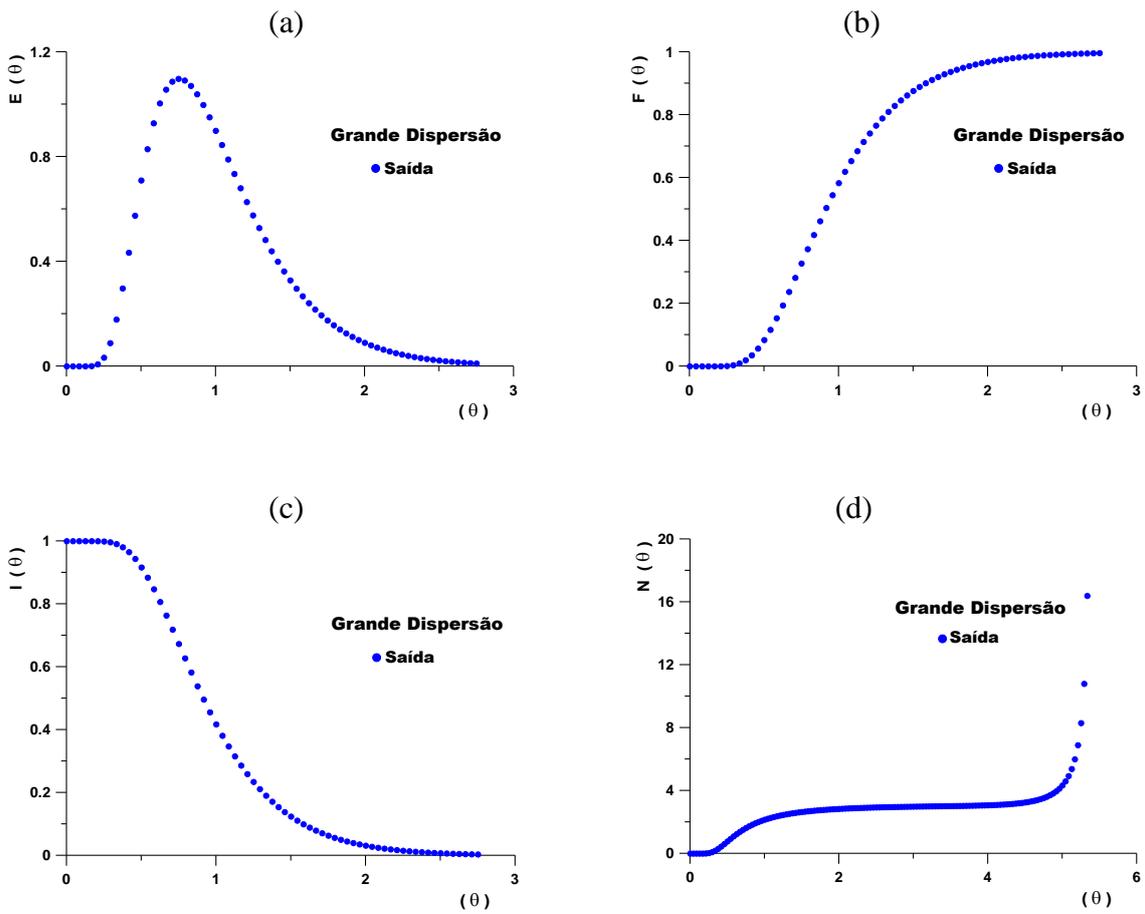


Figura II.9.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo dispersivo com grande dispersão: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

II.3.3.2.4 – Modelo de misturadores perfeitos, idênticos e em série.

Este modelo é muito usado no estudo de processos químicos, e pode representar muitos sistemas em que a curva resposta apresenta certo grau de assimetria (exemplo: modelo de fluxo dispersivo com grande dispersão). A figura II.10 representa três tipos de configuração de misturadores: um simples, o outro com dois misturadores idênticos e em série e o outro com cinco misturadores idênticos e em série, com o objetivo de diferenciar cada um.

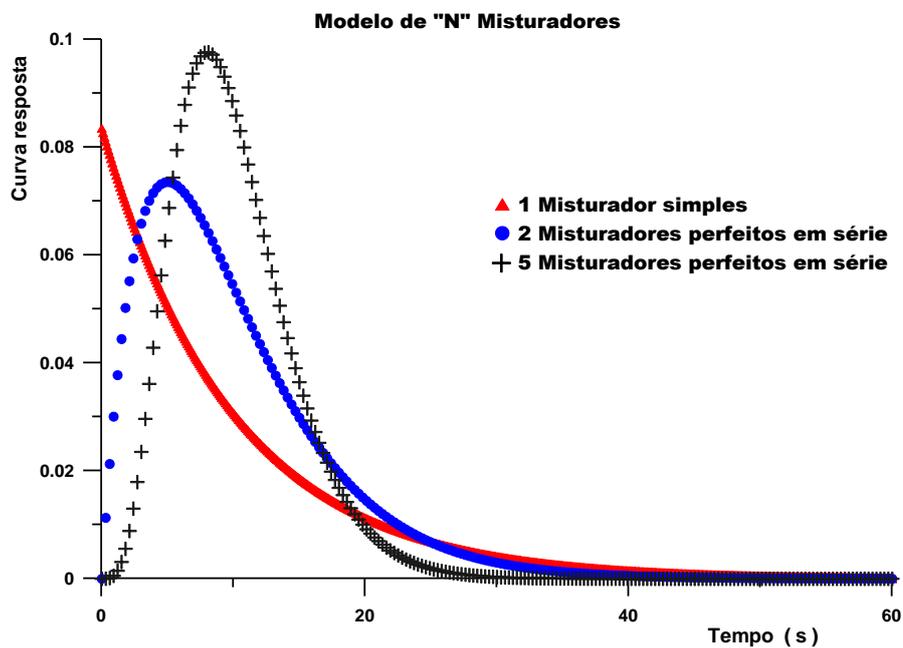


Figura II.10 – Curvas teóricas representando fluxos com três tipos de misturadores idênticos em série.

Na figura II.10, a curva que representa um misturador simples tem um comportamento exponencial. Ao se aumentar o número de misturadores para dois, o comportamento da curva se altera, podendo ser representada por um fluxo dispersivo com grande dispersão (curva assimétrica). Ao se elevar o número de misturadores para 5, a assimetria vai diminuindo, podendo chegar a um certo ponto em que, ao se aumentar a quantidade de misturadores, a curva poderá ser representada por um fluxo dispersivo com pequena dispersão ou até mesmo um fluxo pistão.

O comportamento da curva $E(\theta)$, na figura II.10.1, é o mesmo da curva resposta representada pela figura II.10.

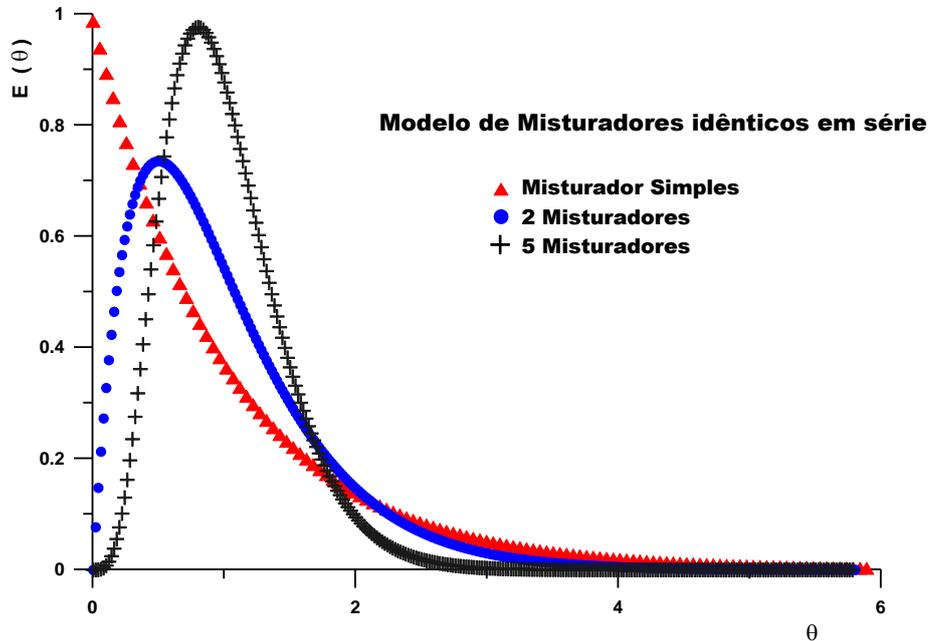


Figura II.10.1 – Função $E(\theta)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série.

Sendo assim, o modelo de fluxo de “N” misturadores idênticos em série pode representar qualquer tipo de sistema, por isso, deve-se definir bem o que se deseja estudar, para não cair em contradição em termos dos ajustes matemáticos.

As funções de DTR variam em função da quantidade de misturadores. Na figura II.10.1, a função $E(\theta)$, sendo representada por uma exponencial, o traçador entra no sistema e sai de forma constante. Quando é adicionado mais um misturador, a curva passa mais rápido pelo sistema do que a curva com apenas um misturador. Já com cinco misturadores, a assimetria diminui mais, mostrando que o traçador sai mais rápido do sistema do que no caso anterior, indicando que a mistura aumenta. Assim, a curva, na saída o traçador, resulta mais homogênea.

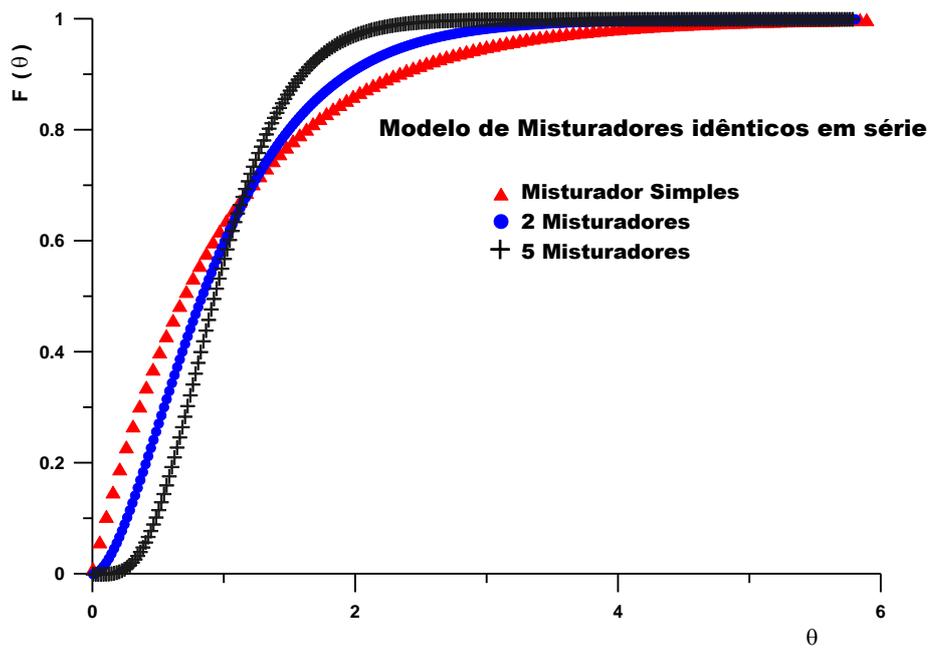


Figura II.10.2 – Função $F(\theta)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série.

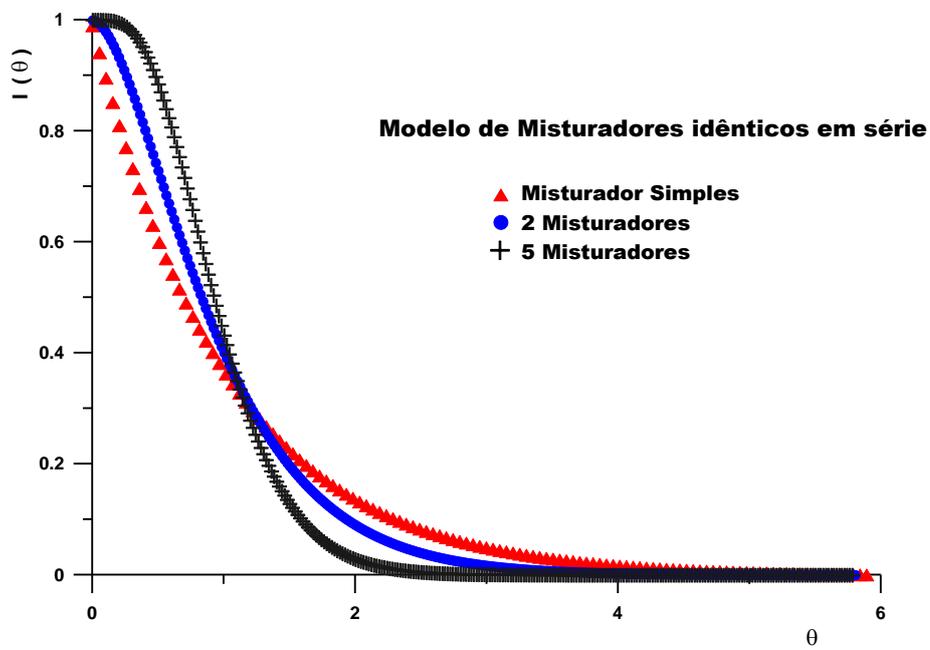


Figura II.10.3 – Função $I(\theta)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série.

As funções de $F(\theta)$, representadas pela figura II.10.2, variam suas inclinações, em função da quantidade de misturadores, ou seja, quanto mais misturadores, mais íngremes serão. Em um misturador simples, a curva não apresenta mudança de inflexão. Quanto às curvas referentes a dois misturadores, há mudança do ponto de inflexão, porém, é muito sutil no valor de teta médio, o que leva a um tempo maior para que o traçador saia do sistema. Com cinco misturadores a curva já muda de inflexão num tempo próximo ao do teta médio.

Da mesma forma, as funções de $I(\theta)$, vistas na figura II.10.3, para um misturador simples, o decréscimo é contínuo; para dois misturadores, o declive é maior; e, para cinco misturadores, existe a mudança de inflexão no ponto próximo ao teta médio.

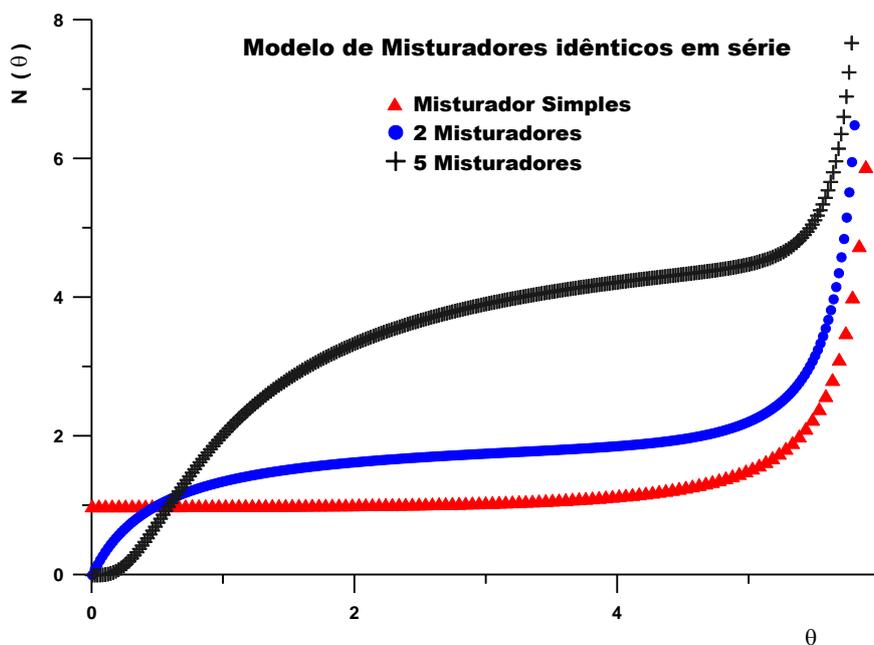


Figura II.10.4 – Função $N(\theta)$ adimensional, para um fluxo com misturadores idênticos em série.

Na figura II.10.4, as funções $N(\theta)$, para o modelo com um misturador, a curva permanece constante até o instante em que todo o traçador sai totalmente da unidade, resultando, assim, numa curva que sobe continuamente (saída total do traçador), representando uma mistura perfeita e contínua. Já, para dois misturadores, ela inicia em

zero e logo sobe para um patamar que representa o processo de mistura. Para cinco misturadores a curva se comporta como um fluxo dispersivo com grande dispersão, levando um tempo para subir, permanecendo um tempo maior na região de patamar (instante de mistura). Após certo tempo a curva volta a subir que representará a saída total do traçador da unidade.

II.3.3.3 – Identificação de problemas em unidades industriais usando as funções de DTR.

As informações contidas nas curvas de DTR permitem a identificação de problemas na operação das unidades, tais como: canalizações, recirculações, zonas de retenção e zonas mortas.

Contudo, para que uma análise correta possa ser realizada, é necessário que a unidade tenha sido inicialmente bem caracterizada (parâmetros geométricos, volume total e tipo de efluente) e também definida a posição dos detectores (localização física no sistema em estudo e o uso de colimadores). Além disso, no processo de aquisição dos dados, as meia-vida e atividade do traçador, o intervalo de tempo entre medidas sucessivas e o tempo total de aquisição de dados, devem ser definidos adequadamente, de modo a permitir que os fenômenos ocorridos no interior da unidade possam ser avaliados (HIMMELBAU, 1968; THÝN, 1983).

- **Zona Morta:**

O fenômeno de zona morta, figura II.11, acontece em sistemas onde há uma diminuição no volume efetivo do tanque, ou seja, existe uma região do tanque que não participa do processo de mistura. Esse tipo de problema prejudica claramente o processo de produção de várias indústrias. Num tanque com zona morta, o volume útil disponível é menor que o volume real da unidade, assim, o tempo teórico calculado no início do projeto do sistema deixa de ser válido.

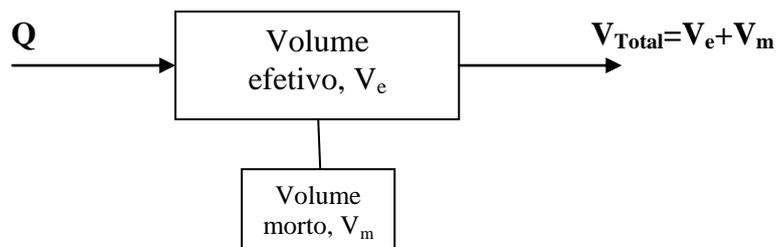


Figura II.11 – Representação esquemática de um fluxo com zona morta.

- **Recirculação:**

Esse fenômeno é caracterizado pela passagem da mesma fração do traçador pelo sistema mais de uma vez, sendo que, cada passagem de material pela região sensível, ocasiona o aparecimento de novos picos, que serão registrados posteriormente à unidade. A tendência é que, com o passar do tempo, todo o material saia da unidade. Para identificar o fenômeno da recirculação, a curva $E(\theta)$ apresenta uma sequência de picos que irão caracterizar essas recirculações. Cada pico representa uma fração de traçador que retornou ao sistema. A figura II.12 mostra um esquema que representa o fenômeno da recirculação.

sendo: Q é a vazão do sistema;

α é a fração do fluxo que irá recircular;

q é a vazão da recirculação.

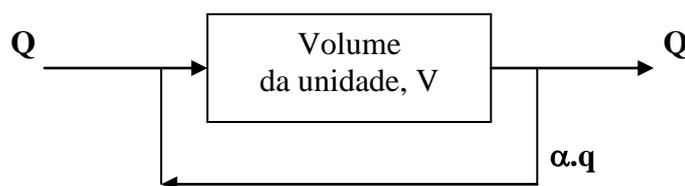


Figura II.12 – Representação esquemática de um fluxo com recirculação.

- **Canalização:**

Ocorre quando elementos do fluido se deslocam pela unidade muito mais rapidamente que outros, causando a remoção do traçador com velocidade mais rápida. O esquema representativo da canalização é mostrado na figura II.13.

sendo: Q é a vazão do sistema;

β é a fração do fluxo canalizado;

q é a vazão da canalização.

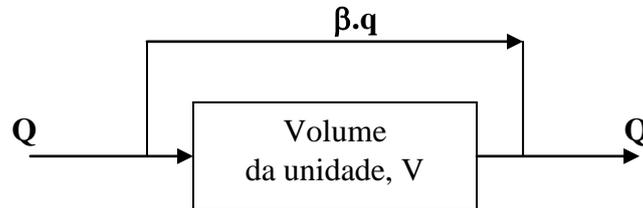


Figura II.13 – Representação esquemática de um fluxo canalizado.

A canalização se caracteriza por uma fração de material que possui velocidade maior do que a dos demais elementos de volume, saindo antes, como mostra a figura II.14, através da curva normalizada $E(t)$.

A função $E(\theta)$, figura II.14.1 (a), apresenta uma estrutura de pico localizada no instante de tempo, abaixo do teta médio, correspondendo ao registro da passagem da fração adiantada do fluxo; com isso, a curva se torna assimétrica em relação ao teta médio.

Na Função $F(\theta)$, figura II.14.1 (b), um degrau é observado no início da curva, representando uma mudança na taxa de crescimento da curva, que corresponde à faixa da canalização.

Da mesma forma, na função $I(\theta)$, figura II.14.1 (c), um degrau é observado no início da curva, mostrando a mudança na taxa de decréscimo da curva, em cuja área se confirma um fenômeno da canalização deste sistema.

Com a função $N(\theta)$, figura II.14.1 (d), a passagem do fluxo canalizado é identificado pela existência de uma estrutura de pico no início da curva, representando aí um fluxo canalizado; após este pico, a curva volta a crescer, indicando a saída do restante do fluxo principal do sistema.

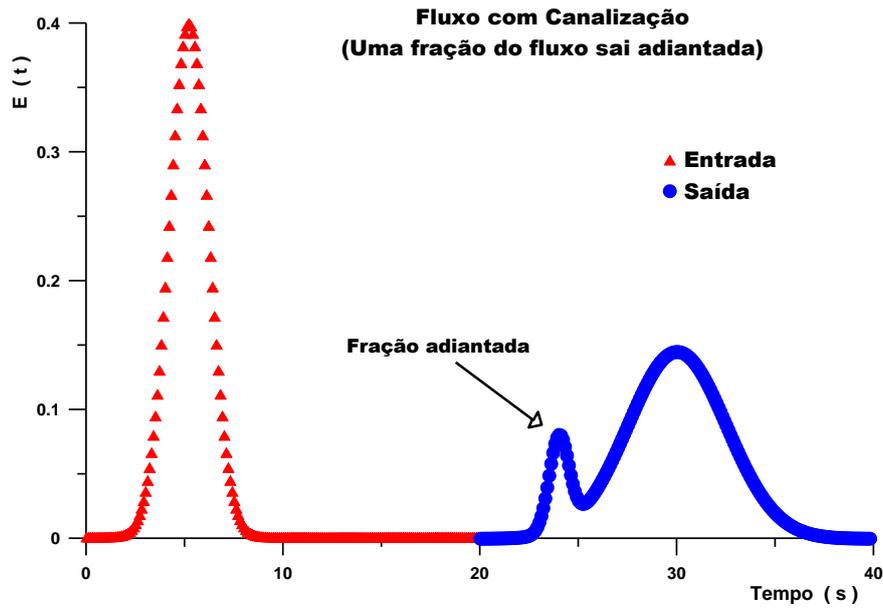


Figura II.14 – Curvas teóricas para um fluxo com canalização.

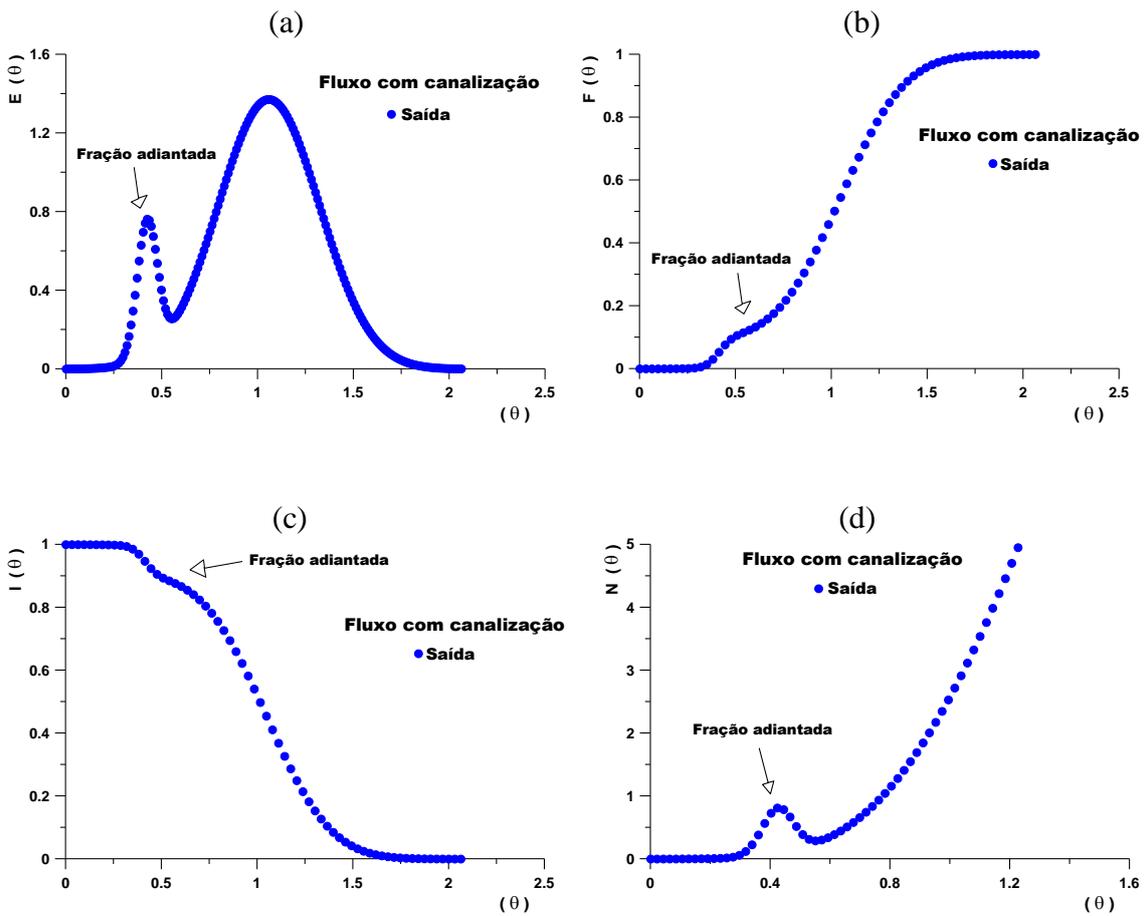


Figura II.14.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo com canalização: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

- **Zona de Retenção:**

É o termo utilizado para regiões que retêm uma fração de material marcado, por um tempo maior do que o tempo médio de residência, mas que, após certo tempo, o material volta a participar do processo de mistura. Este fenômeno é representado esquematicamente na figura II.15.

Na figura II.16, nota-se que a estrutura é inversa à de uma canalização, pois, após a passagem da maior quantidade do material, uma fração sai atrasada e esta fração atrasada é a quantidade de traçador que ficou retido por certo tempo e sai logo depois, conforme mostra a figura II.16.

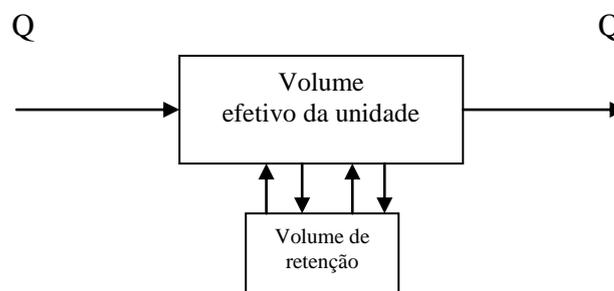


Figura II.15 – Representação esquemática de um fluxo com zona de retenção.

Na função $E(\theta)$, figura II.16.1 (a), a curva apresenta uma estrutura de pico no final da curva, representando que uma porção do traçador ficou por mais tempo na unidade e que, após alguns instantes, este material foi liberado. A curva também é assimétrica em relação ao teta médio.

Já, as funções $F(\theta)$ e $I(\theta)$, figuras II.16.1 (b) e (c), apresentam um degrau no final das curvas, indicando que o fluxo apresenta um problema de zona de retenção.

Na função $N(\theta)$, figura II.16 (d), nos instantes iniciais ocorre um aclave, como no caso de um fluxo pistonado (fluxo normal); porém, devido ao fato de uma fração do material ficar mais tempo na unidade e sair depois, aparece uma estrutura de pico no final desta curva.

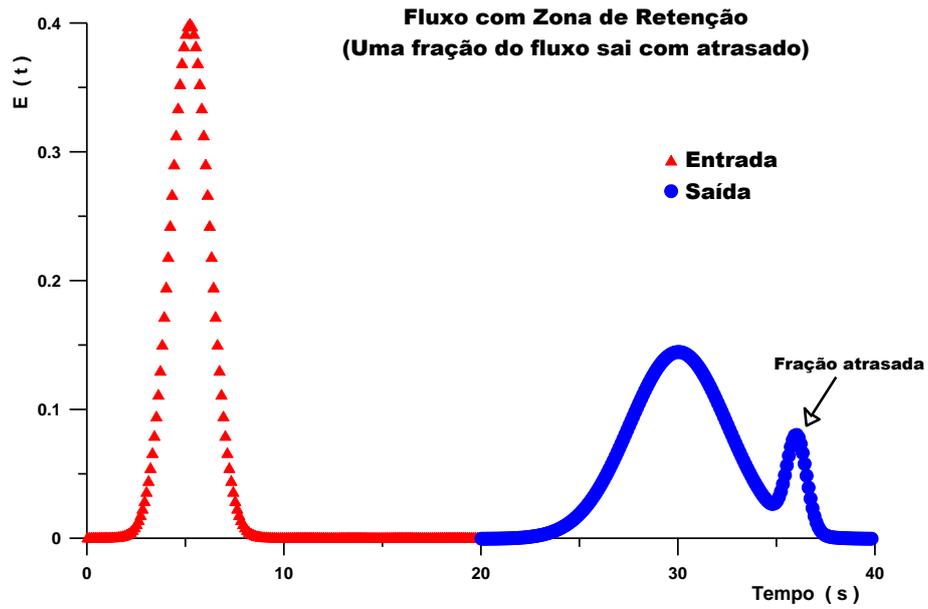


Figura II.16 – Curvas teóricas para um fluxo com zona de retenção.

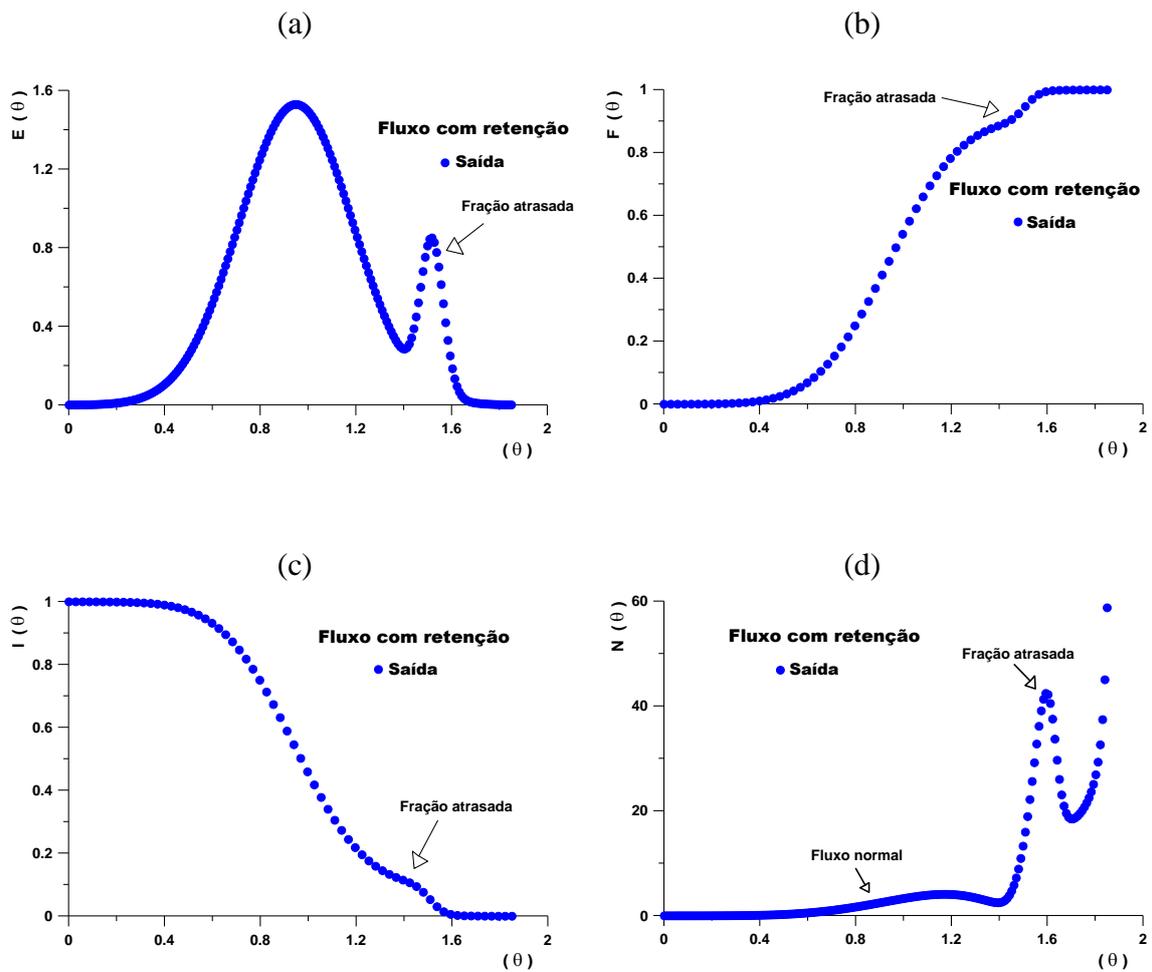


Figura II.16.1 – Funções de DTR adimensionais, para um fluxo com retenção: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

Desta forma, podem-se identificar possíveis problemas ao se estudar o comportamento de unidades industriais, usando as curvas de DTR ou funções de densidade de probabilidades estatísticas do tempo médio de residência.

II.3.3.4 – Momentos estatísticos simples e momentos estatísticos ponderados.

Ao se conhecer o tipo de escoamento, podem-se estimar essas características através de análises baseadas em funções de transferência, conforme descrição no item II.4.1. As funções experimentais da entrada e saída da unidade são representadas por uma distribuição em frequência das idades, que são os registros dos detectores, localizados imediatamente na entrada e saída do sistema em estudo. Através destas funções, aplica-se a metodologia de momentos, método estatístico, que foi inicialmente proposto por Pearson, em 1894, que consiste em supor que os momentos de distribuição da população coincidem com os da amostra. A associação de duas teorias, a de momentos estatísticos de Pearson com a teoria de distribuição de idade de Danckwerts (DTR), permite estabelecer uma relação de ajuste entre os modelos teóricos e os dados experimentais, possibilitando, assim, se conhecer os parâmetros característicos dos escoamentos de fluidos (HIMMELBAU, 1968). Esse método produz ajustes consistentes para um processo e, por isso, é muito utilizado em análises comparativas entre modelos experimentais e modelos teóricos, baseado nas funções de transferência.

O ajuste matemático de parâmetros de uma função resposta, $f(t)$, para uma unidade pode ser simplificado, considerando-se que as funções de distribuição do tempo de residência, por definição, são análogas à distribuição estatística e, assim, relacionadas aos parâmetros, tais como: média e a variância.

Da definição de momento associado a uma função distribuição, M_N , ele pode ser considerado como a área sob a curva resultante da multiplicação da distribuição, $f(t)$, pelo fator de peso, $w(t)$, igual à t^N . A normalização é conveniente, quando se utiliza funções de distribuição estatísticas e, por isso, define-se momento de ordem N de uma distribuição de frequência pela equação II.40, sendo $N = 1, 2, \dots$.

$$M_N = \frac{\int_0^{\infty} t^N \cdot f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (\text{II.40})$$

E o momento de ordem N, em torno da média, dado pela expressão:

$$\bar{M}_N = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^N \cdot f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (\text{II.41})$$

As equações II.40 e II.41 são denominadas *Momentos Estatísticos Simples*, sendo o primeiro momento, centrado na *origem*, a média de uma distribuição normal e o segundo momento, centrado na *média*, sua variância.

Sendo C(t) a função normalizada de f(t), tem-se que:

$$C(t) = \frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(t) dt} \quad (\text{II.42})$$

Os momentos simples podem agora ser representados pelas seguintes equações:

$$M_N = \int_0^{\infty} t^N \cdot C(t) dt \quad (\text{II.43})$$

$$\bar{M}_N = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^N \cdot C(t) dt \quad (\text{II.44})$$

Em relação à resposta do sistema, C(t), devido ao processo de deslocamento do traçador no meio, existe sempre um efeito de cauda associado, que é muito mais evidente em situações complexas, como em meios porosos ou em sistemas compostos de múltiplas subunidades. Nessas situações, para valores altos de t, o fator de peso torna-se grande e a contribuição do efeito de cauda é considerável. Para minimizar os erros associados à medida dos momentos da curva resposta, define-se um novo fator de peso, $w(t) = e^{-st}$, tal que, para valores altos de t, a função converge para zero.

Define-se o novo momento ponderado em $w(t) = e^{-st}$ pelas equações:

$$M_N = \int_0^{\infty} t^N \cdot e^{-st} C(t) dt \quad (\text{II.45})$$

$$\bar{M}_N = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^N \cdot e^{-st} C(t) dt \quad (\text{II.46})$$

As equações II.45 e II.46 são denominadas *Momentos Estatísticos Ponderados*.

Da teoria da transformada de Laplace de uma função C(t), tem-se:

$$L[C(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} \cdot C(t) dt = C(S) \quad (\text{II.47})$$

onde: L [] é o operador da transformada de Laplace;

s é a variável no espaço de Laplace;

C(S) é a transformada de Laplace de C(t).

Ao se derivar a equação II.47, em relação a S, resultará a equação II.48.

Derivando-se, então, a equação II.47, obtém-se:

$$\frac{d}{ds} C(S) = - \int_0^{\infty} t \cdot e^{-st} \cdot C(t) dt \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{d^2}{ds^2} C(S) = \int_0^{\infty} t^2 \cdot e^{-st} \cdot C(t) dt \quad (\text{II.49})$$

$$\frac{d^3}{ds^3} C(S) = - \int_0^{\infty} t^3 \cdot e^{-st} \cdot C(t) dt \quad (\text{II.50})$$

Generalizando-se o processo de derivação para ordem N, tem-se que:

$$M_N = (-1)^N \frac{d^N}{ds^N} C(S) \quad (\text{II.51})$$

Sendo assim, os momentos de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem, podem ser definidos por:

$$M_0 = C(S) \quad \text{Momento de ordem 0} \quad (\text{II.52})$$

$$M_1 = - \frac{d}{dS} C(S) = -C'(S) \quad \text{Momento de ordem 1} \quad (\text{II.53})$$

$$M_2 = \frac{d^2}{dS^2} C(S) = C''(S) \quad \text{Momento de ordem 2} \quad (\text{II.54})$$

Na figura II.17, o desenho esquemático representa uma unidade onde é injetado um traçador, segundo uma função $A(t)$. Dois detectores são posicionados para registrar os sinais, na entrada e saída, sendo $X(t)$ a resposta normalizada na entrada e $Y(t)$ a resposta normalizada na saída.

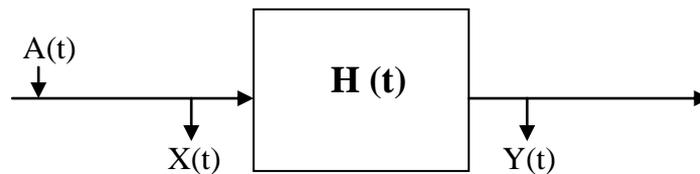


Figura II.17 – Desenho esquemático da injeção de um traçador em uma unidade registrada por dois detectores: um, na entrada, e outro, na saída.

Aplicando-se a técnica de estímulo e resposta, tem-se que:

$$Y(t) = H(t) \otimes X(t) = \int_0^{\infty} X(t) \cdot H(t - \tau) d\tau \quad (\text{II.55})$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação anterior, obtém-se:

$$L[Y(t)] = L[H(t) \otimes X(t)] = L \left[\int_0^{\infty} X(t) \cdot H(t - \tau) d\tau \right] \quad (\text{II.56})$$

Então:

$$L[Y(t)] = Y(S) \quad (\text{II.57})$$

$$L[H(t) \otimes X(t)] = L\left[\int_0^{\infty} X(t) \cdot H(t - \tau) d\tau\right] = H(S) \cdot X(S) \quad (\text{II.58})$$

Resultando numa função algébrica de simples resolução, como mostra a equação:

$$Y(S) = H(S) X(S) \rightarrow H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} \quad (\text{II.59})$$

Derivando-se essa equação, em relação a S, encontra-se:

$$H'(S) = \frac{Y'(S)}{X(S)} - \frac{Y(S) \cdot X'(S)}{X^2(S)} \quad (\text{II.60})$$

Dividindo-se os termos da equação II.60 pela função H(S), encontra-se:

$$\frac{H'(S)}{H(S)} = \frac{Y'(S)}{Y(S)} - \frac{X'(S)}{X(S)} \quad (\text{II.61})$$

sendo: $X(S) = C_{\text{entrada}}(S)$;

$Y(S) = C_{\text{saída}}(S)$;

$C_{\text{entrada}}(S)$ é a transformada de Laplace da contagem do traçador, na entrada do sistema;

$C_{\text{saída}}(S)$ é a transformada de Laplace da contagem do traçador, na saída do sistema.

A equação, então, pode ser escrita como:

$$\frac{H'(S)}{H(S)} = \left[\frac{C'(S)}{C(S)}\right]_{\text{saída}} - \left[\frac{C'(S)}{C(S)}\right]_{\text{entrada}} \quad (\text{II.62})$$

Aplicando-se as equações II.52 e II.53 em II.62 encontra-se a relação entre os momentos:

$$\frac{H'(S)}{H(S)} = \left[\frac{M_1}{M_0} \right]_{\text{entrada}} - \left[\frac{M_1}{M_0} \right]_{\text{saída}} \quad (\text{II.63})$$

A relação de momentos servirá de base para se relacionar as medidas experimentais com os modelos teóricos baseados nas equações de transferência.

Na equação II.63, o primeiro termo da equação representa o modelo teórico (funções de transferência) e o segundo e o terceiro termos representam o modelo experimental (razão entre momentos estatísticos de entrada e saída de uma unidade), sendo que os parâmetros de H(S), ajustados por método de mínimos quadrados, representarão as características do escoamento em meios porosos.

Generalizando-se a equação II.63, obtém-se:

$$\left(\frac{M_n(S)}{M_0(S)} \right)_{\text{saída}} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \cdot \left(\frac{M_{n-i}(S)}{M_0(S)} \right)_{\text{sistema}} \cdot \left(\frac{M_i(S)}{M_0(S)} \right)_{\text{entrada}} \quad (\text{II.64})$$

Muitos autores têm discutido sobre a escolha do melhor valor de S, que é um fator importante na aplicação da metodologia de momentos ponderados. Quando não se escolhe um fator S adequado, encontra-se um erro considerável nas estimativas dos parâmetros de escoamento ou, até, uma não reprodutibilidade dos experimentos. O valor S depende diretamente da ordem do momento utilizado e também do tempo médio de residência. A escolha para o maior valor de S depende do maior valor do momento utilizado, N, fornecido pela equação (MICHELSEN, 1970; ANDERSSSEN, 1971):

$$S_{\text{máx.}} = \frac{2 \cdot (k + 1)}{\tau_1 + \tau_2 - \Delta t} \quad (\text{II.65})$$

onde: k é a maior ordem do momento;

τ_1 e τ_2 são os tempos médio de residência na entrada e na saída, respectivamente;

Δt é a diferença de tempo nas fronteiras.

II.3.4 – Ajuste de parâmetros da função resposta para os sistemas de mistura.

Como foi visto, é possível se ajustar os parâmetros de um dado modelo de fluxo, por uma dada equação diferencial, a qual se tenha sua solução analítica temporal, bastando apenas convertê-la, por meio da transformada de Laplace. Vários trabalhos trazem essa equação transformada, pois, em sistemas muito complexos, suas equações temporais necessitam de muita simplificação para se conseguir transformá-las. O formalismo matemático apropriado à elaboração do modelo para a função resposta (função de transferência) para sistemas complexos é o emprego da transformada de Laplace (ANDERSSON, 1971; EDWARDS, 1973; SINCLAIR, 1965).

Na figura II.18, no domínio-S das transformadas de Laplace, a função de transferência, $H(s)$, de uma unidade contém toda a informação dela e atua como um operador linear sobre a função de entrada $X(s)$, resultando na função de saída, $Y(s)$.

Para sistemas complexos, o cálculo da distribuição do tempo médio de residência pode ser simplificado, considerando-se o sistema como composto de uma associação de sistemas simples em série/paralelo, com ou sem refluxo de material (GIBILARO, 1969; GIBILARO, 1975).

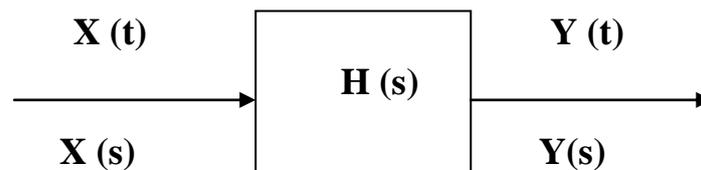


Figura II.18 – Desenho esquemático de uma unidade com função de transferência no espaço de Laplace, $H(s)$, de entrada, $X(t)$, e de saída, $Y(t)$, no espaço de tempo.

A função distribuição de tempo de residência da unidade é calculada pela transformada inversa de Laplace de $H(s)$. Alguns modelos conhecidos foram encontrados na literatura consultada, tais como os descritos a seguir.

II.3.4.1 – Modelo de misturador perfeito simples.

Seja um reator de mistura contínua com volume, V , submetido a uma vazão, Q , de um fluido uniforme, onde, no instante $t = 0$, é inserido um traçador radioativo. Por definição do procedimento, o material marcado não deverá sofrer reação com o meio. A atividade do traçador, na saída da unidade, $Y(t)$, obtida a partir da equação de balanço de massa, é dada pela equação (BRANDÃO, 2001):

$$\frac{d}{dt} Y(t) = \frac{1}{V} [Q X(t) - QY(t)] = \alpha [X(t) - Y(t)] \quad (\text{II.66})$$

onde: $\alpha = Q/V = 1/\tau$;

$X(t)$ é a função que descreve o processo de injeção do traçador no misturador;

τ é o tempo médio de residência do misturador.

Assim sendo, conclui-se que:

$$\frac{d}{dt} Y(t) + \alpha Y(t) = \alpha X(t) \quad (\text{II.67})$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação II.67, obtém-se as equações:

$$L \left[\frac{d}{dt} Y(t) \right] + L[\alpha Y(t)] = L[\alpha X(t)] \quad (\text{II.68})$$

$$s Y(s) - Y(t = 0) + \alpha Y(s) = \alpha X(s) \quad (\text{II.69})$$

Isolando-se $Y(s)$, encontra-se:

$$Y(s) = \frac{Y(t = 0)}{(s + \alpha)} + \frac{\alpha}{(s + \alpha)} X(s) \quad (\text{II.70})$$

Para $t = 0$, não existe traçador no meio; então, $Y(t = 0) = 0$, o que simplifica a expressão anterior, resultando em:

$$Y(s) = \frac{\alpha}{(s + \alpha)} X(s) \quad (\text{II.71})$$

Considerando-se a função de transferência, $H(s)$, dada pela equação II.59, determina-se a solução transformada para um misturador perfeito:

$$H(s) = \frac{\alpha}{(s + \alpha)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{\alpha}\right)} \rightarrow H(s) = \frac{1}{(1 + \tau s)} \quad (\text{II.72})$$

Conhecendo-se a forma de injeção do traçador, $X(t)$, a equação II.71 permite calcular a concentração, $Y(s)$, e, usando-se a transformada inversa de Laplace, pode-se obter a expressão da atividade em massa, na saída do misturador, para qualquer instante de tempo t .

II.3.4.2 – Modelo para “N” misturadores perfeitos em série.

Seja um conjunto de N misturadores em série, todos perfeitos, cada um com volume, V_i , sujeitos a uma vazão, Q , de um fluido perfeito, onde é inserido um traçador, no primeiro elemento do conjunto. A equação de balanço de massa para o i -ésimo elemento do conjunto é dada pela equação (BRANDÃO, 2001):

$$V_i \frac{d}{dt}(Y_i(t)) = Q(Y_{i-1}(t) - Y_i(t)) \rightarrow \frac{d}{dt}(Y_i(t)) = \alpha_i(Y_{i-1}(t) - Y_i(t)) \quad (\text{II.73})$$

onde: $\alpha = Q/V_i$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação II.73, encontra-se:

$$(s + \alpha_i) Y_i(s) = Y_i(t = 0) + \alpha_i Y_{i-1}(s) \quad (\text{II.74})$$

Isolando-se $Y(s)$, na equação II.74, tem-se que:

$$Y_i(s) = \frac{Y_i(t=0)}{(s + \alpha_i)} + \frac{\alpha_i}{(s + \alpha_i)} Y_{i-1}(s) \quad (\text{II.75})$$

Considerando-se cada um dos misturadores, têm-se então um conjunto de N equações lineares e, na saída do conjunto, a atividade em massa do traçador será dada por:

$$Y(s) = \frac{\prod_{j=1}^N \alpha_j}{\prod_{j=1}^N (s + \alpha_j)} X(s) + \frac{C_1(t=0)}{\prod_{j=1}^N (s + \alpha_j)} + \frac{C_2(t=0)}{\prod_{j=2}^N (s + \alpha_j)} + \dots + \frac{C_N(t=0)}{(s + \alpha_N)} \quad (\text{II.76})$$

Considerando-se ainda que, no início do processo, não exista traçador no meio, então, $Y_i(t=0) = 0$. A resposta da unidade será representada pela equação:

$$Y(s) = \frac{\prod_{j=1}^N \alpha_j}{\prod_{j=1}^N (s + \alpha_j)} X(s) \quad (\text{II.77})$$

A função de transferência, $H(s)$, dada pela equação II.59, pode ser agora definida para o caso de N misturadores em série, sendo dada pela equação:

$$H(s) = \frac{\prod_{j=1}^N \alpha_j}{\prod_{j=1}^N (s + \alpha_j)} \quad (\text{II.78})$$

Caso se considere a existência de misturadores idênticos, $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N$, pode-se simplificar a equação II.78, resultando em:

$$H(s) = \frac{\alpha^N}{(s + \alpha)^N} \quad (\text{II.79})$$

II.3.4.3 – Modelo de reator do tipo pistão.

Seja um reator do tipo pistão de volume, V, submetido a um fluxo de um fluido perfeito com vazão, Q, onde é injetado um traçador, segundo uma função X(t). A característica principal desse tipo de reator, é que o fluido se desloca em forma de um

pistão desde a entrada, ou seja, a função de saída, $Y(t)$, é igual à função da entrada, que é transmitida sem alteração. A equação de balanço de massa é, então, fornecida pela equação (BRANDÃO, 2001):

$$\frac{\partial Y(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Y(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.80})$$

As condições iniciais, do sistema são:

$$Y(x, t=0) = 0 \quad (\text{II.81})$$

$$Y(x=0, t) = X(t) \quad (\text{II.82})$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação II.80, obtém-se:

$$L \left[\frac{\partial Y(x, t)}{\partial t} \right] + L \left[\frac{\partial Y(x, t)}{\partial x} \right] = 0 \quad (\text{II.83})$$

$$s Y(x, s) - Y(x, t=0) + \frac{d}{dx} Y(x, s) = 0 \quad (\text{II.84})$$

Como, no instante inicial, não existe traçador no meio, sendo $Y(x, t=0) = 0$, têm-se:

$$s Y(x, s) + \frac{d}{dx} Y(x, s) = 0 \quad (\text{II.85})$$

Resolvendo-se a equação diferencial anterior e usando-se as condições de contorno, encontra-se:

$$Y(x, s) = e^{-xs} X(s) \longrightarrow Y(x, t) = X(t - x) \quad (\text{II.86})$$

A concentração na saída da unidade é idêntica à de entrada, mas retardada por um fator de “ x ”.

Considerando-se um reator do tipo misturador, que apresente um tempo de residência, τ , correspondente ao tempo médio de residência entre a entrada do traçador e sua saída da unidade, deduz-se que:

$$Y(x, t) = X(t - \tau) \quad (\text{II.87})$$

onde: $\tau = V/Q$.

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação II.87, encontra-se:

$$Y(x, s) = e^{-\tau s} X(s) \quad (\text{II.88})$$

Pela equação II.57, a função de transferência, $H(s)$, para um reator do tipo pistão, com volume V e tempo médio de residência, τ , tem-se que:

$$H(s) = e^{-\tau s} \quad (\text{II.89})$$

II.3.4.4 – Modelo de reator com dispersão axial.

Seja um reator tipo pistão com dispersão axial que apresente um volume, V , submetido a um fluxo turbulento de velocidade constante, v , e fluido perfeito de vazão, Q , onde é injetado um traçador segundo uma função $X(t)$. A característica principal desse tipo de reator, é que o fluido se desloca axialmente na direção x , ocasionando uma dispersão nessa direção, D_L . O fluido, então, interage com o sistema, modificando-o de tal forma que a resposta dessa modificação implicará numa função na saída, $Y(t)$. A equação de balanço de massa é dada por (FAHIM, 1982):

$$\frac{\partial Y(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial Y(x, t)}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 Y(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{II.90})$$

Levando-se em consideração as condições de contorno e iniciais:

$$Y(x, t=0) = 0 \quad (\text{II.91})$$

$$Y(x=0,t) = G(t) \quad (\text{II.92})$$

$$Y(x=L,t) = G(t) \quad (\text{II.93})$$

onde: $0 < G(t) < L$

E aplicando-se a transformada de Laplace, na equação II.90, tem-se que:

$$L \left[\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} \right] + L \left[v \frac{\partial Y(x,t)}{\partial x} \right] - L \left[D_L \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (\text{II.94})$$

A equação resultante, após a aplicação da transformada de Laplace é:

$$s Y(x,s) - Y(x,t=0) + v \frac{d}{dx} Y(x,s) - D_L \frac{d^2}{dx^2} Y(x,s) = 0 \quad (\text{II.95})$$

Como, no instante inicial, não existe traçador no meio, ou seja $C(x, t=0) = 0$, têm-se que:

$$s Y(x,s) + v \frac{d}{dx} Y(x,s) - D_L \frac{d^2}{dx^2} Y(x,s) = 0 \quad (\text{II.96})$$

Resolvendo-se, a equação diferencial e usando-se as condições de contorno e inicial, expressas pelas equações II.91, II.92 e II.93, encontra-se:

$$Y(x,s) = \exp \left\{ \frac{1}{2N_d} \left[1 - (1 + 4N_d \tau s)^{1/2} \right] \right\} \cdot X(s) \quad (\text{II.97})$$

Pela equação II.59, expressa-se H(S) como:

$$H(s) = \exp \left\{ \frac{1}{2N_d} \left[1 - (1 + 4N_d \tau s)^{1/2} \right] \right\} \quad (\text{II.98})$$

onde: $\tau = L/v$.

N_d (Número de dispersão) = $D_L/Lv = 1/P_e$.

II.3.4.5 – Associação entre modelos teóricos.

Os modelos simplificados, como os misturadores perfeitos e os reatores do tipo pistão, mencionados anteriormente, são capazes de interagirem mutuamente, através de associações em paralelo ou em série, por isso, são capazes de definir um sistema mais complexo pela simplicidade das funções de transferência (BRANDÃO, 2001).

II.3.4.5.1 – Sistemas em série.

Sejam dois subsistemas em série, cada um deles caracterizado por uma função de transferência, $H_1(s)$ e $H_2(s)$, respectivamente. Se um traçador é injetado, na entrada do primeiro subsistema, segundo uma função, $X(t)$, e acompanhado o seu movimento por detectores posicionados nas saídas de cada conjunto, pode-se representá-los conforme o esquema da figura II.19.

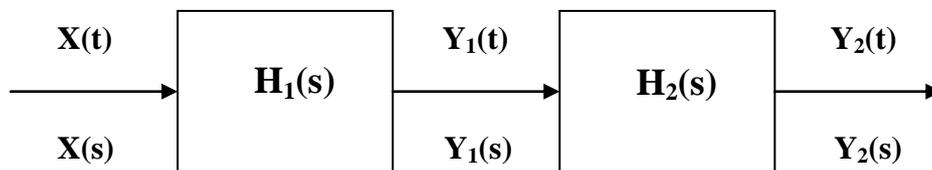


Figura II.19 – Subsistemas em série.

A saída de cada uma das subunidades independentes é fornecida pelas equações:

$$Y_1(s) = H_1(s) X(s) \quad (\text{II.99})$$

$$Y_2(s) = H_2(s) Y_1(s) \quad (\text{II.100})$$

O emprego da equação II.99 na equação II.100, resulta em:

$$Y_2(s) = H_1(s) H_2(s) X(s) \quad (\text{II.101})$$

Ao se considerar um pulso instantâneo na entrada do sistema, conclui-se que:

$$H(s) = H_1(s) H_2(s) \quad (\text{II.102})$$

Generalizando-se, para N subsistemas em série, tem-se que:

$$H(s) = H_1(s) H_2(s) \dots H_N(s) \quad (\text{II.103})$$

onde: $H_i(s)$ é a função de transferência referente ao i-ésimo elemento.

Se τ_1 é o tempo médio de residência para o i-ésimo subsistema, então, o tempo médio de residência total dos sistemas dispostos em série pode ser expresso por:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_N \rightarrow \tau = \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (\text{II.104})$$

II.3.4.5.2 – Sistemas em paralelo.

Seja uma unidade através da qual se desloca um fluido com vazão, Q, composta por dois subsistemas dispostos em paralelo, cada um submetido a uma vazão diferente, Q_1 e Q_2 , respectivamente. No instante de tempo, $t = 0$, injeta-se o material marcado na entrada da unidade, localizada antes dos subsistemas, e mede-se o sinal do traçador na saída do conjunto. Na figura II.20, é mostrada uma unidade com dois subsistemas em paralelo.

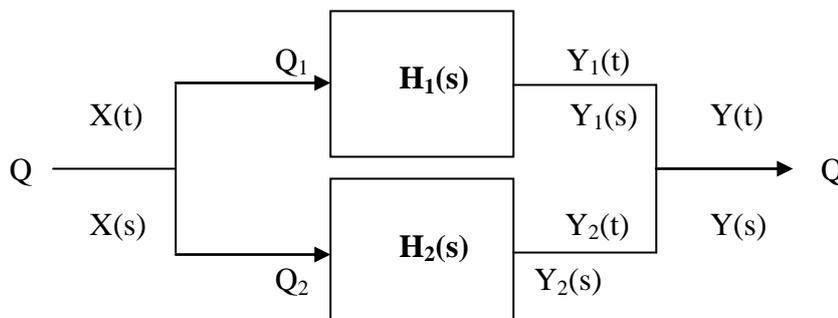


Figura II.20 – Subsistemas em paralelo.

A resposta da unidade é dada pela soma algébrica da contribuição de cada um dos subsistemas. Cada um dos subsistemas pode ser representado por:

$$Y_1(s) = \alpha_1 X(s) H_1(s) \quad (\text{II.105})$$

$$Y_2(s) = \alpha_2 X(s) H_2(s) \quad (\text{II.106})$$

onde: α_i é a fração da vazão no ramo i e é definida por: $\alpha_i = Q_i/Q$.

Então, para a unidade de saída tem-se que:

$$Y(s) = Y_1(s) + Y_2(s) \quad (\text{II.107})$$

Logo, é possível representar a resposta do sistema pela equação:

$$Y(s) = \alpha_1 X(s) H_1(s) + \alpha_2 X(s) H_2(s) = X(s) [\alpha_1 H_1(s) + \alpha_2 H_2(s)] \quad (\text{II.108})$$

Pela equação II.59, a função de transferência pode ser definida, para sistemas em paralelo, pela equação:

$$H(s) = \alpha_1 H_1(s) + \alpha_2 H_2(s) \quad (\text{II.109})$$

Generalizando-se para um sistema com N misturadores em paralelo, cada um caracterizado por um tempo médio de residência, τ_i , e sujeito a um fluxo de vazão, Q_i , a função de transferência será expressa por:

$$H(s) = \alpha_1 H_1(s) + \alpha_2 H_2(s) + \dots + \alpha_N H_N(s) \longrightarrow \tau = \sum_{i=1}^N \alpha_i \tau_i \quad (\text{II.110})$$

O tempo médio de residência total das unidades em sistemas dispostos em paralelo é definido como:

$$\tau = \alpha_1 \tau_1 + \alpha_2 \tau_2 + \dots + \alpha_N \tau_N \longrightarrow \tau = \sum_{i=1}^N \alpha_i \tau_i \quad (\text{II.111})$$

II.3.5 – Relação entre momentos ponderados para as principais funções respostas.

Neste trabalho de tese as principais funções respostas (modelos) que serão aplicadas são: o fluxo pistão, o modelo de “N” misturadores idênticos e em série, o fluxo com dispersão axial, modelo de fluxo pistão em paralelo com o modelo de fluxo com dispersão axial e o modelo de N misturadores simples em paralelo com o modelo de M misturadores simples, ambos os misturadores sendo idênticos.

Aplicando a função II.63 para as funções respostas dos modelos, citados acima, são encontrados os valores que estão mostrados na tabela II.3.

II.4 – Cálculo dos erros referentes aos ajustes matemáticos.

O cálculo dos erros referentes aos ajustes das funções de momentos ponderados foi calculado segundo a teoria de método de mínimos quadrados não lineares matriciais (HELENE, 2006).

Tabela II.3 – Relação entre momentos ponderados de primeira ordem e de ordem zero.

<i>Modelo</i>	$\frac{H'(S)}{H(S)}$	<i>Parâmetros ajustados</i>
Fluxo pistão	$-\tau$	$\tau \rightarrow \text{TMR.}$
Misturador simples	$-\frac{\tau}{s\tau + 1}$	$\tau \rightarrow \text{TMR.}$
“N” misturadores	$-\frac{N\tau}{s\tau + 1}$	$N \rightarrow \text{Num. de mist.};$ $\tau \rightarrow \text{TMR.}$
Fluxo com dispersão axial	$-\tau \left(1 + \frac{4\tau s}{P_e}\right)^{-1/2}$	$P_e \rightarrow \text{Num. de Peclet};$ $\tau \rightarrow \text{TMR.}$
Fluxo pistão em paralelo com fluxo dispersivo	$\frac{\left(T_1 e^{\frac{P_e}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4T_2 s}{P_e}}\right)}\right)}{\left(\sqrt{1 + \frac{4T_2 s}{P_e}} \left(e^{\frac{P_e}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4T_2 s}{P_e}}\right)} + (1 - A)e^{-T_2 s}\right)\right)}$	$P_e \rightarrow \text{Num. de Peclet};$ $T_1 \rightarrow \text{TMR do fluxo pistão};$ $T_2 \rightarrow \text{TMR do fluxo dispersivo};$ $A \rightarrow \text{fração do traçador que vai para o fluxo dispersivo.}$
Modelo de “M” misturadores em série, em paralelo com o modelo de “N” misturadores em série	$-\left(\frac{A \left(\frac{N}{N + T_1 s}\right)^N N T_1}{N + T_1 s} + (1 - A) \cdot \left(\frac{\left(\frac{M}{M + T_2 s}\right)^M M T_2}{M + T_2 s}\right)\right)$	$P_e \rightarrow \text{Num. de Peclet};$ $T_1 \rightarrow \text{TMR do fluxo pistão};$ $T_2 \rightarrow \text{TMR do fluxo dispersivo};$ $N \rightarrow \text{Quantidade “N” de mist.};$ $M \rightarrow \text{Quantidade “M” de mist.};$ $A \rightarrow \text{fração do traçador que vai para o modelo de “N” mist..}$
	$\left(A \left(\frac{N}{N + T_1 s}\right)^N + (1 - A) \cdot \left(\frac{M}{M + T_2 s}\right)^M\right)$	

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 – Sistema de aquisição e análise de dados.

Para a aquisição dos dados experimentais, é necessário um conjunto de equipamentos essenciais, para cada detector. Este conjunto de módulos eletrônicos é tradicionalmente empregado na obtenção e processamento de sinal gerado por detectores cintiladores. Cada conjunto é conectado à placa conversora ADC (conversor analógico/digital) e acoplado a um microcomputador que irá processar os dados. O esquema dos módulos utilizados é mostrado na figura III.1.

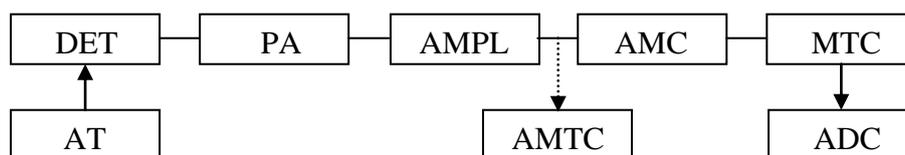


Figura III.1 – Conjunto de módulos eletrônicos para o monitoramento do radiotraçador.

- DET – Detector cintilador NaI (1”x1”), HARSHAW, Modelo Integral Line;
- AT – Fonte de alta-tensão, Micronal, Modelo 1023 A;
- PA – Pré-Amplificador, ORTEC, Modelo 113;
- AMPL – Amplificador com Filtro Ativo, ORTEC, Modelo 435 A;
- AMC – Analisador Monocanal, MICRONAL, Modelo 4010;
- AMTC – Analisador Multicanal, CAMBERRA, Genie-2000;
- MTC – Medidor de Taxa de Contagem, ORTEC, Modelo 449-2;
- ADC – Microcomputador e placa conversora ADC, NATIONAL INSTRUMENTS, Modelo BNC-2110;

Ao serem registrados, os sinais são processados pelo conjunto de aquisição e analisados por uma placa conversora ADC, acoplada a um microcomputador, que possibilita efetuar a conversão dos dados necessários ao monitoramento do traçador. O módulo da placa conversora analógico/digital possui trinta e dois canais independentes, o que possibilita, através do programa LabVIEW, aquisições múltiplas e ajuste do tempo de aquisição. A figura III.2 mostra os equipamentos eletrônicos ligados, que formam o conjunto de aquisição e análise de dados.

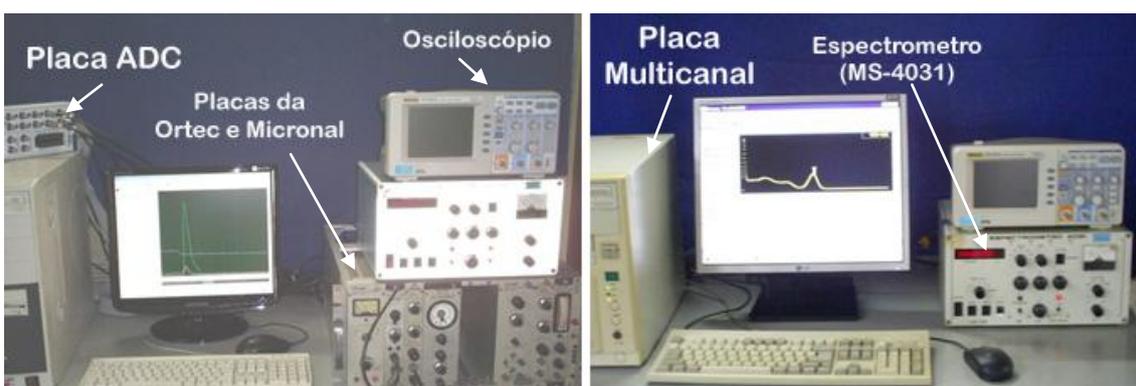


Figura III.2 – Conjunto de aquisição e análise de dados.

III.2 – Calibração de detectores cintiladores NaI.

Quando o traçador é injetado em uma tubulação, dois fenômenos ocorrem simultaneamente: a difusão no meio e o deslocamento longitudinal, acompanhando a movimentação do fluido que se desloca no interior do duto. Para que os resultados das medidas registradas em sistemas independentes possam ser analisados e comparados, é necessário que todo o conjunto de medida, composto pelo detector e os módulos eletrônicos associados a ele, estejam adequadamente calibrados. Esta é uma condição fundamental para se garantir resultados com medidas precisas, principalmente, em situações com altas taxas de diluição do traçador no meio, onde a relação sinal/ruído piora, à medida que a concentração do traçador diminui, ou seja, para se garantir a reprodutibilidade dos resultados, quando são usados radiotraçadores, deve-se calibrar devidamente os detectores cintiladores NaI.

O procedimento de calibração foi realizado segundo KNOLL, 1989 e MAFRA, 1973. Para se calibrar, primeiramente, levanta-se o ponto de operação do detector. Para

tal, posicionou-se uma fonte padrão de Césio-137 (^{137}Cs ; energia: 661,7 keV) com atividade de 23,53 MBq, na face dianteira do detector; variou-se a alta tensão lentamente, registrando-se a contagem total por minuto no contador. Assim, foi gerado um gráfico que representa a variação do número de contagens correspondentes a cada tensão e, na região do patamar (região de contagem mais estável do detector), foi escolhido o ponto correspondente a 1/3 dele, para ser a tensão de operação do detector. Alimentando o detector no ponto de operação determinado, com o auxílio de um osciloscópio, calibrou-se o ganho do amplificador para uma altura de pulso entre 0 a 10 volts, sendo essa altura de pulso dependente das características do radioisótopo a ser empregado no experimento. O ruído eletrônico foi discriminado com o auxílio de um analisador de pulso monocanal (TSOLFANIDIS, 1983; MAFRA, 1973; KNOLL, 1989).

III.2.1 – Determinação da eficiência de fotopico.

Para o uso da metodologia dos momentos ponderados, onde se relacionam os sinais de dois detectores NaI, é de extrema importância que ambos os detectores tenham eficiência, iguais ou próximas, para as energias das fontes radioativas utilizadas. Por isso, é imprescindível o levantamento das curvas de eficiência, o que garante, assim, para uma mesma geometria, que ambos os detectores meçam quantidades iguais.

Por isso, foi levantada a curva de eficiência para os detectores A, B e C, para as diversas energias das fontes radioativas. Para a determinação da eficiência de fotopico, cinco fontes padrões foram usadas e suas características encontram-se listadas na tabela III.1.

O procedimento usado para o levantamento da curva de eficiência encontra-se detalhado no trabalho de Ramos (RAMOS, 2006). O tempo de contagem foi de 30 minutos e, com o auxílio do programa computacional GENIE-2000 (1999), determinou-se as curvas da eficiência de fotopico, em função da energia da radiação incidente.

Tabela III.1 – Parâmetros relativos às fontes padrões utilizadas na determinação da eficiência de fotóptico. (WESTMEIER, 1983)

Isótopos	T _{1/2} (anos)	Energia (keV)	Probabilidade (%)	Atividade corrigida para 2010 (kBq)
²⁴¹ Am	432,20	59,54	35,90	189,86
¹³³ Ba	10,50	80,99	32,97	616,39
^{166m} Ho	1200,00	184,42	72,60	23,47
		280,45	29,60	
¹⁵² Eu	13,60	344,27	26,49	135,32
¹³⁷ Cs	30,17	661,65	89,98	314,19

III.3 – Preparação dos traçadores radioativos.

Existe uma grande diversidade de traçadores que podem ser utilizados para se efetuar os experimentos em fluxos gasosos e a escolha do mais adequado depende das características do sistema e do tempo de realização do experimento. A tabela III.2 mostra os principais radiotraçadores gasosos usados neste trabalho.

Tabela III.2 – Radiotraçadores gasosos.

Composto	P.F. (°C)	P.E. (°C)	Isótopo	Meia-Vida (h)	Radiação (MeV)
CH ₃ Br	-93,60	3,60	⁸² Br	36	γ: 0,55-1,32
CH ₃ I	-66,40	42,43	¹²³ I	13	γ: 0,159
I ₂	113,70	184,40	¹²³ I	13	γ: 0,159

Para se avaliar o comportamento dos materiais adsorvedores no filtro projetado é necessário simular os gases radioativos. Dois isótopos foram utilizados: o ⁸²Br na forma de Brometo de Metila (CH₃Br), usado para simular um gás inerte que não reage com o meio, caracterizando assim o tipo de fluxo; o segundo isótopo foi o ¹²³I, para se verificar a capacidade de adsorção dele nos meios adsorvedores usados, na forma de Iodo elementar, I₂ (inorgânico), e Iodeto de Metila, CH₃I (orgânico), que são os mais prováveis de serem encontrados num ambiente de medicina nuclear.

O isótopo escolhido, ^{82}Br , foi produzido através de ativação neutrônica, no canal J9 do Reator Argonauta no IEN/CNEN, junto ao núcleo. Para o processo de ativação neutrônica, as condições operacionais do reator foram (RT-IEN-11, 2002):

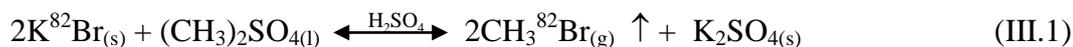
- potência = 340 W;
- fluxo de nêutrons térmicos = $3,2 \times 10^9$ nêutrons/cm².s;
- fluxo de nêutrons epitérmicos = $5,74 \times 10^7$ nêutrons/cm².s;
- volume máximo de amostra a ser ativada = 5,0 ml;
- tempo de irradiação variável de 4 a 6 horas.

O sal de KBr (Brometo de Potássio) foi utilizado e irradiado no reator, produzindo bromo radioativo, ^{82}Br ; a partir deste sal produz-se o gás de CH_3Br . Este gás foi escolhido pelo motivo de ser um gás inerte, não reagindo com o meio e nem com os adsorvedores que foram utilizados como meios porosos no filtro.

Além do reator Argonauta (IEN/CNEN), o serviço de Radiofármacos/IEN dispõe do Cíclotron CV-28, que pode ser utilizado para gerar os traçadores via reações nucleares do tipo (p,2n). O Cíclotron produz rotineiramente ^{123}I , para análise ou tratamento de problemas relacionados à glândula tireóide, em clínicas especializadas. Por isso, o isótopo do iodo utilizado neste trabalho é o ^{123}I . A partir deste, na forma do Na^{123}I , serão produzidas outras moléculas: CH_3I e I_2 , simulando assim, moléculas contendo iodo que estão presentes no ar devido à sua alta volatilidade.

III.3.1 – Produção do Brometo de Metila (CH_3Br).

A produção deste gás já foi estudada e desenvolvida por Candeiro, sendo gerada, a partir da seguinte reação química (RT-IEN-05, 2010):



A síntese deste gás consiste em se adicionar, no vaso de reação, seis mililitros de Sulfato de Dimetila, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}_4$, 3 ml de Ácido Sulfúrico, H_2SO_4 [9M], e 15 ml de solução de Brometo de Potássio, KBr [4M]. A reação química não é espontânea à temperatura ambiente, por isso, é necessário aquecer a unidade de 70 °C a 80 °C. O gás de Brometo de Metila é gerado, após meia hora do início do aquecimento. Para aquecer a unidade foi usado um Variac associado a uma fita resistiva, posicionado ao seu redor.

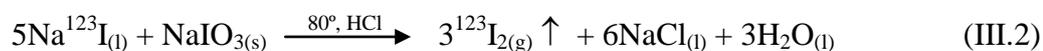
Em todos os experimentos, uma unidade compacta, controlada por válvulas específica para gás do tipo borboleta (abre/fecha), foi usada para produzir os traçadores gasosos. A unidade é mostrada na figura III.3 (RT-IEN-04, 2010).



Figura III.3 – Unidade compacta para produção dos radiotraçadores gasosos.

III.3.2 – Produção do Iodo elementar (I_2).

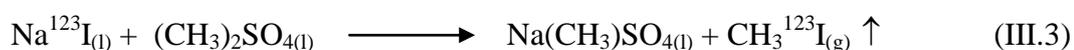
Na síntese do iodo elementar, foram empregados 12,5 ml de uma solução de iodeto de sódio [2M]; 1 g de iodato de sódio isento de iodeto; e 10 ml de ácido clorídrico [3M]. Segundo a reação abaixo (RT-IEN-06, 2010):



Como na síntese do brometo de metila, a síntese do iodo elementar não ocorre naturalmente, por isso deve ser adicionado calor até que o vaso de produção chegue aos 80°C, calor necessário para que o gás de iodo seja liberado.

III.3.3 – Produção do Iodeto de Metila (CH₃I).

Para a produção do gás de iodeto de metila, foram usados como reagentes 12,5 ml de uma solução de iodeto de sódio [2M] e 4,22 ml de sulfato de dimetila concentrado, conforme a reação abaixo (RT-IEN-06, 2010):



Essa síntese ocorre espontaneamente, por isso, não é necessário adicionar calor.

III.4 – Projeto e construção do Leito de Teste para o estudo de imobilização de efluentes gasosos de iodo.

Para se estudar a adsorção de iodo gasoso em substratos (sílica impregnada com prata e carvão ativo), foi confeccionada uma unidade, designada “Leito de Teste”, que tem por objetivo estudar os diferentes meios com granulometrias distintas. A unidade permite a variação da quantidade de substrato a ser estudado e foi confeccionada em um material de baixa densidade (PVC), que não reage com o meio, não espalhando a radioatividade e não absorvendo em suas paredes os traçadores envolvidos.

O Leito de Teste foi confeccionado na oficina mecânica do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN). Devido à complexidade do filtro, envolveram várias peças produzidas separadamente, conforme mostram as figuras III.4 e III.5. Todas as unidades das figuras adiante se encontram em milímetros.

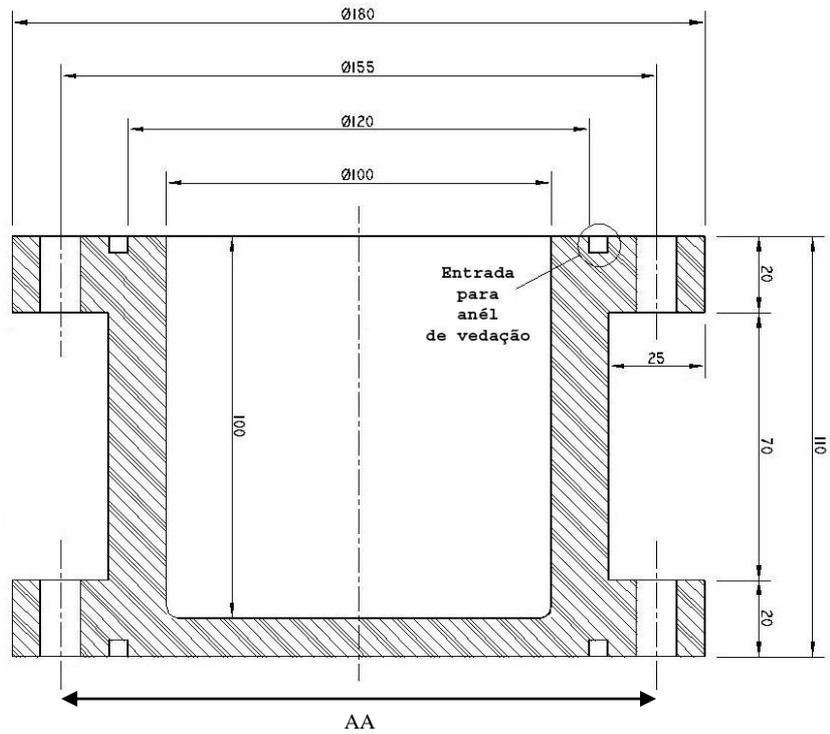


Figura III.4 – Peça A: Cilindro reto que acomoda o meio-poroso.

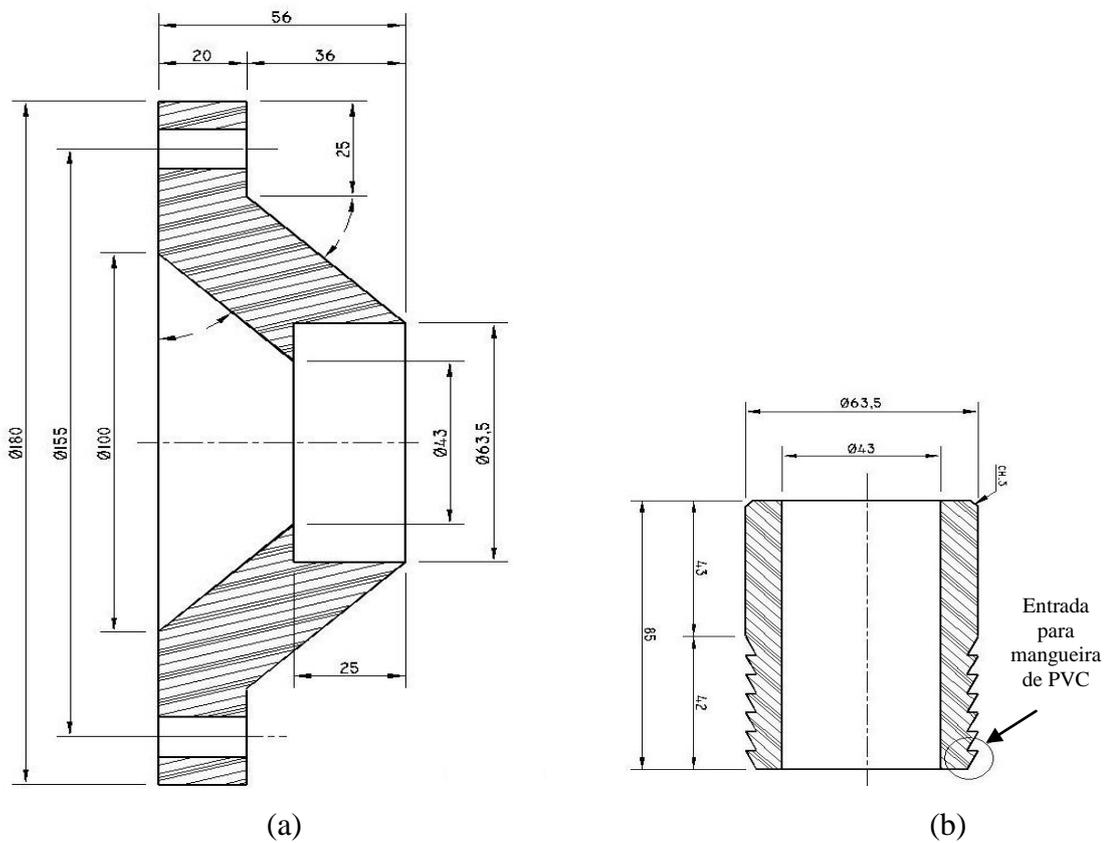


Figura III.5 – (a) Peça B: Cone de redução para acoplar a mangueira de PVC ($\phi=63,5\text{mm}$) e (b) Peça C: Acoplamento entre o cone e o engate para a mangueira.

O Leito de Teste consiste de um cilindro reto em PVC com 100 mm de diâmetro interno e 110 mm de altura, como mostra a figura III.4. O cilindro é acoplado a dois cones, nos moldes da figura III.5(a), que reduzem o diâmetro para o engate de mangueiras flexíveis de PVC ($\phi=63,5$ mm), conforme mostra a figura III.5(b), que conduzem o fluxo. Para se evitar possíveis vazamentos, flanges de vedação de silicone (Oring's) foram utilizados nas junções dos cones ao cilindro reto. As mangueiras foram acopladas no engate por braçadeiras fixadas com parafusos.

Para se garantir uma vedação uniforme, oito furos equidistantes nas abas do cilindro foram feitos, como se observa na figura III.6 (a). O gabarito de furação, mostrado na figura III.6 (b), foi feito para uma possível reprodução do mesmo, garantindo-se assim uma reprodutibilidade do Leito de Teste.

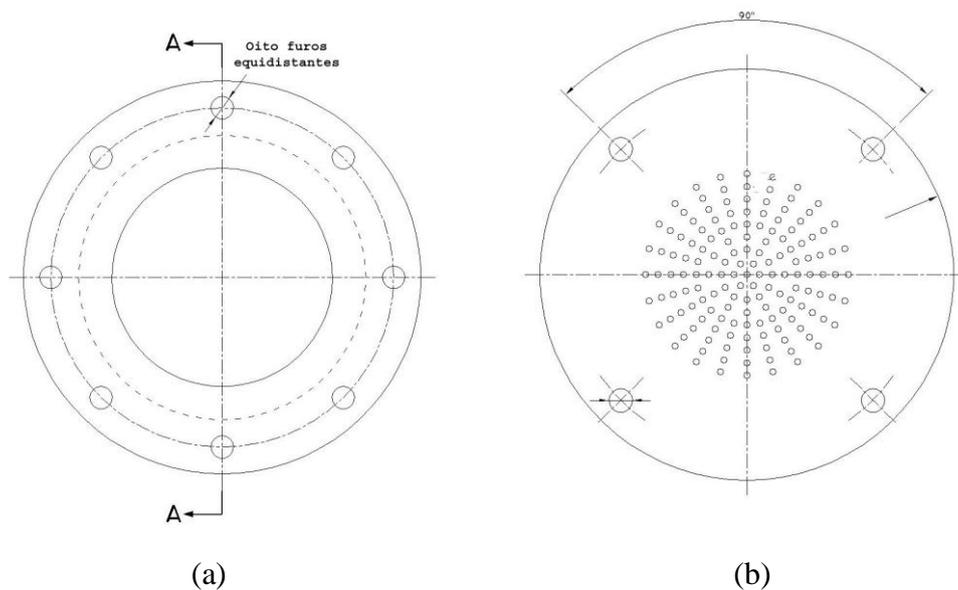


Figura III.6 – Gabaritos de furação: (a) área lateral AA e (b) base do cilindro reto.

O conjunto final consiste da união, em duplicata, da peça B, conforme mostra a figura III.5(a), com a peça C, vista na figura III.5(b). As funções do cilindro aos cones são feitas por oito pares de parafusos de aço inoxidável, porcas e arruelas simples com 7,144 mm de diâmetro. A figura III.7 mostra fotos da unidade confeccionada. Para conter o elemento filtrante uma tela de nylon com pequena trama foi adicionada a sua base.

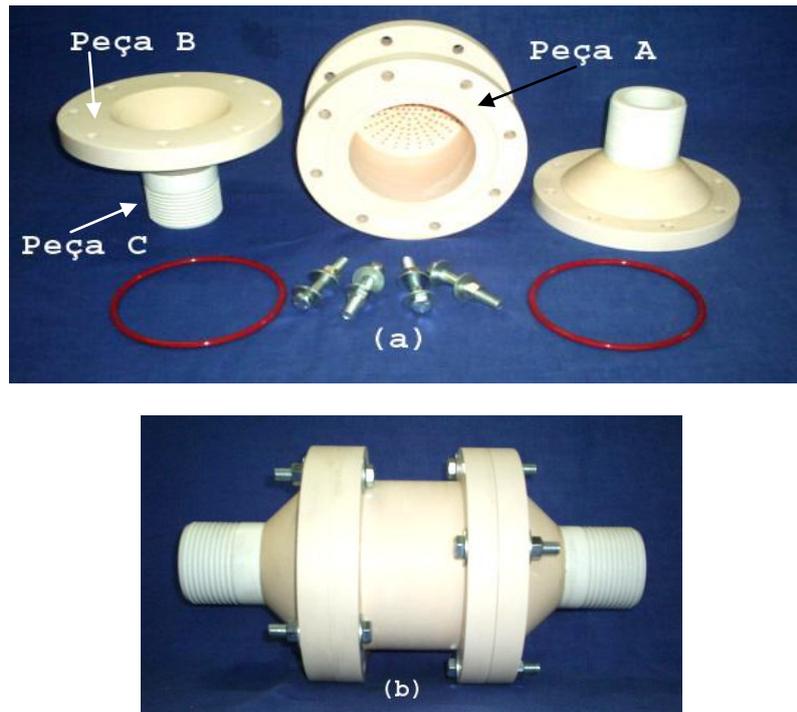


Figura III.7 – Fotos do Leito de Teste. (a) desmontado e (b) montado.

III.5 – Sistema exaustor de efluentes gasosos.

Para a realização dos experimentos, usou-se um exaustor centrífugo, nos moldes dos empregados em capelas de manipulação, existentes na maioria das clínicas de medicina nuclear. O exaustor centrífugo adequado aos testes, encontrado no mercado, foi o Mini Exaustor Centrífugo da marca Qualitas, modelo MCQ 200 M4.

Suas principais características são:

- motor de ¼ CV;
- potência de 190 w;
- tensão de operação de 110/220 V;
- rotação de 1.700 rpm;
- corrente de 1,50/0,80 A;
- vazão de 150 l/s;
- pressão de 25 mm H₂O;
- peso de 10 kg;

O exaustor foi fixado na bancada, por meio de uma base em madeira, conforme se observa na figura III.10.



Figura III.10 – Foto do exaustor com o redutor para mangueira de PVC.

III.6 – Sistema de injeção do radiotraçador no duto de PVC.

A unidade compacta para produção dos radiotraçadores gasosos possui uma conexão designada de “Injetor”, que se constitui de uma conexão dupla, para as mangueiras de PVC com 63,5 mm de diâmetro, e uma entrada no centro para um duto de nylon de 6,35 mm de diâmetro (onde flui o gás radioativo), conforme mostra a figura III.11.

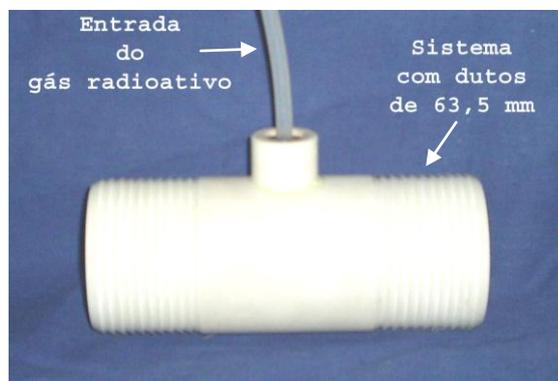


Figura III.11 – Sistema Injetor da Unidade Compacta de Produção de Radiotraçadores Gasosos.

III.7 – Tratamento dos substratos usados como adsorvedores/absorvedores.

Foram escolhidos dois tipos de substratos para se estudar a adsorção de moléculas de iodios radioativos, sendo eles: a sílica impregnada com prata e o carvão ativo. A escolha se deve ao baixo custo de material aliado à fácil aquisição em mercado nacional.

III.7.1 – Preparação da superfície de sílica para deposição da prata.

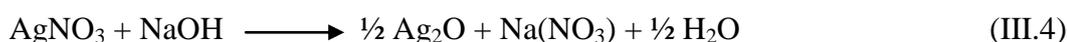
O oxido de silício (SiO_2), possui uma grande quantidade de poros ativos e, por isso, é muito utilizada em filtros industriais. A sílica é um material não inflamável, apresentando: alto ponto de fusão de $1650\text{ }^\circ\text{C}$; ponto de ebulição de $2230\text{ }^\circ\text{C}$; densidade de $2,634\text{ g/cm}^3$; e massa molar de $60,0843\text{ g/mol}$. Esse substrato apresenta-se como um cristal com forma e tamanhos indefinidos, por isso, para usá-los nos estudos de meios porosos, foi necessária uma seleção, empregando peneira com o tamanho da malha definida, que permite selecionar uma fração homogênea do cristal. Para os experimentos realizados, a sílica foi separada em frações de $0,85$ a 1 mm .

Para se atingir um bom grau de impregnação da prata (alto nível de adsorção da prata), foi necessário um prévio tratamento da sílica, realizado em oito etapas:

- 1) Lavagem dos cristais de sílica com água destilada, descartando a fração mais fina, que permaneceu no sobrenadante;
- 2) Lixiviação com ácido clorídrico (HCl [6M]), para se remover os metais;
- 3) Lavagem com água destilada até sua neutralização ($\text{pH} = 7$);
- 4) Lavagem com ácido nítrico (HNO_3 [6M]), para se remover os materiais orgânicos;
- 5) Lavagem com água destilada até sua neutralização ($\text{pH} = 7$);
- 6) Ataque químico com hidróxido de sódio (NaOH [$0,125\text{M}$]), por 30 minutos, para realizar uma decapagem química;
- 7) Lavagem com água destilada até sua neutralização ($\text{pH} = 7$);
- 8) Secagem em estufa, a $100\text{ }^\circ\text{C}$, por 2 horas.

Com a sílica limpa e pronta para a deposição de prata, o processo consistiu-se na redução dos íons de prata diretamente sobre a superfície dos cristais do óxido de silício. O reagente de Tollen's é um íon complexo de hidróxido prata e amônio, que permite uma rápida redução da prata ao se adicionar açúcares ou formaldeídos. A produção deste reagente se dá da seguinte forma:

- 1) Oxidação da prata, através da reação do nitrato de prata [1M] com o hidróxido de sódio [1M], segundo a reação a seguir.



- 2) Forma um precipitado de cor preta (prata oxidada). Segue-se a adição de hidróxido de amônio [30%], conforme indicado a seguir:



- 3) a solução deve ficar por 30 minutos em repouso, para liberar a quantidade de amônio em excesso.

Com o reagente de Tollen's (AgNH_3OH) preparado, adiciona-se açúcar ou formaldeído para que a prata se precipite e se deposite no substrato.

O procedimento adotado para deposição de prata na sílica envolveu cinco etapas:

- 1) separação de 30g de sílica ativada numa placa de Petri;
- 2) umidificação com 7,5 ml do reagente de Tollen's;
- 3) redução com formaldeído concentrado;
- 4) transferência do material para um becher e lavagem com água destilada até liberação de todo o sobrenadante;
- 5) secagem em estufa, a 100 °C, por 2 horas.

Para se avaliar o processo de deposição, o substrato foi submetido à agitação constante, por 4 horas, num recipiente com 50 ml de água destilada. A cada 30 minutos,

era retirado um volume de 10 ml, para constatar a presença de prata, sendo esse volume repostado com água destilada, para se manter constante o volume total. Constatou-se, então, que nenhuma quantidade visível de prata foi liberada do substrato. Além disso, amostras foram evaporadas em papel de filtro para uma posterior irradiação no reator Argonauta, durante 4 horas, para se determinar uma possível liberação da prata. Em todos os experimentos, não foram detectadas a liberação da prata, demonstrando que o emprego dessa metodologia garante a fixação da prata na sílica.

III.7.2 – Limpeza e ativação do carvão ativo.

O carvão ativo é um substrato orgânico que apresenta, como característica principal, a possibilidade de absorver moléculas. Por essa razão, é muito utilizado no processo de purificação de águas, absorção de gases. É utilizado em diversos ramos das indústrias química, alimentícia e farmacêutica, na medicina e em sistemas de filtragem, bem como, no tratamento de efluentes e gases tóxicos resultantes de processos industriais.

O carvão ativo é obtido, a partir da queima controlada de certas madeiras, com baixo teor de oxigênio, a uma temperatura de 450 °C a 900 °C, tomando-se o cuidado de evitar a ocorrência da queima total do material, de forma a se manter sua porosidade. Sua principal desvantagem é ser inflamável, sendo seu ponto de ignição de 150 °C. Outra desvantagem citada na literatura é que, após certo período, o substrato começa a liberar material absorvido, devido à saturação do grão.

Os grãos de carvão ativo também apresentam formas e tamanhos indefinidos, por isso, também foram peneirados (separação granulométrica), sendo usados para os testes aqueles de 1 a 2 mm.

Os procedimentos usados para limpeza e reativação do carvão ativo foram:

- 1) lavagem do carvão ativo com água destilada, descartando a fração mais fina, que permanece no sobrenadante;

- 2) manter, por 30 minutos, em solução de ácido clorídrico (HCl [1N]), e aquecimento até 60 °C, sob agitação;
- 3) lavagem com água destilada até sua neutralização (pH = 7);
- 4) filtragem a vácuo e secagem em estufa, a 80 °C, por 2 horas.

III.8 – Sistema experimental para estudos de meios porosos.

Um protótipo experimental foi montado, para simular as condições de uma clínica de medicina nuclear, no Laboratório de Radiotraçadores do IEN/CNEN, através de suportes, que apoiaram, tanto o exaustor centrífugo, quanto o Leito de Teste.

A produção do gás radioativo foi realizada na unidade compacta de produção dos radiotraçadores gasosos, dentro de uma capela com exaustão e a saída conectada ao “Injetor”. O pulso instantâneo de radiotraçador foi controlado manualmente por válvulas do tipo borboleta (abre/fecha), conforme mostra a figura III.12.

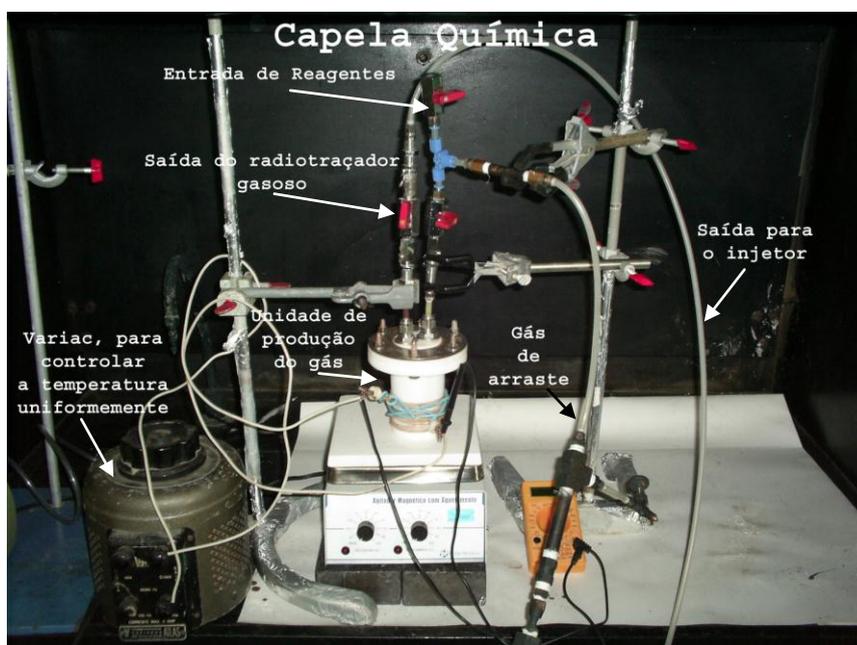


Figura III.12 – Sistema de produção dos radiotraçadores gasosos no interior da capela química.

O ar ambiente foi aspirado pelo duto de PVC de 36,5 mm de diâmetro, sob a ação do Exaustor Centrifugo, conduzindo-o até o “Leito de Teste” (posicionado na vertical). Após passar através do “Leito de Teste”, o ar segue pelo duto, até chegar ao exaustor centrífugo, que o libera para a capela química por um duto de PVC com 254 mm de diâmetro, posicionada ao lado, conforme se observa na figura III.13.

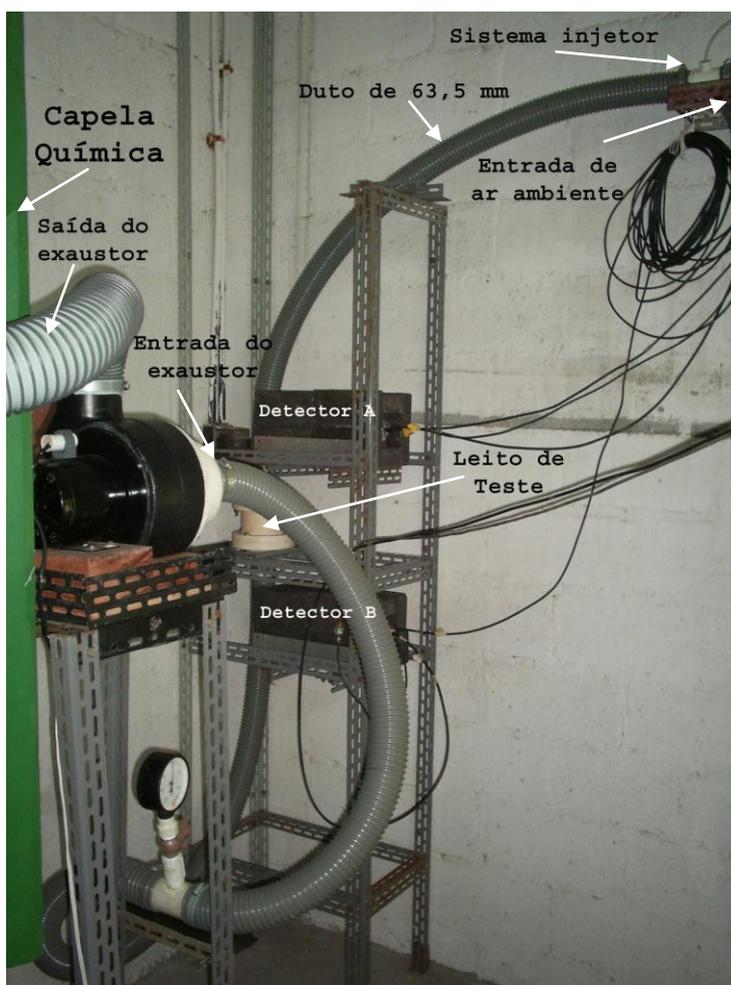


Figura III.13 – Protótipo experimental para a condução do ar ambiente.

III.9 – Posicionamento dos detectores e ângulo sólido.

Dois detectores cintiladores NaI (1"x1") (A e B) foram posicionados: um, na entrada do Leito de Teste, e o outro, na saída, sendo a distância entre esses detectores de 550 mm. O Injetor foi fixado a três metros do Leito de Teste e a cinquenta centímetros

da entrada de ar ambiente, figura III.13. Um terceiro detector (C) foi posicionado no centro do filtro, com o objetivo de se verificar uma possível retenção do iodo no filtro.

O ângulo sólido é um importante parâmetro a ser considerado na detecção de radiação nuclear, sendo formado pelo conjunto fonte radioativa/detector. O ângulo sólido depende da dimensão do cristal do detector, do tamanho da fonte radioativa e da distância entre a fonte e o detector. A variação em cada uma dessas grandezas provocará alterações na contagem registrada pelo detector.

Para ilustrar a concepção de fator geométrico, considere uma fonte puntiforme isotrópica a certa distância de um detector, como mostra a figura III.14 (RAMOS, 2006); onde: A_0 é a atividade da fonte radioativa; d a distância entre fonte/detector; Ω o ângulo sólido entre a fonte/detector e S é a área do detector.

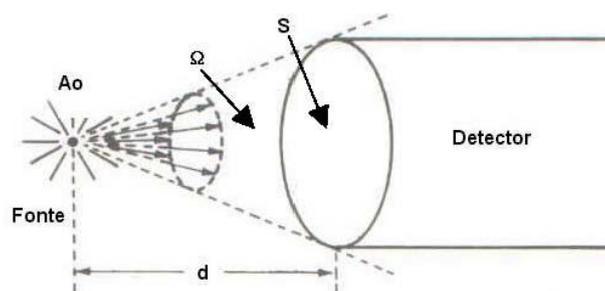


Figura III.14 – Dependência da taxa de contagem registrada pelo detector em relação a distância fonte/detector.

Sendo assim, os detectores podem ser posicionados com ou sem colimadores, aumentando ou diminuindo o ângulo sólido dos mesmos. Como o detector é um cilindro (1”x1”) e a fonte (tubo por onde o traçador radioativo passa) também é cilíndrica, o ângulo sólido será uma figura complexa de um trapézio com base irregular.

Quatro configurações foram usadas para o posicionamento e a colimação dos detectores A e B, na entrada e na saída do filtro. Na primeira configuração, os detectores estavam sem colimador e com os detectores junto ao tubo de PVC, figura III.15; na segunda configuração, os detectores encontravam-se sem colimador e distantes de 50 mm do tubo, figura III.16; na terceira configuração, os detectores encontravam-se

com colimadores de 50 mm de espessura de chumbo e 25 mm de abertura, figura III.17; e na quarta configuração, os detectores estavam com colimadores de igual espessura de chumbo, porém, com 5 mm de abertura, figura III.18.

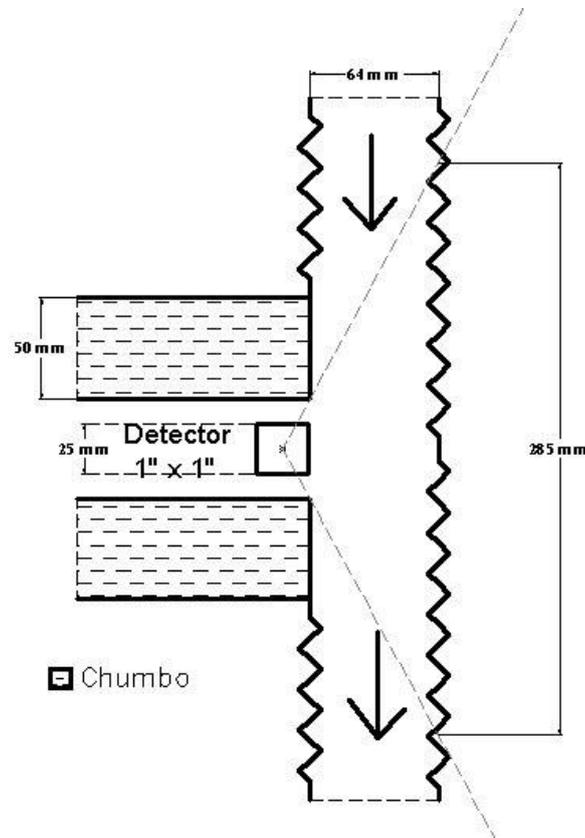


Figura III.15 – Primeira configuração: detectores sem colimadores e juntos à tubulação.

A abertura total do ângulo sólido formado pela primeira configuração é de 285 mm, formando um ângulo de 123° , conforme figura III.15. A segunda a abertura é de 100 mm, formando um ângulo de 43° , como mostra a figura III.16. A terceira a abertura é de 50 mm e o ângulo de 22° , figura III.17. A quarta a abertura é de 10 mm e o ângulo de 5° , como se observa na figura III.18. Quanto menor for a abertura de colimação, menor será o ângulo de abertura, ou seja, menor também será o ângulo sólido fonte/detector.

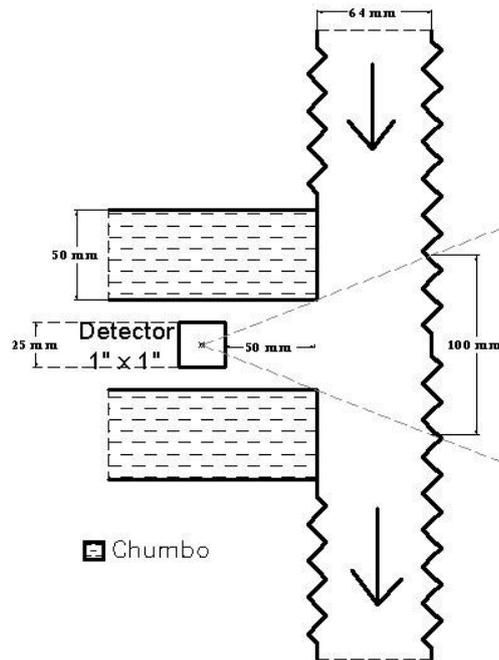


Figura III.16 – Segunda configuração: sem colimadores e detectores distante 50 mm do tubo.

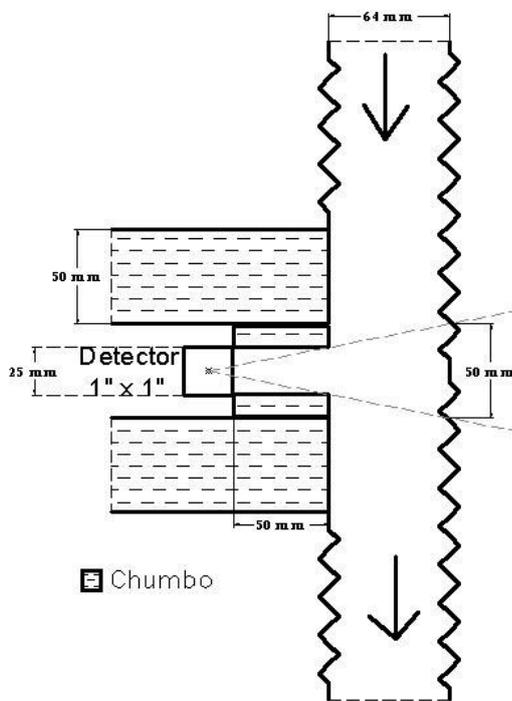


Figura III.17 – Terceira configuração: colimadores com 50 mm de espessura de chumbo e 25 mm de abertura.

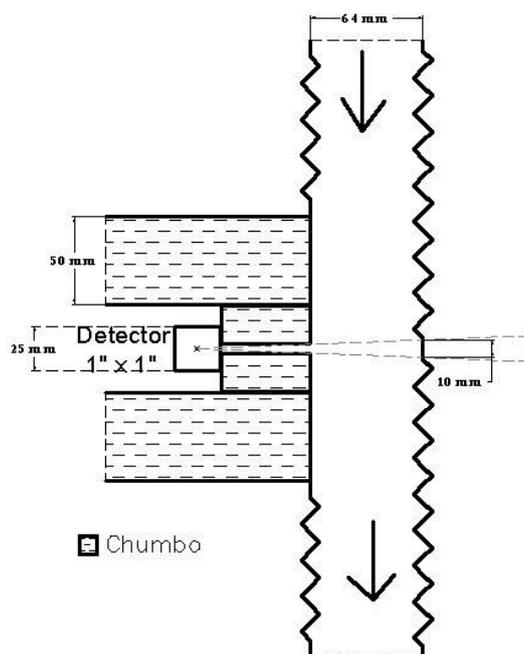


Figura III.18 – Quarta configuração: colimadores com 50 mm de espessura de chumbo e 5 mm de abertura.

Com relação ao terceiro detector, C, não houve mudança em sua posição, por conta de suas limitações físicas. A figura III.19 mostra sua posição e seu ângulo sólido, através de um corte vertical do sistema. A figura III.20 mostra o corte na direção horizontal do sistema.

A abertura do ângulo sólido é de aproximadamente 580 mm e um ângulo de 106° , como mostram as figuras III.19 e III.20, ou seja, o detector (C), devido à ausência de colimação e, também, ao maior ângulo sólido, resulta numa curva resposta mais intensa e mais prolongada (maior tempo médio de residência).

Observe que, caso um dos detectores (A ou B) estiverem mal colimados ou mal posicionados, os detectores poderão medir atividades vindas do filtro, o que é indesejável, para o uso da técnica de estímulo e resposta, por isso, o posicionamento em laboratório é feito com a ajuda de luz pontual (laser point).

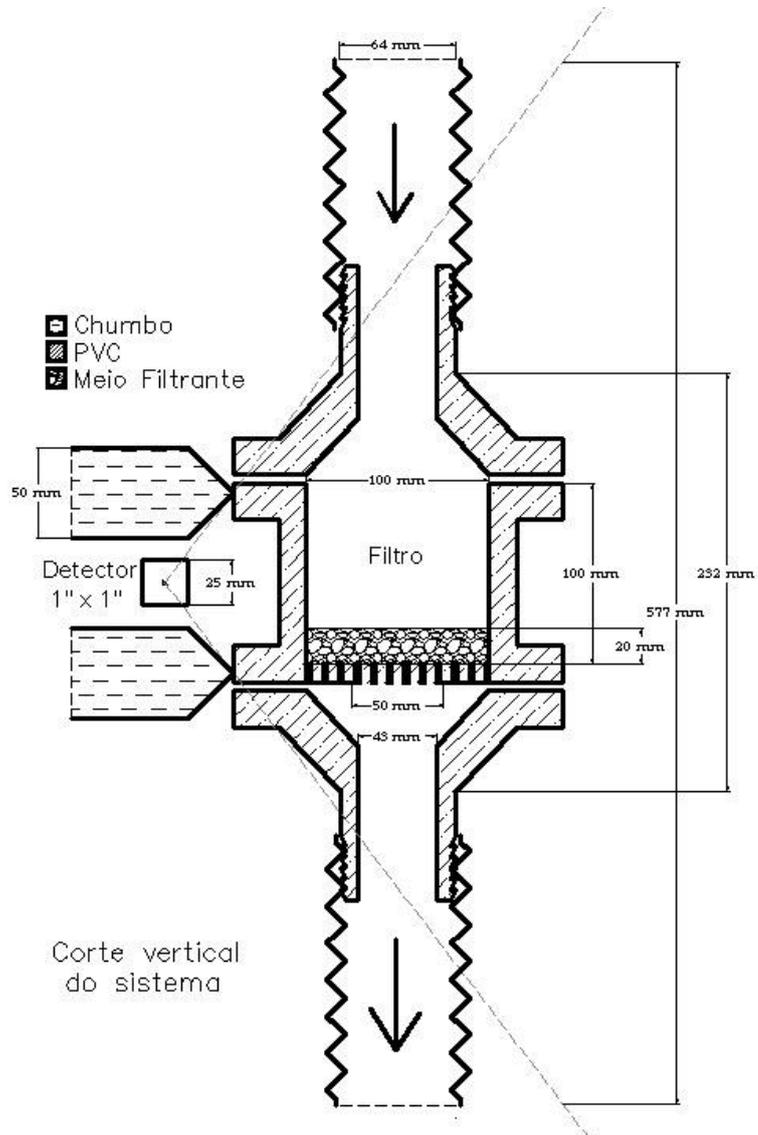


Figura III.19 – Ângulo sólido do sistema visto sob corte vertical.

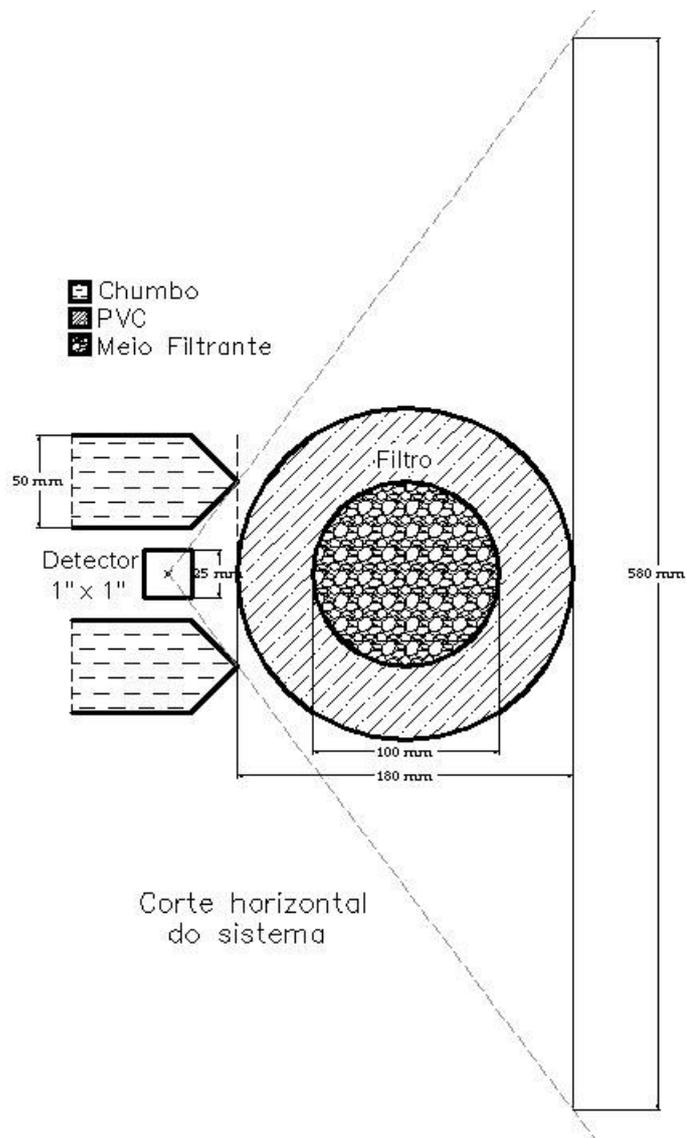


Figura III.20 – Ângulo sólido do sistema visto sob corte horizontal.

CAPÍTULO IV

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

IV.1 – Calibração do sistema de detecção.

A primeira etapa do trabalho foi estabelecer o ponto de operação dos detectores cintiladores NaI (Tl) (1”x1”), cujo valor, para cada um dos detectores, está listado na tabela IV.1, onde também é mostrado o valor da resolução energética para o fotopico de 662 keV do ¹³⁷Cs.

Tabela IV.1 – Ponto de operação e resolução energética dos detectores NaI (Tl).

DETECTORES	TENSÃO DE OPERAÇÃO (V)	RESOLUÇÃO ENERGÉTICA PARA O ¹³⁷ Cs (%)
A (Entrada do filtro)	810,00 ± 10	11
B (Saída do filtro)	810,00 ± 10	10
C (Centrado no filtro)	800,00 ± 10	13

Para aplicar a metodologia de momentos ponderados, que consiste na relação entre dois sinais, sendo o primeiro sinal o registro do detector na entrada do sistema e o segundo, o registro do detector na saída do sistema, foi necessário o conhecimento do valor da eficiência em energia dos detectores, ϵ . Sendo assim, a curva de eficiência calculada para cada detector está representada na figura IV.1 e os valores dos coeficientes para os ajustes destas curvas estão na tabela IV.2.

Tabela IV.2 - Valores ajustados para a função, $\ln(\epsilon) = A + B \cdot \ln(E) + C \cdot \ln(E)^2$, sendo E a energia em keV.

Detectores	Coeficientes para ajuste das curvas de eficiência			
	A	B	C	R ²
A	-9,936	4,748	-0,531	0,990
B	-10,309	4,890	-0,544	0,990
C	-10,642	4,992	-0,552	0,990

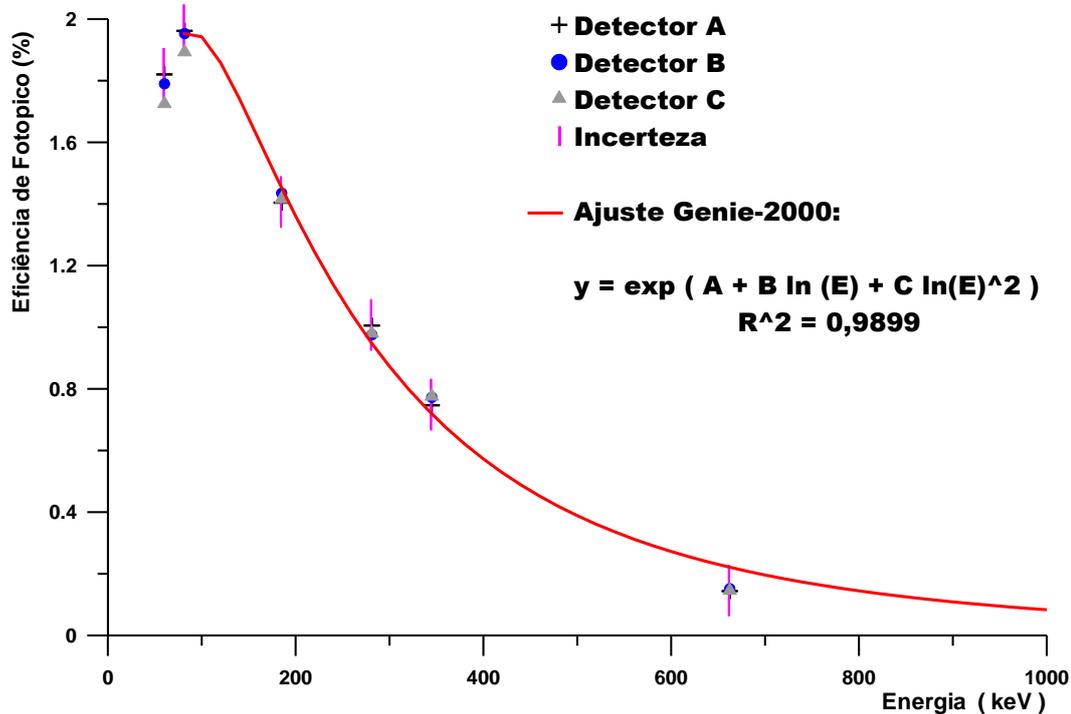


Figura IV.1 – Curva de eficiência de fotopico para os detectores A, B e C.

Pode-se observar, na tabela IV.1, tabela IV.2 e na figura IV.1, que os detectores empregados apresentam características semelhantes como a resolução e eficiência.

A confirmação é encontrada ao se aplicar a equação da eficiência com os coeficientes da tabela IV.2, para a energia do radioisótopo estudado neste trabalho, o ^{123}I , de energia principal 159,00 keV. Os resultados são mostrados na tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Eficiência para a energia principal do ^{123}I (Incerteza de 1%).

Energia (keV)	Eficiência (%)		
	Detector A	Detector B	Detector C
159,00	1,62	1,63	1,61

IV.2 – Caracterização do tipo de fluxo com o gás de $\text{CH}_3^{82}\text{Br}$.

Para analisar o comportamento do deslocamento do efluente gasoso no “Leito de Teste” dois modelos foram usados através da técnica de estímulo/resposta, empregando-se radiotraçadores e analisando-se qualitativamente as respostas pelas medidas das funções de distribuições do tempo médio de residência (DTR). As análises quantitativas foram obtidas das respostas experimentais das funções DTR, empregando-se o método de Momentos Ponderados e comparando-se com os modelos teóricos, que usam as equações de transferência de massa, o que permite o ajuste de parâmetros como o Tempo Médio de Residência (TMR) e número de Peclet (P_e) do escoamento.

Como nestes experimentos o objetivo era se caracterizar um fluxo conservativo, não foram usados cristais de sílica impregnados com prata [10%] (SiO_2+Ag) e, sim, uma sílica simplesmente tratada (SiO_2). O traçador escolhido foi o $\text{CH}_3^{82}\text{Br}$, o qual não reage com o meio, por ser um gás inerte.

Dez experimentos foram executados, sendo cinco referentes ao meio filtrante contendo 500 g de SiO_2 e cinco contendo 250 g da mesma sílica. O propósito foi mostrar a perda de carga, em função de um aumento da massa, simulando-se, assim, uma mudança no comportamento do filtro, permitindo analisar a possibilidade de um problema no meio poroso do tipo saturação ou entupimento. Todas as injeções foram instantâneas com atividade média, por injeção, da ordem de 370 kBq. A blindagem usada nos detectores para esses experimentos está representada na figura III.17, com o colimador de 25 mm.

IV.2.1 – Análises qualitativas através das funções de distribuições do tempo médio de residência (DTR).

Nas figuras IV.2 e IV.3, são mostradas as respostas temporal dos detectores A e B, sendo um posicionado na entrada do filtro e o outro, em sua saída, respectivamente. A figura IV.2.1 mostra as funções de DTR, na forma adimensional, para um dos experimentos contendo SiO_2 com massa de 250 g.

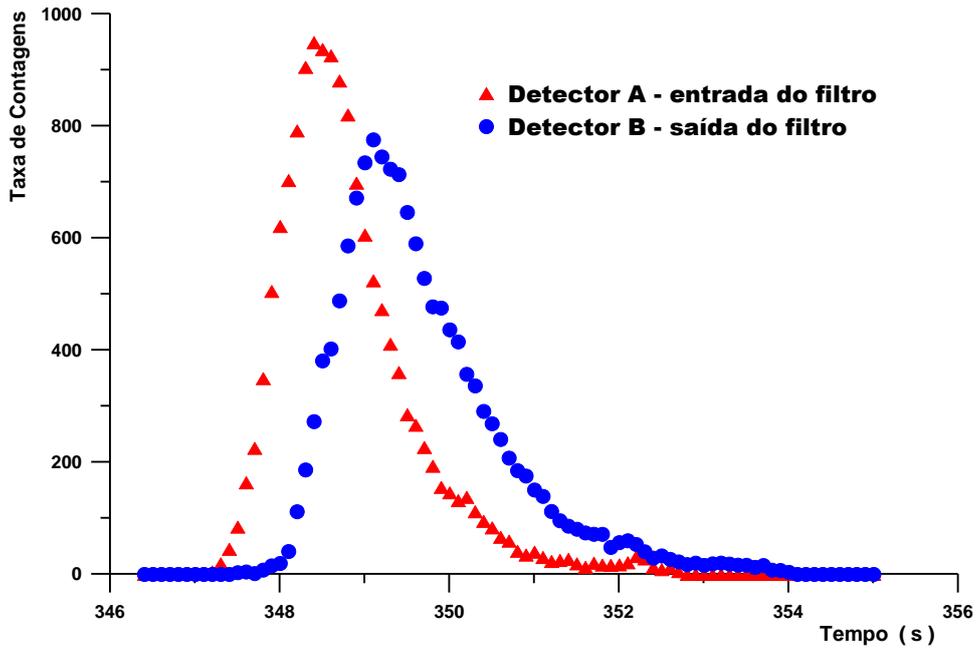


Figura IV.2 – Curvas de resposta dos detectores A e B para o filtro contendo 250 g de SiO_2 .

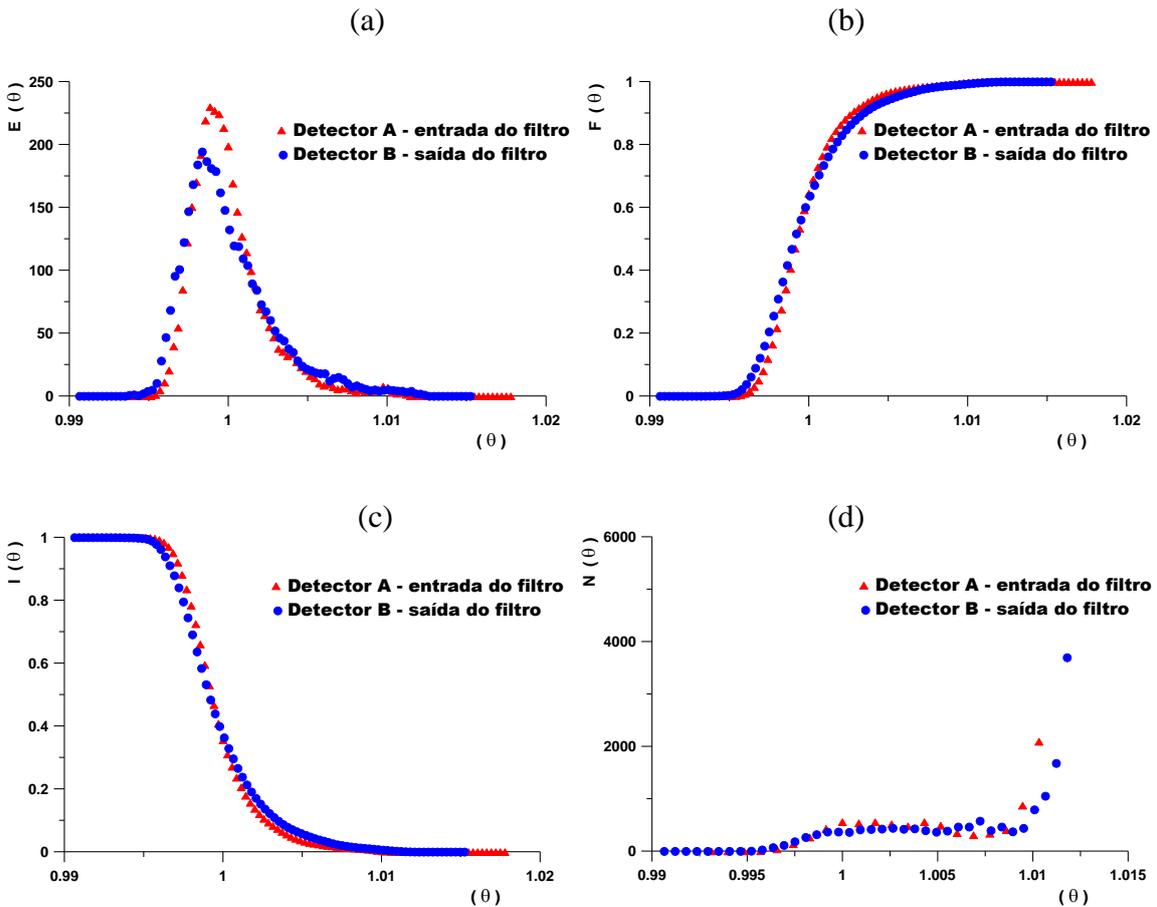


Figura IV.2.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 250 g de SiO_2 : (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

Através da equação II.40 e II.41, são calculados o tempo médio de residência e a variância, nas curvas representadas na figura IV.2, chegando ao TMR de $(0,87 \pm 0,01)$ s. Sendo 55 cm a distância entre os detectores, tem-se que a velocidade média superficial da nuvem do traçador que foi de (63 ± 1) cm/s.

Percebe-se que, devido a pequena quantidade de material filtrante, o traçador passa pelo filtro muito rapidamente, o que é confirmado nas figuras IV.2.1 (b) e (c), onde não ocorrem mudanças em seus perfis de fluxo, ao se relacionar a curva de entrada com a de saída. Todo o traçador que entra no filtro também sai, com as mesmas características, podendo o deslocamento do fluxo ser representado como modelo de fluxo pistão.

Já a figura IV.2.1 (d) mostra que o traçador apresentou um comportamento de fluxo pistão entre teta 0,995 e 1,0. Devido à função ser crescente nesse instante, a partir do teta médio, o perfil do fluxo mostra um comportamento de mistura, com a formação de um patamar, entre teta 1,0 e teta 1,01, que é característicos de meios porosos, revelando ser um fluxo com pequena dispersão, gerada pela pequena mistura no interior do elemento filtrante.

A figura IV.3.1 mostra as funções de distribuição do tempo médio de residência resultantes, na forma adimensional, para um dos experimentos contendo SiO_2 com massa de 500 g.

Pelo mesmo procedimento, são calculados o tempo médio de residência e a variância, nas curvas representadas pela figura IV.3, chegando ao TMR de $(1,86 \pm 0,01)$ s. Como os detectores continuam distantes de 55 cm, a velocidade média superficial da nuvem do traçador foi de (30 ± 1) cm/s, ou seja, ao se aumentar a quantidade de material filtrante, o traçador passou mais lentamente pelo filtro, o que é confirmado pela diferença entre as velocidades médias superficiais.

Da mesma forma que o experimento anterior, o traçador interage com o filtro, através de um modelo de fluxo tipo pistão, o que é confirmado nas figuras IV.3.1 (b) e IV.3.1(c), porém, nota-se uma pequena mudança nas curvas de saída, após o teta médio.

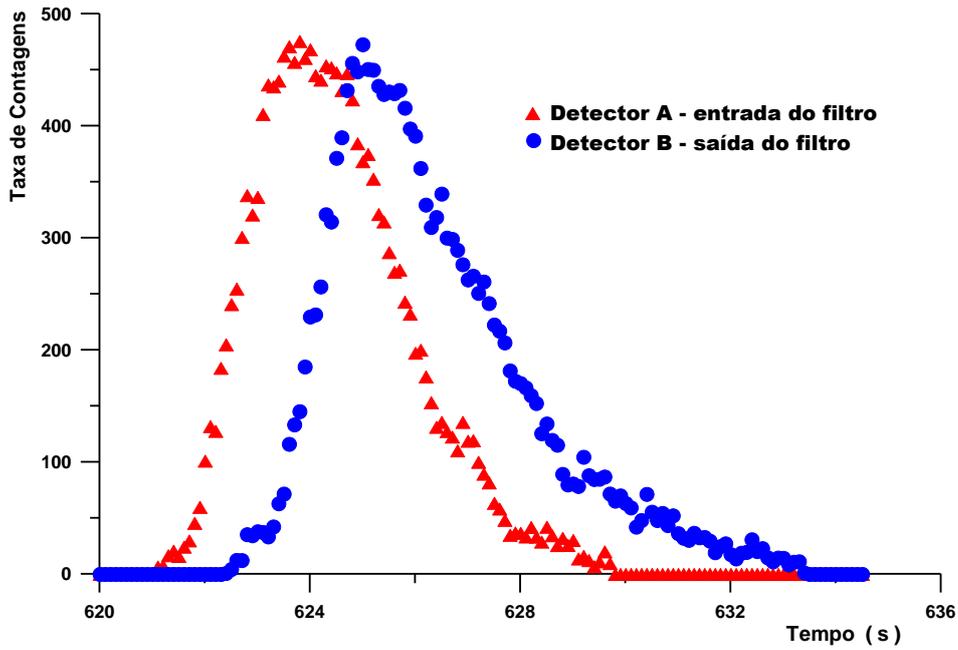


Figura IV.3 – Curvas de resposta dos detectores A e B para o filtro contendo 500 g de SiO_2 .

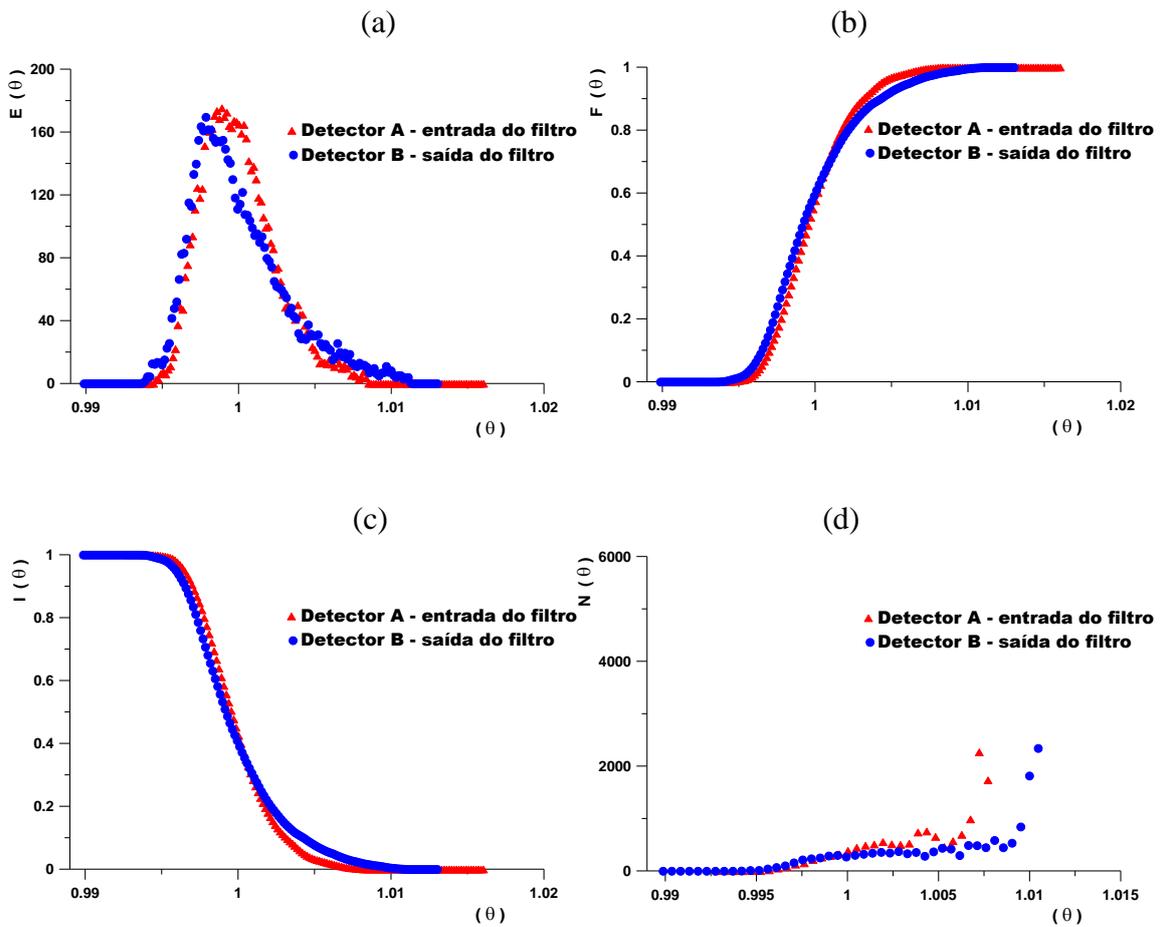


Figura IV.3.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 500 g de SiO_2 : (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

As mudanças nas curvas de saída registradas pelo detector B indicam um processo de dispersão do traçador no meio, ou seja, todo o traçador que entrou no filtro também saiu, porém, com uma maior dispersão, que é um processo característico de meios filtrantes. Esse fato é comprovado, ao se analisar as curvas $N(\theta)$, figura IV.3.1 (d), onde o sinal do detector B apresenta um patamar, que representa um processo de mistura, muito mais extenso que o patamar registrado pelo detector A, na entrada do filtro. No experimento anterior, onde se usou 250 g de SiO_2 , as curvas $N(\theta)$, figura IV.2.1 (d), tendiam ao infinito, crescendo quase que ao mesmo tempo. Sendo assim, esse filtro pode ser representado por um escoamento com fluxo que apresenta pequena dispersão ou uma dispersão axial (escoamento tubular).

IV.2.2 – Análises quantitativas através do método de ajustes das funções de transferências e momentos ponderados.

Partindo das análises qualitativas apresentadas no item anterior, foram calculados alguns modelos que poderiam representar o perfil de fluxo do filtro projetado. Selecionaram-se cinco diferentes tipos de modelos, para as análises quantitativas que relacionam as funções DTR no espaço de Laplace com a metodologia dos momentos ponderados. Os modelos selecionados foram:

- fluxo pistão;
- Misturador perfeito;
- “N” misturadores idênticos e em série;
- fluxo com dispersão axial
- fluxo pistão em paralelo com o modelo de fluxo com dispersão axial;
- “N” misturadores simples em paralelo com o modelo de “M” misturadores simples, ambos, misturadores sendo idênticos.

As relações entre os momentos ponderados já foram calculadas e estão representadas na tabela II.3.

Considerando-se a possibilidade de ocorrer algum efeito de parede no filtro, o que mudaria seu comportamento, foram empregados os seguintes modelos de sistemas em paralelo:

- modelo de fluxo pistão em paralelo com o modelo de fluxo com dispersão axial;
- modelo de “N” misturadores simples em paralelo com o modelo de “M” misturadores simples, sendo ambos, misturadores idênticos.

Para esses dois tipos de modelos, os ajustes das funções teóricas divergiram dos dados experimentais, não dando resultados consistentes para os parâmetros (TMR, P_c , N e M), o que permite afirmar que nenhum desses efeitos ocorreram no filtro projetado, nem para uma grande, nem para uma pequena quantidade de meio filtrante.

Na figura IV.4, encontram-se dispostas as curvas ajustadas, pelo método de mínimos quadrados, ao se usar 250 g de SiO_2 no primeiro experimento. Nota-se que o modelo de fluxo pistão e o modelo de misturador perfeito não se aplicam ao perfil de fluxo neste filtro, pois se distanciaram muito dos valores experimentais.

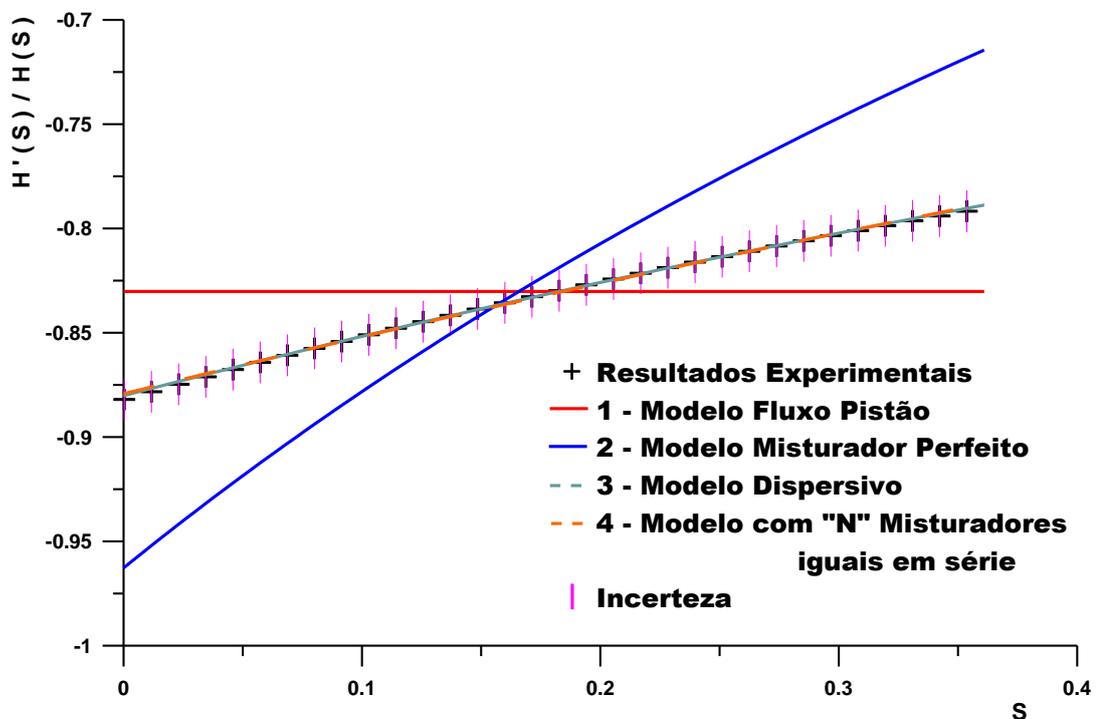


Figura IV.4 – Curvas ajustadas pela relação de momentos ponderados do primeiro experimento, ao se empregar meio filtrante com 250 g de SiO_2 .

Na tabela IV.4, encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, para cada experimento, a partir do ajuste de parâmetros para o modelo de fluxo pistão, descritos no item II.3.4.3, com 250 g de SiO₂ de massa total. Para todos os valores experimentais, nas tabelas adiante, as incertezas das médias foram representadas, considerando-se a distribuição t-student de 2σ. Nota-se, na tabela IV.4, que o erro percentual do TMR é de 6% o que indica a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos.

Tabela IV.4 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo pistão, para um filtro contendo 250 g de SiO₂.

Fluxo Pistão			
Experimento	TMR (s) (10⁻¹)	Erro do ajuste (10⁻⁶)	χ² do ajuste (10⁻³)
1	8,30	7,65	7,65
2	8,79	3,02	8,63
3	8,32	3,63	8,23
4	8,45	4,63	7,25
5	8,82	8,47	8,31
Média	(8,54 ± 0,52) 10 ⁻¹		

Ao se comparar a grande dispersão gerada pela curva ajustada, entre os valores experimentais e o modelo teórico de fluxo pistão, representadas na figura IV.4, com os valores do χ², que são da ordem de 10⁻³, concluiu-se que valores de χ² dessa ordem não representaram o perfil de escoamento desse sistema. Assim, para o filtro com massa de 250 g de SiO₂, o perfil de escoamento não segue o modelo de fluxo pistão.

Na tabela IV.5, encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, para cada experimento, a partir do ajuste de parâmetros para o modelo de misturador perfeito, descritos no item II.3.4.1, para o filtro contendo 250 g de SiO₂. Percebe-se que o erro percentual do TMR foi de 11%, o que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos.

Tabela IV.5 – Parâmetros ajustados para o modelo de misturador perfeito, para um filtro contendo 250 g de SiO₂.

Misturador Perfeito			
Experimento	TMR (s) (10⁻¹)	Erro do ajuste (10⁻⁵)	χ² do ajuste (10⁻²)
1	9,63	4,08	2,27
2	8,91	2,83	1,74
3	10,10	2,36	1,83
4	9,67	3,99	2,33
5	10,30	5,17	2,87
Média	(9,72 ± 1,09) 10⁻¹		

Comparando-se a dispersão gerada pela curva ajustada, entre os valores experimentais e o modelo teórico de misturador perfeito, mostradas na figura IV.4, com os valores do χ^2 , que foram da ordem de 10^{-2} , concluiu-se que valores de χ^2 dessa ordem, não representaram o perfil de escoamento deste sistema. Observa-se ainda que este valor do χ^2 foi ainda maior do que os valores do χ^2 calculados para o modelo de fluxo pistão, indicando que os valores experimentais deste modelo estão mais distantes da curva teórica ajustada. Sendo assim, para o filtro com massa de 250 g de SiO₂, o perfil de escoamento também demonstrou não ter características de um modelo de misturador perfeito.

Na tabela IV.6, encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, e do número de Peclet, P_e , a partir dos parâmetros ajustados pelo modelo de dispersão axial, descritos no item II.3.4.4 para um filtro com massa total de 250 g de SiO₂.

Nota-se, na tabela IV.6, que o erro percentual do TMR foi de 10%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Já, para P_e , o erro percentual foi de 22%, o que indicou uma pequena dispersão entre os experimentos, porém, ainda reprodutivos, dentro desse erro. Esse fato pode ser explicado pela característica randômica dos gases. Outro fato é devido à quantidade de parâmetros ajustados, ou seja, quanto mais parâmetros (TMR e P_e) a serem ajustados, mais complexo é o ajuste, maior será a dispersão entre as medidas.

Tabela IV.6 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo com dispersão axial, para um filtro contendo 250 g de SiO₂.

Fluxo dispersivo					
Experimento	TMR (s) (10⁻¹)	Erro do ajuste (10⁻⁸)	P_e	Erro do ajuste (10⁻⁴)	χ² do ajuste (10⁻⁷)
1	8,80	2,12	5,18	1,80	4,53
2	8,19	5,66	6,59	0,20	1,28
3	9,05	2,92	6,44	5,91	10,70
4	8,83	8,41	6,26	1,75	1,87
5	9,35	6,18	5,41	5,18	13,20
Média	(8,84 ± 0,88) 10⁻¹		(5,98 ± 1,31)		

Comparando-se a dispersão, que é desprezível na curva ajustada entre os valores experimentais e o modelo teórico de fluxo dispersivo, representadas na figura IV.4, com os valores do χ^2 , que foram da ordem de 10^{-7} , concluiu-se que valores de χ^2 dessa ordem, representaram perfeitamente o perfil de escoamento deste sistema. Assim, para um filtro com massa de 250 g de SiO₂, o perfil de escoamento assemelhou-se ao do modelo de fluxo dispersivo.

Na tabela IV.7, encontram-se os valores do tempo médio de residência, por misturador, TMR_m, para cada experimento, o número possível de misturadores em série, N, e o tempo médio de residência total do sistema, TMR_t, que são determinados, a partir do modelo de N misturadores idênticos em série, descritos no item II.3.4.2, para um filtro de SiO₂ com massa total 250 g. Percebe-se que o erro percentual do TMR_t foi de 10%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Já, para N, o erro percentual foi de 18%, indicando uma pequena dispersão entre os experimentos, porém, ainda reprodutivos, dentro deste erro. Nesses ajustes, os valores do χ^2 foram da ordem de 10^{-6} . Ao se comparar com os ajustes na figura IV.4, concluiu-se que o modelo de N misturadores perfeitos e em série, poderiam representar o perfil de escoamento deste sistema. Sendo assim, para o filtro com massa de 250 g de SiO₂, o perfil de escoamento seguiu o modelo de N misturadores perfeitos e em série, representados por três misturadores em série.

Tabela IV.7 – Parâmetros ajustados para o modelo de N misturadores perfeitos em série, para um filtro contendo 250 g de SiO₂.

"N" Misturadores idênticos em série						
Experimento	TMR _m (s) (10 ⁻¹)	Erro do ajuste (10 ⁻³)	N	Erro do ajuste (10 ⁻²)	TMR _t (s) (10 ⁻¹)	χ ² do ajuste (10 ⁻⁶)
1	3,20	1,33	2,75	1,08	8,79	1,18
2	2,39	0,41	3,42	0,56	8,18	8,03
3	2,91	3,35	3,11	0,37	9,04	7,63
4	2,69	2,11	3,28	2,46	8,82	2,60
5	3,25	1,87	2,87	1,56	9,33	2,50
Média	(2,89 ± 0,74) 10 ⁻¹		(3,08 ± 0,57)		(8,83 ± 0,87) 10 ⁻¹	

Na figura IV.5, encontram-se dispostas as curvas ajustadas pelo método de mínimos quadrados, ao se usar um filtro contendo 500 g de SiO₂, para o primeiro experimento. Da mesma maneira que os experimentos com massa de 250 g o modelo de fluxo pistão e o modelo de misturador perfeito não se aplicou ao perfil de fluxo neste filtro, conforme mostra a figura IV.5.

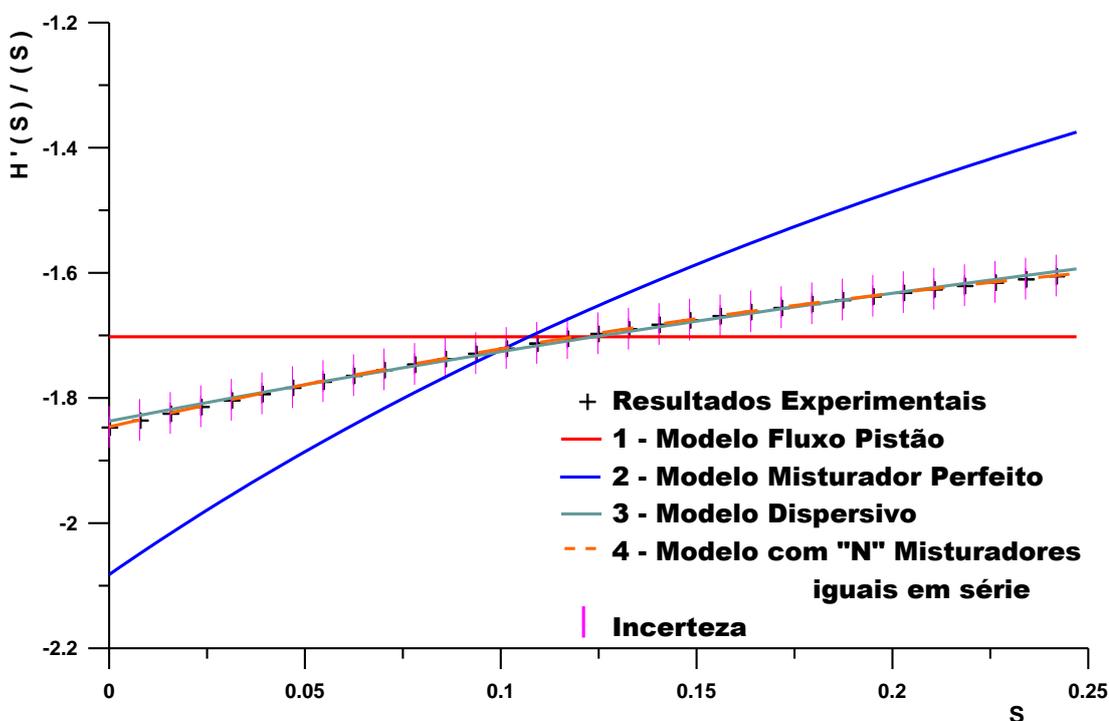


Figura IV.5 – Curvas ajustadas pela relação de momentos ponderados do primeiro experimento, empregando meio filtrante com 500 g de SiO₂.

Na tabela IV.8, encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, para cada experimento, a partir do ajuste de parâmetros para o modelo de fluxo pistão, descritos no item II.3.4.3, para um filtro com 500 g de SiO₂.

Tabela IV.8 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo pistão, para um filtro contendo 500 g de SiO₂.

Fluxo Pistão			
Experimento	TMR (s)	Erro do ajuste (10⁻⁵)	χ² do ajuste (10⁻³)
1	1,70	5,39	5,39
2	1,67	3,02	4,02
3	1,64	4,79	4,79
4	1,84	6,22	6,22
5	1,81	5,51	5,51
Média	(1,73 ± 0,18)		

Nota-se, na tabela IV.8, que o erro percentual do TMR foi de 10%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Os valores dos χ² para este modelo resultaram ser da ordem de 10⁻³, indicando a existência de uma grande dispersão entre os valores experimentais e a curva ajustada, segundo a figura IV.5; sendo assim, este perfil de escoamento não representou o modelo de fluxo pistão.

Tabela IV.9 – Parâmetros ajustados para o modelo de misturador perfeito, para um filtro contendo 500 g de SiO₂.

Misturador Perfeito			
Experimento	TMR (s)	Erro do ajuste (10⁻⁴)	χ² do ajuste (10⁻²)
1	2,08	4,42	2,00
2	2,01	3,80	1,87
3	1,94	2,02	1,02
4	2,25	5,03	2,33
5	2,17	7,87	3,45
Média	(2,09 ± 0,25)		

Na tabela IV.9 encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, para cada experimento, determinados, a partir do ajuste de parâmetros, para o modelo de misturador perfeito, descritos no item II.3.4.1, para um filtro com 500 g de SiO₂.

Percebe-se, na tabela IV.9, que o erro percentual do TMR foi de 12%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Os valores de χ^2 resultaram ser da ordem de 10^{-2} , indicando que o perfil de escoamento também não seguiu o modelo de misturador perfeito.

Na tabela IV.10, encontram-se os valores do tempo médio de residência, TMR, e do número de Peclet, P_e , que foram determinados, a partir do ajuste de parâmetros pelo modelo de dispersão axial, descritos no item II.3.4.4, para um filtro de massa total 500 g de SiO₂.

Tabela IV.10 – Parâmetros ajustados para o modelo de fluxo com dispersão axial, para SiO₂ contendo 500 g.

Fluxo dispersivo					
Experimento	TMR (s)	Erro do ajuste (10⁻⁷)	P_e	Erro do ajuste (10⁻³)	χ^2 do ajuste (10⁻⁵)
1	1,84	9,11	5,52	1,23	1,85
2	1,77	6,85	6,69	2,42	1,47
3	1,87	9,89	5,59	3,12	0,14
4	1,98	12,10	5,53	1,42	2,47
5	1,95	22,50	6,39	1,68	0,12
Média	(1,88 ± 0,17)		(5,95 ± 1,14)		

Nota-se, na tabela IV.10, que o erro percentual do TMR foi de 9%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Já para o P_e , o erro percentual foi de 19%, indicando uma pequena dispersão entre os experimentos, porém, ainda reprodutivos dentro desse erro. Os valores de χ^2 resultaram ser da ordem de 10^{-5} , indicando que o perfil de escoamento seguiu o modelo de fluxo dispersivo.

Na tabela IV.11, encontram-se os valores do tempo médio de residência, por misturador, TMR_m , para cada experimento, do número possível de misturadores em série, N, e o tempo médio de residência total do sistema, TMR_t , que foram determinados, a partir do modelo de N misturadores idênticos em série, descritos no item II.3.4.2, para um filtro com 500 g de SiO_2 .

Tabela IV.11 – Parâmetros ajustados para o modelo de N misturadores perfeitos em série, para um filtro contendo 500 g de SiO_2 .

"N" Misturadores idênticos em série						
Experimento	TMR_m (s) (10^{-1})	Erro do ajuste (10^{-3})	N	Erro do ajuste (10^{-2})	TMR_t (s)	χ^2 do ajuste (10^{-5})
1	6,16	5,16	2,98	2,33	1,83	3,27
2	5,99	4,46	2,97	3,00	1,78	2,15
3	6,70	2,91	2,79	1,00	1,87	0,78
4	6,63	5,86	2,99	2,46	1,98	4,20
5	5,92	1,33	3,30	3,79	1,95	0,26
Média	$(6,28 \pm 0,75) 10^{-1}$		$(3,00 \pm 0,38)$		$(1,88 \pm 0,17)$	

Percebe-se, na tabela IV.11, que o erro percentual do TMR_t foi de 9%, que indicou a existência de valores reprodutivos, ou seja, baixa dispersão entre os experimentos. Já, para N, o erro percentual foi de 13%, indicando uma pequena dispersão entre os experimentos, porém, ainda reprodutivos dentro desse erro. Os valores do χ^2 resultaram ser da ordem de 10^{-5} , concluindo-se que o modelo de N misturadores perfeitos e em série, poderiam representar o perfil de escoamento deste filtro. Sendo assim, para o filtro com massa de 500 g de SiO_2 , o perfil de escoamento seguia o modelo de N misturadores perfeito e em série, podendo ser representados por três misturadores em série.

Os experimentos acima mostraram que valores menores de χ^2 da ordem de 10^{-5} , ajustaram os valores experimentais com os valores das curvas teóricas com boa precisão, fato esse que foi confirmado pelos ajustes representados nas figuras IV.4 e IV.5.

Da análise dos resultados, pode-se concluir que o escoamento neste filtro poderia ser representado pelo modelo de fluxo com dispersão axial, cujo número de Peclet seria de $(5,98 \pm 1,31)$, para o filtro com 250 g de SiO_2 , e de $(5,95 \pm 1,14)$, para o filtro com 500 g de SiO_2 . O número de Peclet caracteriza o tipo de fluxo. Como se encontraram números de Peclet entre 1 e 100 nos experimentos realizados, esse fluxo foi considerado um escoamento não-ideal, devido à mistura gerada no interior do elemento filtrante, que é característico de colunas empacotadas. Também poderia ser representado por um modelo de fluxo de N misturadores em série, cujo número de misturadores foi de $(3,08 \pm 0,57)$, para o filtro contendo 250 g de SiO_2 , e de $(3,00 \pm 0,38)$, para o filtro contendo 500 g de SiO_2 .

IV.3 – Instalação de um disco rígido na saída do filtro para aumentar o tempo de permanência do fluido em seu interior.

Como visto nos experimentos anteriores, o tempo de passagem do traçador pelo filtro é muito rápido, principalmente, quando se utiliza pouca quantidade de elemento filtrante; por isso, baseado na teoria da zona de retenção, item II.3.3.3 e figura II.15, foi instalado um disco para atrasar a saída de fluido pelo filtro, gerando assim uma zona de retenção interna no filtro. Para isso, foi produzido um disco rígido que reduziu bruscamente a saída do traçador, passando o diâmetro de abertura de 100 mm para 50 mm na base interna do filtro, conforme pode ser observado na figura III.19.

Para este experimento foi usada uma massa de 400 g de cristais de sílica, já impregnados com prata [10%] ($\text{SiO}_2 + \text{Ag}$), que ocupavam um volume de 275 cm^3 . Dois experimentos foram realizados, sendo um sem restrição e o outro com uma restrição (disco rígido) na saída do filtro.

A blindagem dos detectores A e B, usadas neste experimento, está representada na figura III.17, com um colimador de 25 mm. Como traçador, também foi usado o $\text{CH}_3^{82}\text{Br}$, por ser um gás inerte, com atividade média por injeção de 370 kBq.

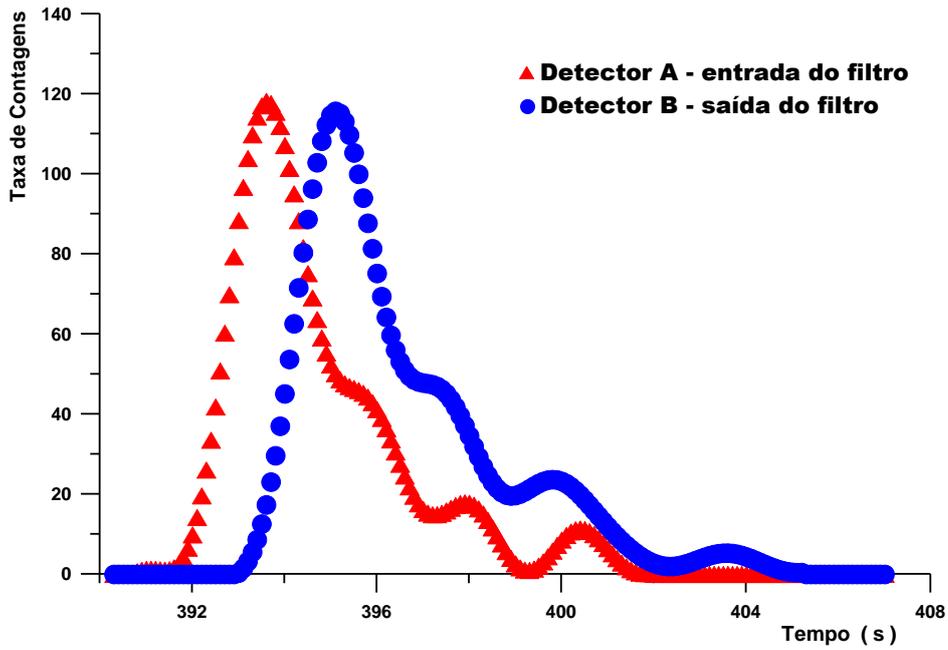


Figura IV.6 – Curvas de resposta dos detectores A e B, na entrada e saída do filtro, respectivamente, para o experimento sem a restrição na base do filtro.

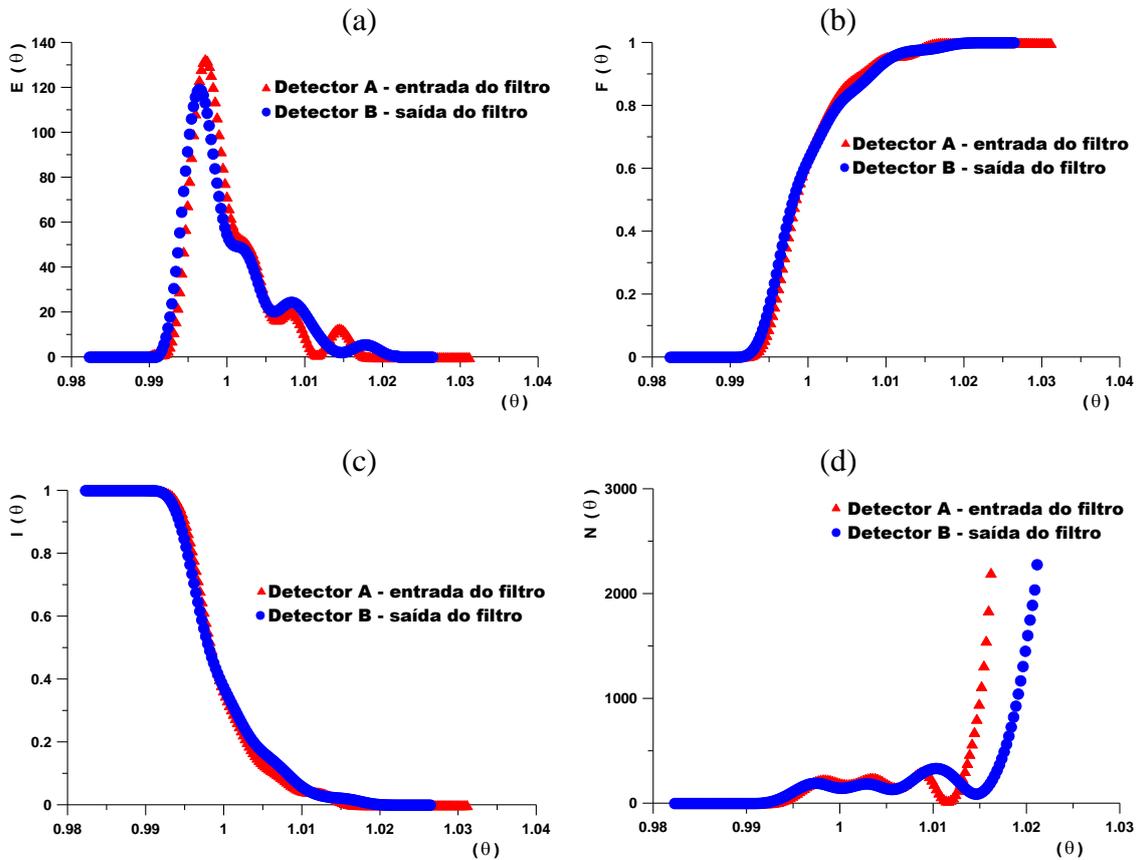


Figura IV.6.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, sem restrição: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

A figura IV.6 mostra a resposta dos detectores A e B, respectivamente, na entrada e saída do sistema, para o experimento sem restrição, e, na figura IV.6.1, suas respectivas funções de DTR.

Através das equações II.40 e II.41, calcula-se o tempo médio de residência e sua variância, das curvas representadas pela figura IV.6, chegando-se ao TMR de $(1,64 \pm 0,01)$ s. Sendo a distância entre os detectores de 55 cm, a velocidade média superficial do traçador deste experimento foi de (33 ± 1) cm/s.

Nota-se que o traçador passa pelo filtro muito rapidamente, o que é confirmado, observando-se as figuras IV.6.1 (b) e (c), onde, naquelas curvas não ocorreram mudanças em seus perfis de fluxo, ao se relacionar a curva de entrada com a de saída. Todo o traçador que entra no filtro também sai, com as mesmas características, podendo o deslocamento do fluxo ser representado como modelo de fluxo pistão ou um fluxo com pequena dispersão devido à pequena mudança na curva de saída após o teta médio. Observa-se na figura IV.6, que o traçador entra e sai com as mesmas características, sendo que o pulso de entrada é um pulso imperfeito. Para confirmar esta afirmação também foi feita a deconvolução dessas curvas em uma sucessão de pulsos perfeitos, cujos resultados encontram-se mostrados nas figuras IV.7 e IV.8, para os detectores A e B, respectivamente.

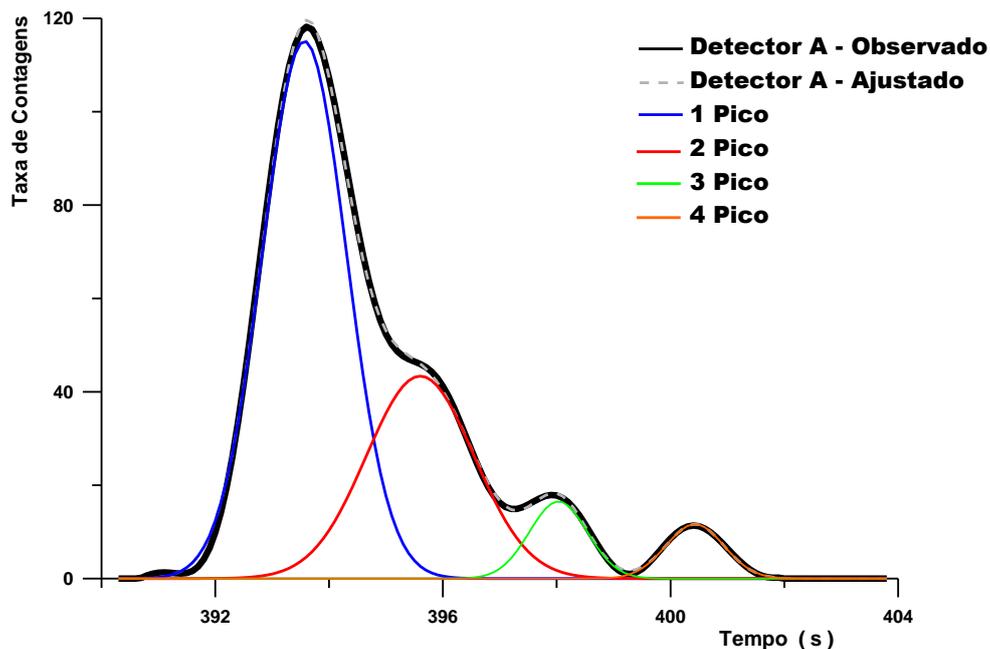


Figura IV.7 – Deconvolução da resposta do detector A, posicionado na entrada do filtro.

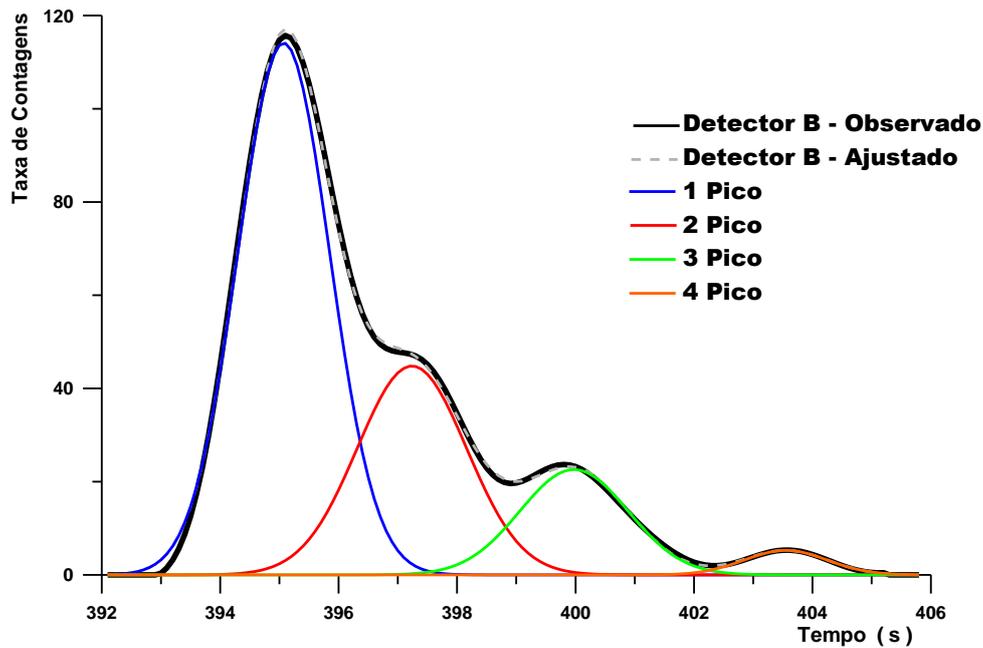


Figura IV.8 – Deconvolução da resposta do detector B, posicionado na saída do filtro.

Nas figuras IV.7 e IV.8, confirma-se que o pulso de entrada do traçador é um pulso imperfeito e que pode ser representado como uma série de pulsos sequenciais. Assim, para cada pulso registrado na entrada do filtro pelo detector A, um pulso também será registrado na saída do filtro pelo detector B.

A curva $N(\theta)$ da figura IV.6.1 (d), indica uma característica de processo de recirculação, com uma sucessão de picos, tanto na entrada, como na saída, porém, essa hipótese deve ser desconsiderada, pois foi provado, através das figuras IV.7 e IV.8, que o pulso de entrada é um pulso imperfeito e este pulso imperfeito se repete, na saída do filtro.

A figura IV.9 mostra a resposta dos detectores A e B, usando-se como restrição a abertura de saída apenas 50 mm em sua base. Na figura IV.9.1, encontram-se as respostas das funções do DTR.

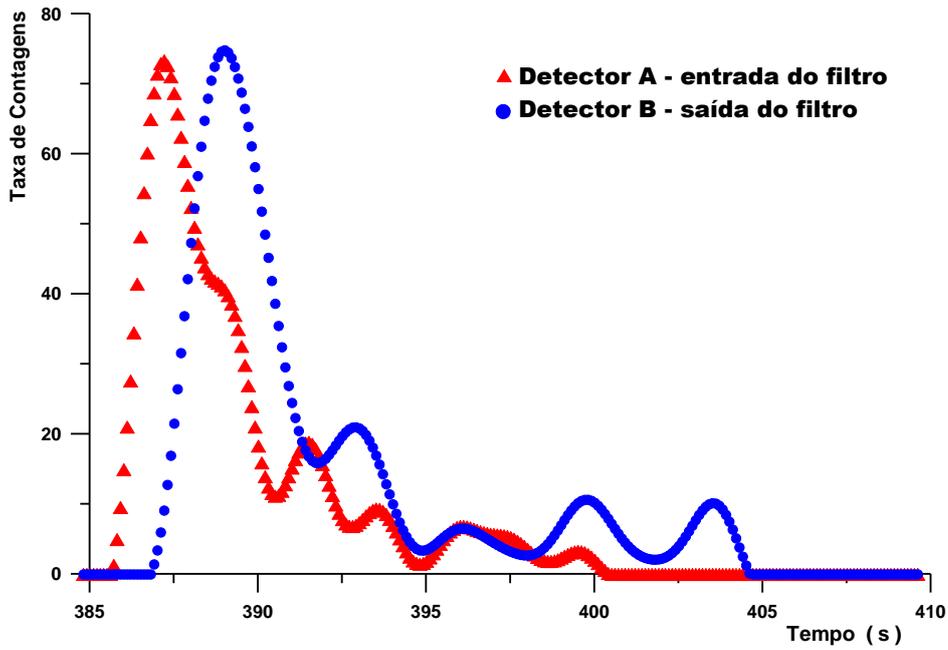


Figura IV.9 – Resposta dos detectores A e B, na entrada e saída do filtro, respectivamente, para o experimento com a restrição na base do filtro.

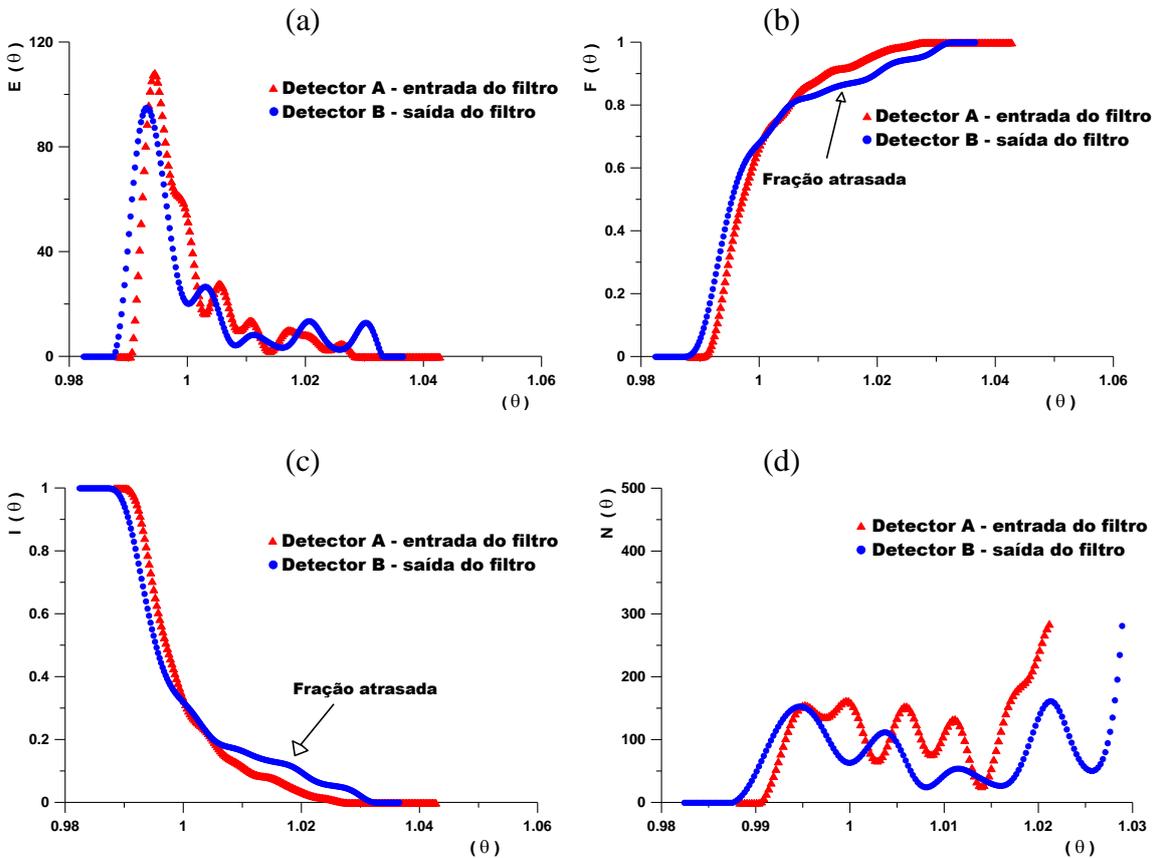


Figura IV.9.1 – Funções de DTR adimensionais, para o filtro contendo 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, com restrição: (a) $E(\theta)$; (b) $F(\theta)$; (c) $I(\theta)$; (d) $N(\theta)$.

Adotando-se o mesmo procedimento, calculou-se o tempo médio de residência e a variância, das curvas representadas na figura IV.9, chegando ao TMR de $(2,32 \pm 0,01)$ s. Como os detectores continuaram separados entre si de 55 cm, a velocidade média superficial do traçador foi de (24 ± 1) cm/s, que confirma o aumento do tempo de permanência do traçador no fluido e, conseqüentemente, a diminuição da velocidade superficial.

Fica evidente pelas diferenças entre as funções de DTR da figura IV.6.1 (b) *verso* figura IV.9.1 (b) e figura IV.6.1 (c) *verso* figura IV.9.1 (c), que ao adicionar o disco rígido de restrição na base do filtro o traçador ficou mais tempo no sistema, devido a zona de retenção que foi gerada pela chapa. A zona de retenção é representada pela fração atrasada gerando um degrau nessas curvas. Esse fenômeno é confirmado pelo cálculo da velocidade superficial e do TMR de cada experimento.

Com a diminuição da velocidade superficial e em conseqüência o aumento de permanência do traçador no filtro, aumenta-se a eficiência de retenção dos gases contendo iodo no interior do filtro, devido ao maior tempo para a adsorção/absorção.

IV.4 – Testes de retenção do gás $^{123}\text{I}_2$.

Para o estudo da imobilização do iodo foram utilizados como substrato: sílica impregnada com prata [10%] ($\text{SiO}_2 + \text{Ag}$) e carvão ativo natural. Volumes diferentes foram fixados, resultando em massas diferentes, por conta do tamanho dos grãos:

- 275 cm^3 , que corresponde à quantidade de 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$;
- 275 cm^3 , que corresponde a 160 g de grãos de carvão ativo;
- 157 cm^3 correspondendo a uma quantidade de 200 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$;
- 157 cm^3 equivalentes à massa de 85 g de grãos de carvão ativo.

O isótopo do iodo usado nos testes foi o ^{123}I e a atividade média nos experimentos foi de 5 MBq por injeção. A atividade teve de ser aumentada devido à baixa energia do ^{123}I em comparação com as energias do ^{82}Br , outra precaução foi aumentar o ângulo sólido dos detectores A e B, na entrada e saída do filtro, respectivamente.

IV.4.1 – Definição da geometria de medida dos detectores ao se empregar iodo radioativo.

Nesse primeiro experimento, foram usados: um filtro contendo 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, a técnica de injeção instantânea, na entrada do sistema, e, como traçador, o gás I_2 .

Os resultados indicaram a necessidade de se modificar a geometria de medida e se melhorar a posição/colimação dos detectores A e B. A configuração aplicada para esse experimento foi a que está representada na figura III.15, onde o detector foi blindado, posicionado junto a tubulação e sem o uso de colimadores. Um detector C foi posicionado na altura do filtro, com o objetivo de se constatar a retenção ou não dos gases radioativos. Essa configuração está representada na figura III.19 e figura III.20.

A figura IV.10 mostra as respostas dos detectores A e B, posicionados na entrada e saída do filtro, respectivamente, e do detector C, quando posicionado na região central do filtro.

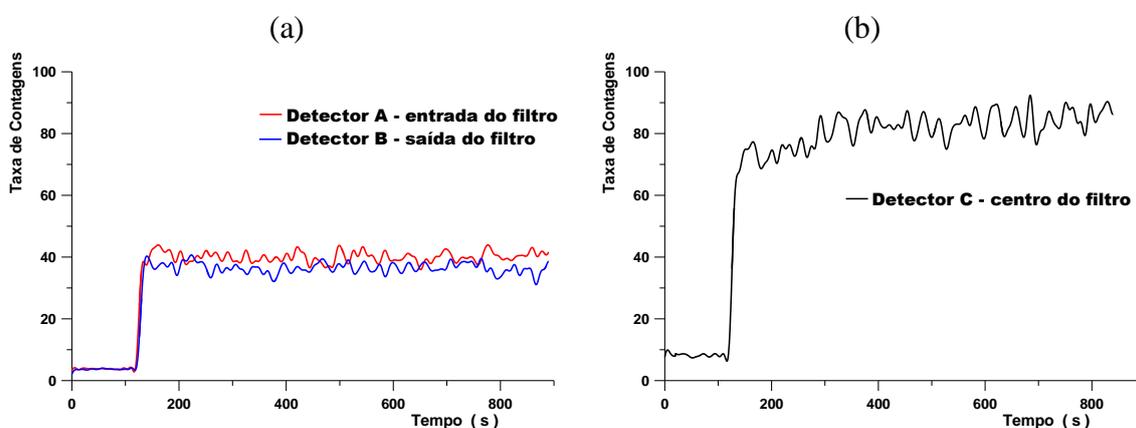


Figura IV.10 – Curvas de resposta dos três detectores, durante a passagem do I_2 por um filtro com 400 g de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$: (a) A e B; (b) C.

A figura IV.10 (a) mostra que os detectores A e B foram sensibilizados pela entrada da nuvem radioativa, mas não registraram a movimentação dela, registrando sua saída. Este fato indica que o iodo ficou retido no filtro, o que é confirmado pelo registro do detector C, figura IV.10 (b).

Concluiu-se que a geometria dos detectores A e B, usada nesse experimento deve ser alterada, sendo assim, o detector A e B foi afastando 50 mm da tubulação. Outra hipótese para o problema seria a possibilidade da retenção/fixação do traçador nas paredes do tubo ou do filtro, contudo, ela foi rejeitada, após o sistema ser desmontado. O teste de esfregação foi executado na tubulação, que se localizava em frente aos detectores A e B. Pequena quantidade de radiotraçador foi verificada na tubulação, apenas na posição do detector A e nenhuma atividade foi encontrada na posição do detector B.

A configuração dos detectores A e B usados nos demais experimentos está representada na figura III.16, onde os detectores encontram-se blindados, distantes 50 mm da tubulação, porém, não colimados. Já a geometria usada para o detector C não foi alterada, permanecendo a configuração representada na figura III.19. O detector A foi posicionado na entrada do filtro e o detector B, em sua saída. O detector C foi posicionado no centro do filtro que serviu para constatar a retenção do traçador no substrato.

IV.4.2 – Testes com injeção instantânea e injeção contínua.

Neste segundo experimento, foram testados dois tipos de injeções do traçador: injeção instantânea e contínua. A figura IV.11 mostra as curvas respostas dos detectores A, B e C resultantes.

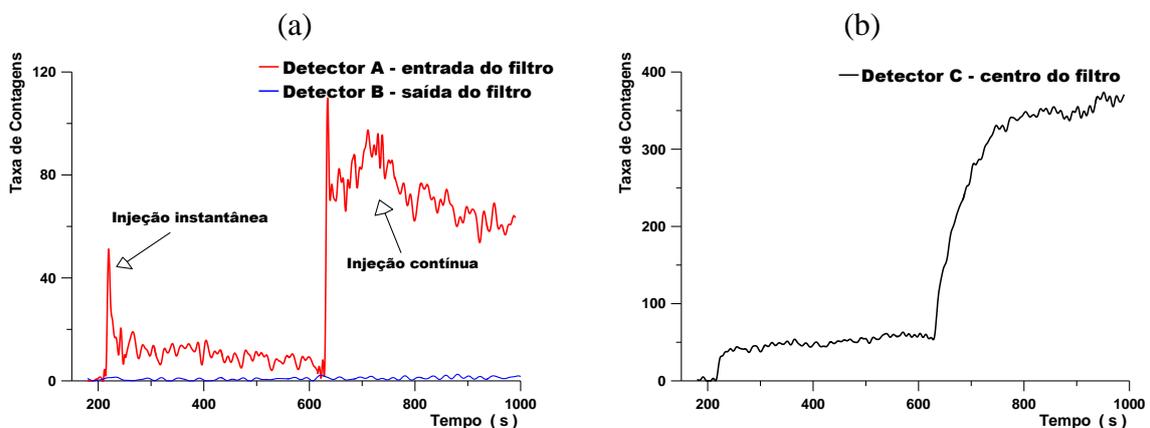


Figura IV.11 – Curvas de resposta dos três detectores, após injeções instantânea e contínua: (a) A e B; (b) C.

O primeiro pulso registrado foi devido à injeção instantânea em $t = 210$ s. Percebe-se na figura IV.11 (a) a entrada instantânea do traçador na região sensível do detector A, ocorrendo um rápido decréscimo da atividade registrada; contudo, nota-se também uma elevação da linha de base no sinal registrado por esse detector, que diminui lentamente com o passar do tempo. Este fenômeno já foi discutido no item anterior, sendo devido à presença de gotículas de I_2 no tubo, na região sensível do detector A. Já o detector B, na saída do filtro, não registrou nenhum sinal, indicando que todo o traçador permaneceu retido no filtro.

A presença de gotículas de I_2 no tubo foi devido à ocorrência de I_2 na fase líquida, que é transportada pelo gás de arraste, da unidade de produção até o interior do filtro, durante todo o processo de injeção.

Ao se proceder a segunda injeção (injeção contínua), que foi de $t = 620$ s até $t = 740$ s, novamente se constatou que há elevação da linha de base e esse fenômeno foi mais intenso, para este tipo de injeção, devido a arrastar maior quantidade de vapor; porém, ocorreu também uma queda lenta com o passar do tempo, pois o I_2 , na forma líquida, foi arrastado para o interior do filtro. O detector B também não registrou a saída do material radioativo, constatando que o gás e os vapores de I_2 ficaram retidos no filtro. Este resultado é excelente para este estudo, pois mostra que o filtro além de reter iodo na forma gasosa, também retém iodios na forma de vapores.

Na figura IV.11 (b), verificou-se que o filtro imobilizou adequadamente o iodo radioativo, pois a intensidade do sinal do detector C permaneceu constante no intervalo de tempo entre 210 s e 600 s. Outra característica importante que foi notada é que, mesmo com injeções simultâneas, o filtro conseguiu imobilizar o iodo, até mesmo após a injeção contínua do traçador, cujo sinal permaneceu constante até o fim do experimento.

Para os demais experimentos, foram aplicadas apenas injeções do tipo instantânea, pois minimiza o problema dos vapores de iodo, que são gerados no processo de produção do gás de I_2 , sendo esse problema maior quando os pulsos de entrada são do tipo de injeções contínua, pois apresentam maior intensidade devido a maior quantidade de vapor.

Como os testes anteriores concluíram que todo o traçador que passava pelo filtro era retido pelo $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$ a um volume de 275 cm^3 , o objetivo desse terceiro experimento foi:

- reduzir a quantidade desse elemento filtrante, para uma massa de 200 g, que corresponderia a um volume de 157 cm^3 ;
- constatar a retenção do gás I_2 nesse novo volume.

Assim, a figura IV.12 mostra as curvas respostas dos detectores A, B e C resultantes.

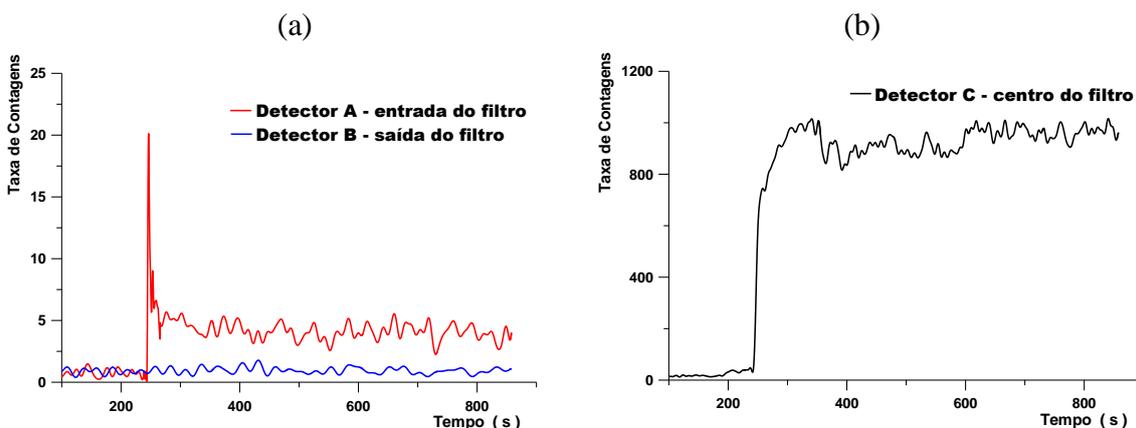


Figura IV.12 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com volume menor de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$ (157 cm^3): (a) A e B; (b) C.

Observou-se que o efeito da elevação da linha de base no registro do detector A, continuou devido aos vapores de I_2 , e a eficiência de retenção continuou sendo de 100%, conforme mostra a figura IV.12. Os sinais registrados pelos detectores B e C não se alteraram permanecendo constantes por todo o intervalo de tempo do experimento. Concluiu-se que o volume de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$ pode ser reduzido para 157 cm^3 , porque o filtro continuará retendo com eficiência todo o gás ou vapor de I_2 injetado no sistema.

IV.4.3 – Teste de imobilização do I_2 usando carvão ativo natural como substrato.

Neste quarto experimento, empregou-se carvão ativo natural como substrato para imobilizar o gás de I_2 . Para isso, foi usado um volume com massa de 160 g que

corresponde ao volume de 275 cm^3 . Na figura IV.13, encontram-se dispostos os registros acusados pelos detectores A, B e C.

Na figura IV.13 (a), um pulso foi injetado no filtro, em $t = 105 \text{ s}$, e observa-se que os sinais registrados, por esse experimento, apresentam uma maior quantidade de ruídos eletrônicos, e isso é devido a diminuição do intervalo de contagem. Após a injeção, a linha de base do detector A subiu, pela mesma razão dada anteriormente, ou seja, em decorrência dos vapores de iodo gerados pelo processo de produção do gás I_2 . O detector B não registrou variações, permanecendo constante durante todo o experimento, indicando que o traçador foi completamente retido no filtro.

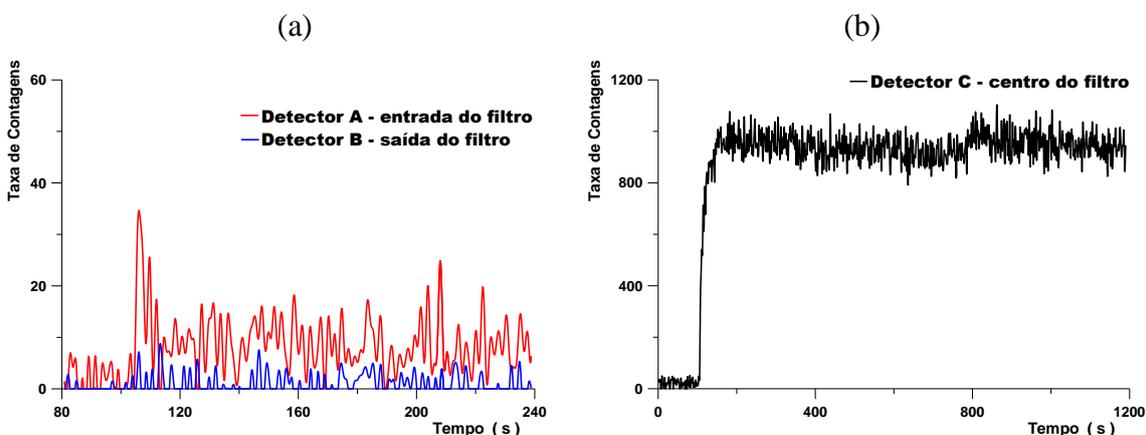


Figura IV.13 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com 275 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C.

Na figura IV.13 (b), observa-se uma ascensão muito rápida, devido a uma entrada mais veloz do traçador no filtro, permanecendo constante no restante do tempo, concluiu-se que o gás de I_2 ficou retido com sucesso no carvão ativo natural, mesmo com uma maior velocidade de entrada do traçador, e que o gás I_2 não foi liberado para o ambiente.

Com base na bibliografia consultada, alguns autores relataram que o carvão ativo poderia liberar o gás retido, após algum tempo de exaustão, ou quando sua matriz fosse saturada (PENCE, 1971; KITANI, 1972; SALES, 1981). Por isso, com o propósito de se estudar o tempo de imobilização do gás I_2 , procedeu-se a uma nova injeção do traçador, e observando-se as respostas dos detectores por mais 20 minutos. Na figura

IV.14, esses registros são mostrados para o teste de liberação do gás I_2 retidos no carvão ativo.

A rotina do serviço de medicina nuclear num setor de iodoterapia deve ser efetuada no menor tempo possível, visando minimizar-se a exposição ocupacional, portanto, espera-se que uma operação de fracionamento das amostras seja rápida, o que sugere que o tempo de exaustão também deva ser pequeno. Por isso, o tempo para o teste de liberação de I_2 foi estipulado em 20 minutos.

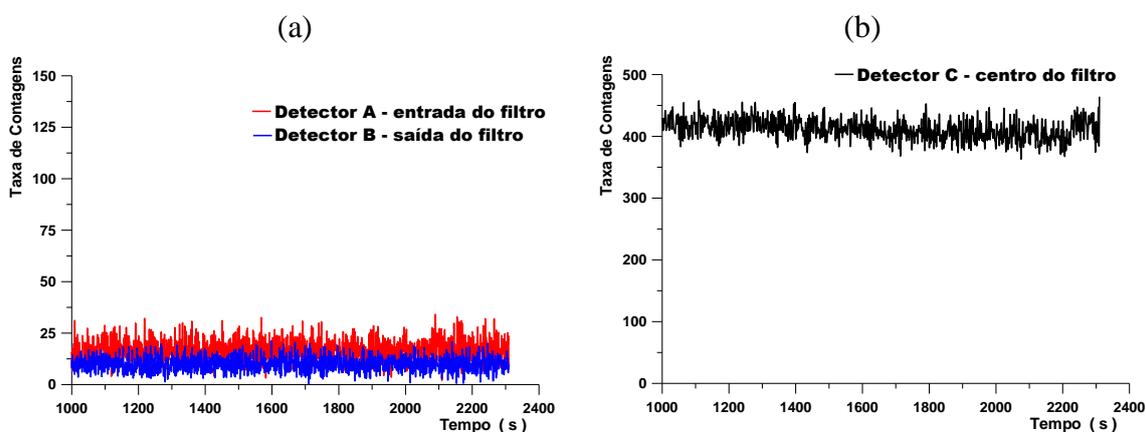


Figura IV.14 – Curvas de resposta dos três detectores, durante o teste de liberação de I_2 retido no filtro contendo carvão ativo com volume de 275 cm^3 : (a) A e B; (b) C.

Novamente, notou-se pelos registros dos detectores A e B, figura IV.14 (a), que as atividades permaneceram constantes, comprovando que o I_2 ficou retido no filtro. Esse comportamento foi ainda confirmado pelos registros acusados pelo detector C, figura IV.14 (b), cuja resposta foi contínua, constatando que nenhuma quantidade do I_2 foi liberada.

Por recomendação de Sales, em 1981, o uso de carvão ativo como meio filtrante deve ser controlado, pois ele é também um excelente combustível, apresentando um baixo ponto de ignição. Quando envenenado com solventes orgânicos, esse ponto de ignição é menor, e ainda apresenta o perigo de explosão, caso absorva grande quantidade de nitratos (SALES, 1981). Por isso, quanto menor a quantidade desse substrato, maior será a segurança do filtro. Visando-se garantir essa segurança,

avaliou-se a eficiência de imobilização do gás I_2 num volume de apenas 157 cm^3 , que corresponde 85 g de carvão ativo natural.

Na figura IV.15 (a), um pulso foi injetado no filtro, em $t = 90\text{ s}$, que adentrou rapidamente pelo sistema, e, por isso, a intensidade do sinal foi menor do que a observada nos experimentos anteriores. A velocidade superficial foi maior, devido às características de tamanho maior dos grãos de carvão ativo, em relação ao dos cristais de $SiO_2 + Ag$.

Na figura IV.15, as contagens registradas pelos detectores A, B e C, num quinto experimento, confirmaram ser possível essa redução de volume, de forma a se minimizar a quantidade de carvão ativo natural no filtro, para uma imobilização eficiente do gás I_2 .

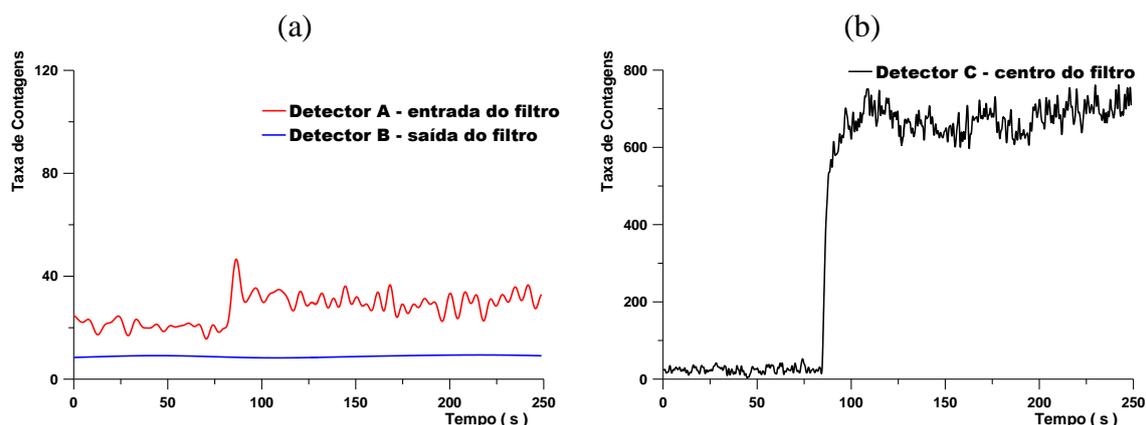


Figura IV.15 – Curvas de resposta dos três detectores para medir a eficiência de retenção do I_2 por um filtro com 157 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C.

Também foi efetuado o teste para verificar a possibilidade de liberação do gás I_2 , como efetuado no filtro contendo 275 cm^3 , durante os 20 minutos de aquisição, com fluxo contínuo de ar atmosférico, os resultados mostram que nenhuma quantidade do gás I_2 foi liberado do filtro, conforme confirma a figura IV.16.

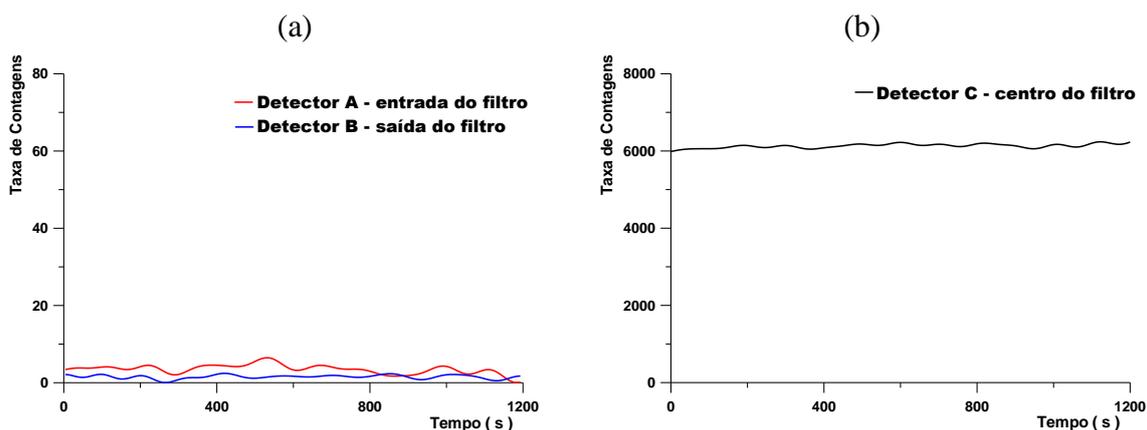


Figura IV.16 – Curvas de respostas dos três detectores quanto a liberação de I_2 , após sua retenção num filtro com 157 cm^3 : (a) A e B; (b) C.

IV.5 – Testes de retenção do gás $\text{CH}_3^{123}\text{I}$.

De forma semelhante, os testes realizados sobre a retenção do gás I_2 eles foram repetidos para volumes de 275 cm^3 e 157 cm^3 do gás CH_3I , para os mesmos substratos: sílica impregnada com prata [10%] ($\text{SiO}_2 + \text{Ag}$) e carvão ativo natural. Como isótopo do iodo também foi usado o ^{123}I , com atividade média, em cada experimento, de 5 MBq por injeção.

A configuração dos detectores A e B, usadas nestes experimentos está representada na figura III.16, com o detector blindado, distante de 50 mm da tubulação, porém, não colimado. A geometria do detector C está representada na figura III.19. O detector A foi posicionado na entrada do filtro e o detector B em sua saída, enquanto o detector C foi posicionado na região central do filtro.

IV.5.1 – Teste de retenção do gás CH_3I através de um volume de 275 cm^3 contendo $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$.

A figura IV.17 mostra as curvas de resposta dos três detectores para um filtro com 275 cm^3 de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, que representa o sexto experimento.

Como pode ser visto na figura IV.17 (a), o gás CH_3I entrou e saiu do filtro sem ser retido, ou seja, nenhum gás radioativo permaneceu no interior do filtro, fato esse que pode ser constatado pelas medidas das áreas totais sob os picos, relativas as contagens registradas pelos detectores A e B, respectivamente, sendo iguais, em ambas as posições.

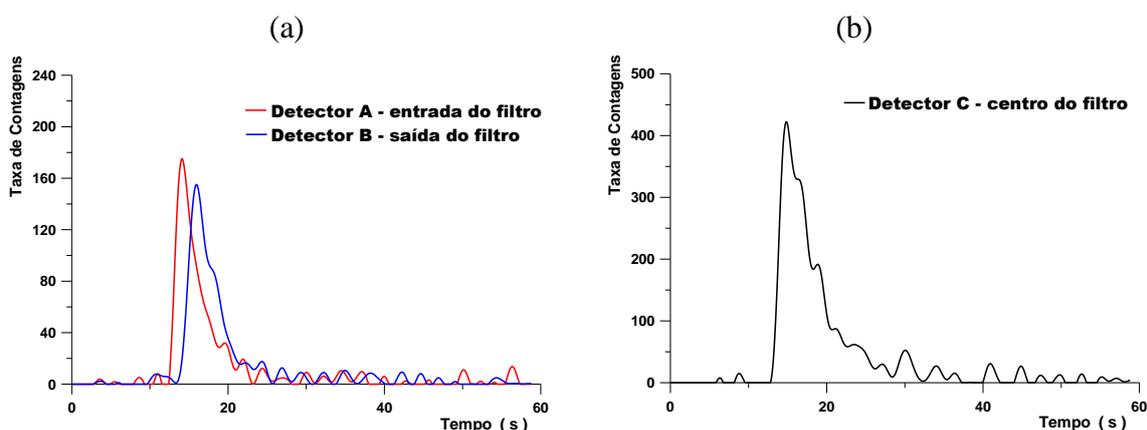


Figura IV.17 – Curvas de resposta dos três detectores, para medir a eficiência de retenção do CH_3I pelo filtro com 275 cm^3 de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$: (a) A e B e (b) C.

Em relação ao detector C, figura IV.17 (b), o registro da nuvem radioativa mostrou que o CH_3I foi totalmente removido do filtro, pois, após $t = 40 \text{ s}$, o sinal volta ao mesmo valor da linha de base existente, antes da injeção do traçador. Os resultados também permitiram afirmar que não adianta diminuir ou aumentar a quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$, pois, certamente, não irá reter o gás de CH_3I . Concluiu-se que o gás de CH_3I não foi retido por $\text{SiO}_2 + \text{Ag}$.

IV.5.2 – Teste de retenção do gás CH_3I com volume de 275 cm^3 contendo grãos de carvão ativo natural.

O sétimo experimento foi realizado para um filtro com 160 g de grãos de carvão ativo natural que corresponde a um volume de 275 cm^3 . Na figura IV.18, são mostradas as curvas de resposta dos detectores A, B e C.

Pode ser observado na figura IV.18 que o uso do carvão ativo natural com volume de 275 cm³ foi muito efetivo, chegando a uma eficiência de 100% de retenção para o gás CH₃I.

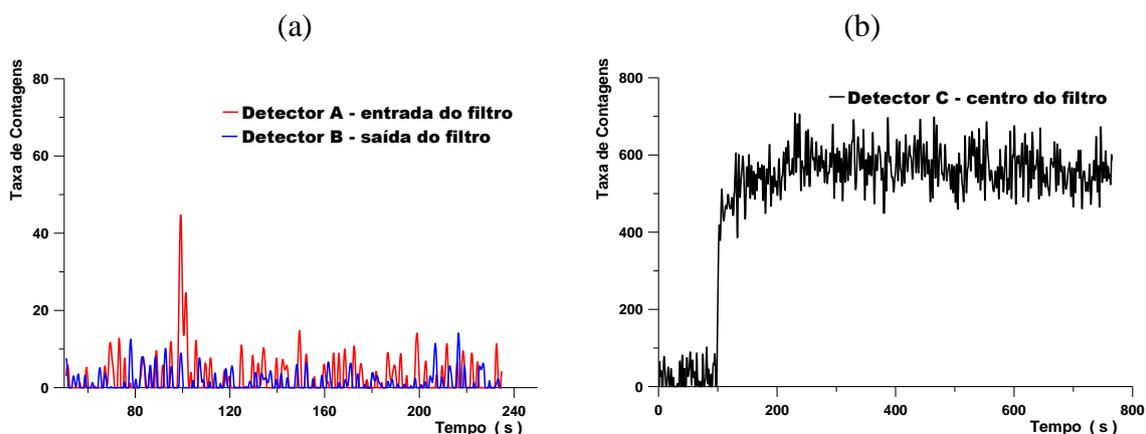


Figura IV.18 – Curvas de resposta dos três detectores, relativo à eficiência de retenção do CH₃I num filtro com 275 cm³ de carvão ativo: (a) A e B; (b) C.

Da mesma forma que se procedeu com o filtro com 275 cm³ de carvão ativo quanto à liberação do gás I₂, fez-se também o teste de liberação do gás CH₃I, conforme mostram as curvas da resposta dos detectores A, B e C, dispostas na figura IV.19.

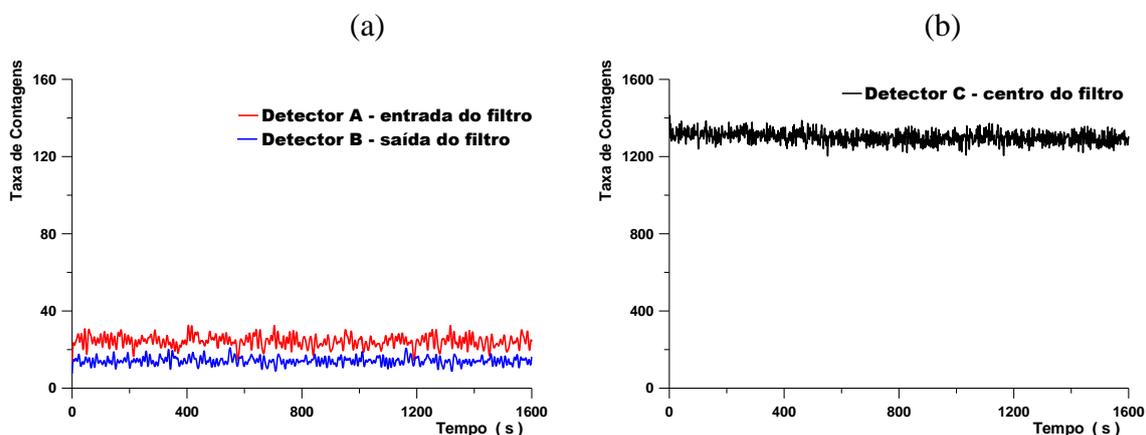


Figura IV.19 – Curvas de resposta para os três detectores, usados no teste de liberação de CH₃I retido no filtro com 275 cm³ de carvão ativo: (a) A e B; (b) C.

A figura IV.19 mostra que, durante os 25 minutos de retenção pelo filtro de carvão ativo, sob um fluxo de ar contínuo, não ocorreu nenhuma liberação de gás CH₃I retidos.

Conforme citado no item IV.4.3, também foi necessário reduzir o volume do carvão ativo para se verificar a retenção do gás de CH_3I . Diminuiu-se, então, a quantidade de grãos de carvão ativo para 157 cm^3 , que corresponde à massa de 85 g desse substrato. Na figura IV.20, são mostradas as respostas dos detectores A, B e C usados no oitavo experimento.

A figura IV.20 mostra que, ao ser dada a injeção instantânea do traçador no sistema, o detector A registrou a passagem da nuvem radioativa no intervalo de tempo de 119 s a 125 s, indicando que o escoamento no filtro com 157 cm^3 de volume foi muito rápido. O detector B registrou um pequeno sinal em $t = 121 \text{ s}$, mas com uma intensidade muito pequena, quase não sendo registrado. Contudo, a curva registrada pelo detector C, figura IV.20 (b), demonstra que o CH_3I foi removido do carvão ativo gradualmente.

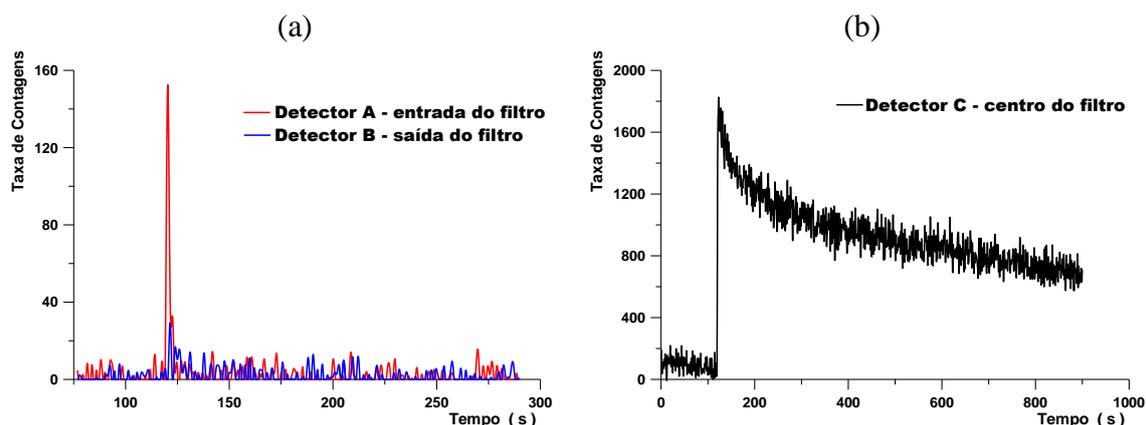


Figura IV.20 – Curva de resposta dos três detectores usados no teste de retenção do CH_3I por um filtro com 157 cm^3 de carvão ativo: (a) A e B; (b) C.

O detector B, como mostra a figura IV.20 (a), não registrou nenhuma liberação, devido ao gás CH_3I ser liberado numa fração mínima, menor que o limite de detecção do detector cintilador NaI (Tl). Conclui-se, então, através do oitavo experimento, que, a quantidade de 85 g de carvão ativo, correspondente ao volume de 157 cm^3 , não foi possível reter o gás de CH_3I .

IV.6 – Cálculo da vazão de gases que são exaustados, quando se usa um filtro com duplo estágio, SiO₂ + Ag e carvão ativo, formando um volume final de 432 cm³.

Um fator importante a ser considerado na configuração final do filtro, é a vazão de exaustão dos gases que passaram pelo filtro. Para se concluir este trabalho a vazão de exaustão dos gases foi calculada. Sendo o gás de I₂, retido com eficiência máxima pelo filtro com 200 g de SiO₂ + Ag, e o gás de CH₃I retido por um filtro com 160 g de carvão ativo natural, sugere-se o uso de um filtro com duplo estágio, sendo o primeiro o SiO₂ + Ag e o segundo, de carvão ativo natural. Assim, a vazão foi calculada para essa configuração de filtro, usando a técnica de estímulo/resposta com radiotraçadores, em conjunto com a metodologia de transiente de tempo (RAMOS, 2006).

Dois detectores foram posicionados em sequência na entrada do filtro, para registrarem as curvas de resposta durante a passagem da nuvem radioativa do gás de CH₃⁸²Br. Através dessas curvas, calculou-se o tempo de residência neste intervalo. Sabendo-se que a distância entre os detectores era de 0,05 m e o diâmetro da tubulação que era de 0,06 m, calculou-se a vazão do sistema. A vazão do sistema composto por elementos filtrantes com massa de 200 g de SiO₂ + Ag e 160 g de carvão ativo natural foi de (306 ± 4) m³/h. Esta vazão é considerada ideal para exaurir fluidos em pequenas capelas químicas, sendo por isso considerada uma vazão adequada ao uso no serviço de medicina nuclear em aplicações de fracionamentos ou manipulações de iodos radioativos.

A menor capela, produzida industrialmente, apresenta uma vazão de 300 m³/h para uma caixa com dimensões úteis de 603 mm de profundidade, 533 mm de largura e 655 mm de altura (FASTER E INSTRULAB, modelo CHEMFREE 2000 60-S) <<http://www.instrulab.com.br/detalhes.php?id=155>>, em 20/11/2010.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos experimentalmente permitiram que os objetivos iniciais da pesquisa fossem alcançados, concluindo-se que:

- A unidade de produção dos traçadores gasosos e as sínteses aplicadas para a produção de CH_3Br , I_2 e de CH_3I forneceram quantidades desejadas de radiotraçadores gasosos, permitindo ainda a injeção de traçadores gasosos no sistema, sem nenhum tipo de vazamento.
- O filtro projetado revelou ser de excelente qualidade, baixo custo, alta resistência a choques mecânicos e também a ataques químicos. Após esses estudos, seu volume pode ser fabricado em menor escala, porém com as mesmas características do original usado neste trabalho.
- Os substratos inorgânicos permitem sua regeneração, o que minimiza os custos, por isso, o uso de cristais de sílica impregnados com prata [10%] é indicado para uso nos Serviços de Medicina Nuclear.
- As análises qualitativas baseadas nas respostas das funções de distribuições estatísticas adimensionais indicaram que o escoamento no filtro projetado pode ser caracterizado como um fluxo dispersivo ou um fluxo em mistura.
- As análises quantitativas, referentes ao estudo de elementos filtrantes contendo cristais de sílica mostraram que o método de momentos ponderados é indicado para se avaliar as características dos filtros, obtendo resultados reprodutíveis dentro do erro esperado. Sendo assim, através da equação da dispersão axial, pode-se encontrar o tempo médio de residência e, também, a dispersão para a geometria correspondente.

- Os parâmetros ajustados pelas análises quantitativas possibilitaram estimar-se o tempo médio de residência: 0,88 segundos, para uma massa de 250 g de cristais de sílica, e 1,87 segundos, para uma massa de 500 g de cristais de sílica. O escoamento foi classificado como um escoamento não ideal (número de Peclet entre 1 e 100 caracteriza leitos empacotados), devido ao número de Peclet, ajustado para um valor de 6, quer seja no experimento com massa 250 g, ou naquele com massa 500 g de cristais de sílica. O modelo de fluxo deste filtro também foi ajustado por uma série de três misturadores perfeitos, com tempo médio de residência de 0,3 segundos, por misturador, para os experimentos contendo massa de 250 g de cristais de sílica, e de 0,6 segundos, por misturador, para aqueles relacionados a 500 g de cristais de sílica.
- A retenção dos gases contendo I₂ pode ser executada, num filtro com 157 cm³ de cristais de sílica impregnada com prata [10%], ou por um com grãos de carvão ativo natural de mesmo volume. Já os gases contendo CH₃I, foram retidos num filtro com 275 cm³ de grãos de carvão ativo natural.

No caso do serviço de medicina nuclear usar constantemente materiais oxidados como NO₂, SO₂, ou nitratos, não é aconselhável o uso de filtros contendo carvão ativo, pois representa risco de explosões (nitratos) ou diminuição do ponto de ignição do carvão (acúmulo de óxidos).

Concluiu-se que o melhor filtro seria aquele com duplo estágio, sendo o primeiro constituído de 157 cm³ de cristais de sílica impregnados com prata [10%] acoplado a outro com 275 cm³ de grãos de carvão ativo natural. Sendo usado o mesmo exaustor, a vazão de exaustão dos gases radioativos será de (306 ± 4) m³/h, que é uma exaustão adequada para capelas químicas de pequeno porte.

Sugere-se para futuros trabalhos, o teste do filtro projetado com outros elementos filtrantes e estudo de exaustão de outros gases radioativos empregados nos Serviços de Medicina Nuclear, tais como: tecnécio, ^{99m}Tc; tálio, ²⁰¹Tl; índio, ¹¹¹In; gálio, ⁶⁷Ga; e flúor, ¹⁸F.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKLEY, R.D., DAVIS, R.J., 1972, *Effect of Extended Exposure to Simulated LMFBR Fuel Reprocessing Off-Gas on Radiodine Trapping Performance of Sorbents*. In: CONF-720823, Proceedings of the 12th AEC Air Cleaning Conference, Oak Ridge, pp. 484-499.

ANDERSSON, A.S., WHITE, E.T., 1971, "Parameter estimation by the weighted moments method", *Chemical Engineering Science*, Vol. 26, pp. 1203-1221.

BEESON, P.B., McDERMOTT, W., 1973, *Tratado de Medicina 13^a ed.*, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.

BRANDÃO, L.E.B., 2001, *Otimização de Unidade de Tratamento de Águas Residuais Urbanas e Industriais Empregando-se Traçadores Radioativos*. Tese de D. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BUFFHAM, B.A., MASON, G., 1993, "Holdup and Dispersion: Tracer Residence Times, Moments and Inventory Measurements", *Chemical Engineering Science*, Vol. 48, pp. 3879-3887.

CHRYSIKOPOULOS, C.V., KITANIDIS, P.K., ROBERTS, P.V., 1992, "Generalized Taylor-Aris Moment Analysis of the Transport of Sorbing Solutes Through Porous Media with Spatially-Periodic Retardation Factor", *Transport in Porous Media*, Vol. 7, pp.163-185.

CNEN-NE 3,02, 1988, *Serviço de Radioproteção*, Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ.

CNEN-NN 3,05, 1996, *Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Medicina Nuclear*, Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ.

CNEN-NE 5,01, 1988, *Transporte de Material Radioativo*, Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ.

CNEN-NE 6,05, 1985, *Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas*, Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ.

CNEN-NN 6,01, 1998, *Requisitos para o Registro de Pessoas Físicas para o Preparo, Uso e Manuseio de Fontes Radioativas*, Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ.

DANCKWERTS, P.V., 1953, “Continuous Flow Systems – Distributions of Residence Times”, *Chem. Eng. Sc.* Vol. 2, No. 2, pp. 1-18.

DILLMANN, H.G., PASLER, H., WILHELM, J.G., 1990, “Filtered Venting for German Power Reactors”, *Nuclear Technology*, Vol. 92, pp. 40-49.

EDWARDS, L.L., RAO, D.P., 1973, “Mixing effects in stirred tank reactors: a comparison of models”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 28, pp. 1179-1192.

EVANS, A.G., 1972, *Effect of Intense Gamma Radiation on Radioiodine Retention by Activated Carbon*. In: CONF-720823, Proceedings of the 12th AEC Air Cleaning Conference, Oak Ridge, pp. 401-416.

FAHIM, M.A., WAKAO, N., 1982, “Parameter Estimation from Tracer Response Measurements”, *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 25, pp. 1-8.

FOX, R.W., McDONALD, A.T, PRITCHARD, P.J., 2004, *Introduction to Fluid Mechanics, Sixth Edition*, John Wiley & Sons, Inc.

FUNABASHI, K., FUKASAWA, T., KIKUCHI, M., 1994, “Investigation of Silver-Impregnated Alumina for Removal of Radioactive Methyl Iodide”, *Nuclear Technology*, Vol. 109, pp. 366-372.

GAL, I.J., MUK, A., TODOROVIĆ, M., RAJNVAJN, J., CVJETIĆANIN, D., VUJISIĆ, Lj, 1974, *Adsorption of Methyl Iodide on Impregnated Alumina*. In: CONF-720807, Proceedings of the 13th AEC Air Cleaning Conference, San Francisco, pp. 815-831.

GIBILARO, L.G., GREGO, J.G., IORIO, G., 1975 “Numerical Inversion of the Laplace Transform: an explicit closed-form expression for the time-domain solution”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 30, pp.1069-1074.

GIBILARO, L.G., LEES, F.P., 1969, “The reduction of complex transfer function models to simple models using the method of moments”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 24, pp. 85-93.

GUYTON, A.C., 1988, *Fisiologia Humana 6^a ed.*, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.

HAEFNER, D.R., TRANTER, T.J., 2007, *Methods of Gas Phase Capture of Iodine from Fuel Reprocessing Off-Gas: A Literature Survey*. In: INL/EXT-07-12299, Idaho National Laboratory (INL).

HELENE, O., 2006, *Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial*, São Paulo, Editora Livraria da Física.

HERRAMAN, F.J., MOTOI, V., FIES, H., STOJANIK, B., FURRER, J., KAEMPFER, R., 1988, *Testing an Iodine Filter for the Vessel Off-gas of the German Industrial-Scale Reprocessing Plant*. In: CONF-880822, Proceedings of the 20th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference, Boston, pp. 234-245.

HERRAMAN, F.J., MOTOI, V., HERRMANN, B., SCHOOR, A.V., FANG, D., FIES, H., 1991, *Retention and Measurement of Iodine-129 and of Organ Iodine in the Off-gas Streams of the Karlsruhe Reprocessing Plant WAK*. In: CONF-900813, Proceedings of the 21th DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference, pp. 222-233.

HIMMELBAU, D.M., BISCHOFF, K.B., 1968, *Process Analysis and Simulation – Deterministic Systems*, John Wiley & Sons.

IAEA, Basic Safety Series (BSS) – 115, 1996, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Vienna.

IAEA, Safety Guide – RS-G-1.2, 1999, *Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclide*, Vienna.

IAEA, Technical Reports Series – 122, 1970, *Air Filters for Use at Nuclear Facilities*, Vienna.

IAEA, Technical Reports Series – 148, 1973, *Control of Iodine in the Nuclear Industry*, Vienna.

IAEA, Technical Reports Series – 316, 1990, *Radioisotope Tracers in Industry*, Vienna.

JOLLEY, J.G., TOMPKINS, H.G., 1984, “The Poisoning of Silver Zeolite by Organics”, *Journal of materials Science*, Vol. 19, pp. 2870-2874.

KATZUNG, B.G., 2003, *Farmacologia Básica e Clínica 8ª ed.*, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.

KELLER, J. H., DUCE, F. A., MAECK, W. J., 1970a, *A Selective Adsorbent Sampling System for Differentiating Airborne Iodine Species*. In: CONF-700816, Proceedings of the 11th AEC Air Cleaning Conference, Hanford, pp. 621-634.

KELLER, J. H., DUCE, F. A., PENCE, D. T., MAECK, W. J., 1970b, *Hypoiodous Acid: An Airborne Inorganic Iodine Species in Steam-Air Mixtures*. In: CONF-700816, Proceedings of the 11th AEC Air Cleaning Conference, Hanford, pp. 467-481.

KITANI, S., NORO, T., KOHARA, T., 1972, “Removal of Methyl Iodide by Impregnated Charcoals from Flowing Air under Humid Condition”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 197-202.

KNOLL, G.F., 1989, *Radiation Detection and Measurement*, 2 ed, John Wiley & Sons.

KOARASHI, J., AKIYAMA, K., ASANO, T., KOBAYASHI, H., 2006, “A practical method for monitoring ^{129}I concentration in airborne release”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 267, No. 1, pp. 155-159.

KORNIENKO, V.I., AMPELOGOVA, N.I., KRUPENNIKOVA, V.I., 2004, “A Sorption-Filtration Material for Recovery of Radioactive Iodine form Gaseous Aerosol Exhausts”, *Radiochemistry*, Vol. 46, No. 6, pp. 607-611.

LEE, B.S., JESTER, W.A., OLYNYK, J.M., 1991, “Radiiodine Speciation in the Hot Cell Effluent Gases of a Radiopharmaceutical Production Facility”, *Health Physics*, Vol. 61, No. 2, pp. 255-258.

LEE, H.K., PARK, G.LL., 1996, “Adsorption Characteristics of Elemental Iodine and Methyl Iodide on Base and TEDA Impregnated Carbon”, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 44-55.

LEVENSPIEL, O., 1980, *Engenharia das Reações Químicas, Cálculo de Reatores -V.2*, Edgard Blücher LTDA.

LIN, C.C., WANG, C.F., SUN, Y.C., CHAO, J.H., TSENG, C.L., 2006, “Radiation effects on gaseous iodine at very low concentration”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 268, No. 2, pp. 419-424.

MAFRA, O.Y, 1973, *Técnicas e medidas Nucleares*, Editora Edgard Blücher.

MICHELSEN, M.L., ØSTERGAARD, K., 1970, “The use of residence time distribution data for estimation of parameters in the axial dispersion model”, *Chemical Engineering Science*, Vol.25, pp.583-592.

MOSTOVAYA, L. Ya., ANAN'in, V.N., DRUGACHENOK, M. A., SHEVICHIK, G.V., TROKHIMETS, A. I., DOLGOV, V. M., 1988, “Sorbents Based on Silver Compounds for Capturing Radio-Iodine”, *Translated from Radiokhimiya*, Vol. 30, No. 2, pp. 231-234.

NAKHUTIN, I.E. RASTUNOV, L.N., SMIRNOVA, N.M., LOSHAKOV, LAUSHKINA, G.A., 1980, *The use of Silicon-Organic Liquids as Absorbents for the retention of I-129*. In: Management of Gaseous Wastes from Nuclear Facilities, proceedings of the IAEA, Vienna.

PARK, G.L.L., CHOI, B.S., CHO, L.L.H., KIM, J.H., 2000, “Adsorption and Desorption Characteristics of Methyl Iodine on Silver Ion-Exchanged Synthetic Zeolite at High Temperature”, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 32, No. 5, pp. 504-513.

PENCE, D.T., DUCE, F.A., MAECK, W.J., 1971, *Metal Zeolites: Iodine adsorption studies*. In: 1455, Chemistry TID-4500, Idaho Nuclear Corporation, Prepared for the U.S Atomic Energy Commission, pp. 1-20.

PENCE, D.T., DUCE, F.A., MAECK, W.J., 1972, *Developments in the Removal of Airborne Iodine Species with Metal-Substituted Zeolites*. In: CONF-720823, Proceedings of the 12th AEC Air Cleaning Conference, Oak Ridge, pp. 417-433.

RAMOS, V.S, 2006, *Uso das Técnicas de Radiotraçadores e de Contagem Total em Medidas de Vazão de Sistemas Abertos*. Dissertação de M. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROCHA, A.F.G., HERBERT, J.C., 1979, *Medicina Nuclear: Bases*, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.

RT-IEN-04, Relatório técnico IEN/CNEN-04, 2010, *Unidade de Produção de Traçador Radioativo Gasoso*, Rio de Janeiro.

RT-IEN-05, Relatório técnico IEN/CNEN-05, 2010, *Produção do Traçador Radioativo CH₃Br Marcado com ⁸²Br*, Rio de Janeiro.

RT-IEN-06, Relatório técnico IEN/CNEN-06, 2010, *Produção dos Traçadores Radioativos I₂ e CH₃I Marcados com ¹²³I*, Rio de Janeiro.

RT-IEN-11, Relatório técnico IEN/CNEN-11, 2002, *Mapeamento do Fluxo de Nêutrons do Reator Argonauta na Nova Configuração de seu Núcleo*, Rio de Janeiro.

SAKURAI, T., TAKAHASHI, A., MING-LU, Y., 1997, “Trapping and Measuring Radiodine (Iodine-129) in Cartridge Filters”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 34, No. 2, pp. 211-216.

SALES, F.G., 1981, *Investigação sobre a Remoção de Compostos de Iodo Penetrantes na forma Gasosa em Materiais Absorvedores*. Dissertação de M.Sc., UFPE, Recife, PE, Brasil.

SEINFELD, J.H., LAPIDUS, L., 1974, *Mathematical Methods in Chemical Engineering – V.3*, Englewood Cliffs, New Jersey.

SINCLAIR, C.G., 1965, “The residence time probability density of complex flow systems”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 20, pp. 261-264.

TAKESHITA, K., TAKASHIMA, Y., 1995, “Effect of Grain Size of AgNO₃ Loaded in Porous Material of Adsorption of CH₃I”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 32, No. 9, pp. 941-943.

TAYLOR, G.I., 1954, “The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe” *Proc. Of Royal Society of London*, series A, v. 68 , pp. 446-468.

THRALL, J.H., ZIESSMAN, H.A., 1995, *Nuclear Medicine - The requisites*, St. Louis Missouri, Mosby Year Book.

TSOLFANIDIS, N., 1983, *Measurement and Detection of Radiation*, Editora McGraw-Hill Int. Edit.

THÝN, J., 1983, “Process analysis with Nuclear Technique”, *Isotopenpraxis*, Vol. 19, No. 11, pp. 365-372.

VIDAL, M.V.S., 2004, *Proposta de um modelo para monitoração ocupacional da contaminação interna por iodo-131 em trabalhadores de Serviços de Medicina Nuclear*. Dissertação M. Sc, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VON SPERLING, M., 1996, *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

WAYLAND, H., 1957, *Differential Equations applied in Science and Engineering*, New York, Lancaster Press.

WESTMEIER, W., REUS, U., 1983, *Catalog of GammaRays From Radioactive Decay*. Atomic Data and Nuclear Data Tables 29, N. 1&2.

WILHELM, J.G., DILLMANN, H.G., GERLACH, K., 1972, *Testing of Iodine Filter System Under Normal and Post-Accident Conditions*. In: CONF-720823, Proceedings of the 12th AEC Air Cleaning Conference, Oak Ridge, pp. 434-444.

WILHELM, J.G., FURRER, J., 1976, *Head-End Iodine Removal from a Reprocessing Plant with a Solid Sorbent*. In: CONF-760822, Proceedings of the 14th ERDA Air Cleaning Conference, Sun Valley, pp. 447-477.

ØSTERGAARD, K., MICHELSEN, M.L., 1969, “On the Use of the Imperfect Tracer Pulse Method for Determination of Hold-Up and Axial Mixing”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 47, pp. 107-112.

ANEXO A

Problemas relacionados com a glândula tireóide

Quando os solos são pobres em iodo, particularmente em certas regiões montanhosas da Europa, distantes do mar, seus habitantes podem apresentar uma carência em iodo, que se caracterizam pelo aparecimento de uma papeira (aumento do volume da glândula tireóide), conhecida como bócio endêmico. Com a carência de iodo, há uma diminuição da formação de hormônios tireoidianos e, então, por um mecanismo de feedback (efeito de retorno), ocorre o aumento de estímulo da glândula pelo hormônio hipofisário, que regula a tireóide, causando o aumento do volume da glândula tireóide.

A carência de iodo pode causar o hipotireoidismo, que é uma produção reduzida do hormônio tiroxina. Como resultado da diminuição da tiroxina, o metabolismo é reduzido, a pessoa fica extremamente letárgica, tem um aumento na deposição de gordura corporal, podendo ainda apresentar mixedema (deposição de uma mistura de líquido e mucoproteína nos espaços entre as células) e o bócio endêmico. Quando a carência atinge crianças, principalmente, durante o desenvolvimento fetal, elas podem apresentar o “cretinismo”, que se caracteriza pelo retardo mental e pelo crescimento ósseo. O hipertireoidismo se refere a um estado de atividade acelerada da glândula tireóide, com a produção de quantidade excessiva do hormônio tireoidiano. Mais comumente, o hipertireoidismo é componente de uma síndrome que inclui bócio, exoftalmia, edema pré-tibial, conhecida como “Doença de Graves” (Doença de Basedow) (BEESON, 1973).

Segundo a hipótese atual, existe uma predisposição genética na constituição da doença e o estresse seria o fator que desencadeia as anomalias imunitárias. Os sinais clínicos mais típicos são palpitações, aumento do débito cardíaco, emagrecimento, tremor das extremidades, ansiedade e insônia.

É interessante lembrar que o primeiro semestre que segue a um parto é, frequentemente, o momento do aparecimento das disfunções tireoidianas, num terreno genético predisposto. Neste caso, os hipertireoidismos são, em geral, transitórios, mas os hipotireoidismos podem se tornar definitivos.

Outro caso bastante dissimulado e menos conhecido dos distúrbios é a sobrecarga de iodo devido a certos medicamentos. Aliás, esse problema volta à tona na atualidade. Os medicamentos responsáveis pelos distúrbios da glândula tireóide de origem iatrogênica são essencialmente medicamentos contendo iodo, como, também, outros com grandes doses de lítio. Em presença excessiva de iodo, nas terapias medicamentosas de longo prazo, a liberação dos hormônios tireoidianos é limitada, daí as disfunções possíveis da glândula tireóide. Esse fenômeno é, na maioria dos casos, transitório, pois, após alguns dias, ocorre uma adaptação da tireóide à sobrecarga de iodo. Na ausência de adaptação, um hipotireoidismo irá, então, aparecer. Ele se instala progressivamente e só regride lentamente (vários meses), após a suspensão do medicamento. Mais do que 300 espécies pertencem às diversas classes terapêuticas que contém iodo: antiasmáticos, antálgicos, bronco dilatadores, anti-sépticos intestinais, veinotrópicos, anti-hipertensivos, antigota, antiarritmicos e os anti-sépticos externos iodados.

Os produtos iodados de contraste empregados nos exames complementares podem provocar acidentes alérgicos (simples erupção cutânea ou acidente mais grave), em particular, quando o paciente tem antecedentes alérgicos ou cardíacos. Os choques anafiláticos ao iodo, no momento de urografias intravenosas, são imprevisíveis, daí a necessidade de se praticar testes prévios e de se prover sempre meios de reanimação para os doentes <www.oligoelementos.com.br>, em: 23/08/2006.

ANEXO B

Controle de Radioproteção para monitoração individual

B.1 - Monitoração individual.

A monitoração de rotina é estabelecida para quantificar as exposições normais, na ausência de evidências que indiquem a ocorrência de incorporações agudas, ou quando não se pode desconsiderar a ocorrência de exposições crônicas. A monitoração de rotina é realizada em intervalos pré-determinados, não relacionados com nenhum evento de incorporação conhecido.

O Programa de Monitoração Interna deve ser planejado previamente à operação da instalação, definindo-se as técnicas de medida, a frequência de monitoração e os métodos de interpretação dos dados, visando ao cálculo da dose efetiva comprometida. Para a avaliação dos resultados, em termos das atividades incorporadas, também é necessário fazer suposições relativas ao intervalo decorrido entre a incorporação e a medida (IAEA,1999).

Nos serviços de medicina nuclear, há necessidade de monitoração interna, que pode ser reduzida, utilizando-se medidas que minimizem a incorporação de radionuclídeo pelo trabalhador, tais como, a implantação de filtros em capelas. O presente trabalho busca contribuir para se minimizar as doses de funcionários de clínicas desse tipo, capturando as diversas formas químicas de iodos voláteis no ar, não o liberando para o ambiente, minimizando, assim, a necessidade de uma monitoração rotineira de contaminação interna dos indivíduos que lá exercem suas atividades.

B.1.1 - Critérios para a Monitoração Individual Interna.

Para avaliação da necessidade de implementação de um Programa de Monitoração Individual Interna de rotina, baseado em uma dose anual efetiva comprometida igual ou superior a 1 mSv, alguns fatores devem ser levados em conta, tais como:

- Fator de segurança referente à forma física, f_{fs} , baseado nas propriedades físico-químicas do material manuseado. Na maioria dos casos, o valor padrão de f_{fs} é 0,01. No entanto, em alguns casos, o valor de 0,001 pode ser utilizado, mas necessita ser justificado;
- Fator de segurança referente ao manuseio, f_{hs} , baseado na experiência da operação realizada e da forma do material;
- Fator de segurança referente à proteção, f_{ps} , baseado no uso de equipamentos de proteção no laboratório, tais como: caixa de luvas, capelas, etc.

O uso de equipamentos de proteção individual, máscaras faciais, por exemplo, não deve ser levado em conta nas decisões sobre a necessidade de se implementar a monitoração individual. Mesmo com o uso de equipamentos de proteção individual, a monitoração individual deve ser conduzida, de forma a garantir a eficiência das recomendações de proteção radiológica. Os valores para f_{hs} e f_{ps} , para uso genérico, estão apresentados nas Tabelas B1 e B2, respectivamente.

Tabela B1 – Fatores de segurança referentes ao manuseio.

Processo	Fatores de segurança referentes ao manuseio (f_{hs})
Estocagem (solução estoque)	0,01
Operações úmidas muito simples	0,1
Operações químicas normais	1
Operações úmidas complexas (risco de derramar a solução)	10
Operações secas simples	10
Manuseio de compostos solúveis	100
Operações secas e empoeiradas	100

Tabela B2 – Fatores de segurança referentes à proteção.

Medida de proteção	Fatores de segurança referentes à proteção (f_{ps})
Operações em bancada aberta	1
Operações em capelas químicas	0,1
Operações em caixa de luvas	0,01

O fator de decisão, d_j , para um radionuclídeo específico, dentro de uma determinada prática, pode ser definido pela seguinte equação:

$$d_j = \frac{A_j e(g)_{j.inh} f_{fs} f_{hs} f_{ps}}{0,001} \quad (B1)$$

onde: A_j é a atividade acumulada do radionuclídeo j , presente no local de trabalho, durante o ano;

$e(g)_{j.inh}$ é o coeficiente de dose, em Sv/Bq, para inalação do radionuclídeo j ;
0,001 deve-se à conversão de Sv para mSv.

Adotando-se o valor padrão de f_{fs} , a equação B1 pode ser simplificada:

$$d_j = 10 A_j e(g)_{j.inh} f_{hs} f_{ps} \quad (B2)$$

O fator de decisão para todos os radionuclídeos no local de trabalho, D , é dado pela equação:

$$D = \sum_j d_j \quad (B3)$$

Se D for igual ou superior a 1, é necessário implementar o Programa de Monitoração Individual Interna.

Para um único radionuclídeo manuseado em bancada aberta ($f_{hs} = 1$), em condições de operações químicas normais ($f_{ps} = 1$), com o valor padrão de f_{fs} igual a 0,01, a atividade necessária para resultar em um valor de $d_j = 1$ pode ser cinco vezes o limite de incorporação.

Nos locais de trabalho onde haja a presença de mais de um radionuclídeo, a decisão de conduzir a monitoração individual para os radionuclídeos separadamente pode-se basear nos seguintes critérios:

- Todos os radionuclídeos para os quais $d_j > 1$ devem ser monitorados;
- Quando $D > 1$, os radionuclídeos para os quais $d_j > 0,3$ devem ser monitorados;
- Para os radionuclídeos cujo d_j é muito menor que 0,1, a monitoração é desnecessária (IAEA,1999; VIDAL,2004).

ANEXO C

Remoções das formas químicas de Iodo através de líquidos e peneira molecular

C.1 – Soluções alcalinas.

Este processo é muito utilizado em indústrias de reprocessamento. São soluções de NaOH [1-2M], sem ou adicionadas a adsorvedores sólidos contendo prata. O processo é muito eficiente para capturar o iodo elementar, porém, pouco eficiente para os iodios orgânicos.

As principais formas geradas são NaI, NaIO₃ e, possivelmente, NaOI. O fator de descontaminação varia, geralmente, de 10 a 100.

Em meios contendo carbonato, a utilização de NaOH é um problema, pois ocorre precipitação do carbonato de sódio (21,5g/100g H₂O); por isso, nesse caso, o NaOH pode ser substituído pelo KOH, que apresenta alta solubilidade (100g/(100g H₂O)) do produto de carbonato de potássio (HAEFNER, 2007).

C.2 – Processo Mercurex.

Nesse processo, o iodo interage com uma coluna que contém uma solução ácida de nitrato de mercúrio. A solução contém Hg(NO₃)₂ [0,4M] e HNO₃ [14M]. A solução reage tanto com o iodo elementar, quanto com as formas orgânicas de iodo. As reações químicas são:

Iodo elementar:



Iodo orgânico:



O processo de limpeza das espécies de iodo geram compostos de mercúrio como o $\text{Hg}(\text{IO}_3)_2$ e o HgI_2 . Testes executados em Oak Ridge mostraram que o fator de descontaminação por esse processo é maior que 10^4 , para as formas químicas de iodo elementar e iodatos orgânicos. A desvantagem do método reside no fato do mercúrio ser considerado um metal tóxico, por isso, seu uso em indústrias de reprocessamento é restrito (HAEFNER, 2007).

C.3 – Processo iodox.

O processo usa uma solução de HNO_3 [20-23M] (hiperazeotrópico), que reage com o iodo, para solubilizar e oxidar compostos de iodo elementar e iodatos orgânicos. O processo foi testado, usando-se uma coluna de 10,2 cm de pirex, com 8 borbulhadores, gerando NO_2 (20-50) ppm e 2% de água com temperatura regulada entre 40 a 50 °C. Os testes indicaram um fator de descontaminação de ordem 10^4 . Os resultados da oxidação das formas de iodo são dados pelas reações químicas:



Esse processo é importante por formar um iodo pentavalente, na forma desidratada de HI_3O_8 , onde altos fatores de descontaminação podem ser alcançados, mesmo em presença de NO_2 e H_2O . Contudo, devido à alta concentração de HNO_3 , ocorrem corrosões nos condensadores, além da possibilidade de acúmulo de nitratos explosivos no fundo dos lavadores e condensadores. O processo envolve também um sistema complexo de equipamentos de controle, elevando seu custo (HAEFNER, 2007).

C.4 – Processos Eletrolíticos.

Este é uma variação do processo Iodox, sendo que, ao invés de se usar ácido nítrico, a reação é feita com [8-12M] de ácido nítrico contendo [0,1M] de cobalto. Os íons de CO^{+3} são oxidados no sistema que é gerado continuamente por meios eletroquímicos. Ambos, o iodo elementar e iodios orgânicos, são oxidados numa forma não volátil de iodo que fica retido na solução de limpeza. Testes laboratoriais indicaram um fator de descontaminação de 600 para iodo elementar e 100 para iodo metílico. Porém, estes fatores de descontaminação diminuem para 10 em presença do NO_2 (HAEFNER, 2007).

C.5 – Solventes de Fluorocarbonos.

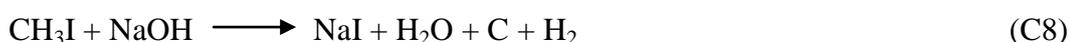
Vários trabalhos têm mostrado o desempenho dos sistemas absorvedores com fluorocarbonos em saídas de efluentes de gases, em indústrias de reprocessamento, cujo alvo principal é a captura do ^{85}Kr e do ^{14}C . Testes foram feitos com diclorofluormetano (R-12), em colunas operando a temperaturas de (-25) a 10 °F, sendo encontrado um fator de descontaminação da ordem de 10^4 , para captura de iodo elementar e iodios orgânicos. Não existem provas da diminuição do fator de descontaminação para as formas de iodios em presença de NO_2 , porém, eles ficam retidos no solvente (HAEFNER, 2007).

C.6 – Solventes contendo sílica orgânica (polidimetilsiloxano).

Nakhutin, em seu laboratório de pesquisa na Rússia, em 1980, descobriu que há retenção do iodo elementar sobre uma série de líquidos contendo polidimetilsiloxano $((\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi})_n)$. Os polidimetilsiloxano tem se mostrado resistentes a gases contendo NO_2 , porém, necessitam de uma limpeza periódica com a passagem de ar quente (90°C), para remover os óxidos nítricos e extrair a solução alcalina contendo iodo. Foi encontrado um fator de descontaminação acima de 150 para I_2 e pequena retenção para o iodo metílico (HAEFNER, 2007).

C.7 – Dissolução com Hidróxido.

Pesquisas em Oak Ridge tem investido no uso de métodos de dissolução em meio contendo hidróxidos com adição de hidrogênio [4 %], visando-se diminuir as formas de iodo do ar liberadas para o meio ambiente. Os principais hidróxidos são: NaOH e KOH, encontrando-se um fator de 96 % de remoção de I₂. As reações com hidróxido de metais alcalinos são:



Nenhum trabalho reporta a eficiência da reação química para o iodo metílico, porém, cálculos termodinâmicos favorecem a reação C.8 para o iodeto de metila (HAEFNER, 2007).

C.8 – Absorvedor sólido conhecido como *peneira molecular* (Zeólitas de prata).

O uso do nitrato de prata como base de adsorvedores tem recebido atenção na Europa e no Japão. Já os Estados Unidos têm focado o desenvolvimento de vários tipos de zeólitas de prata para captura de iodo. As zeólitas de prata são produzidas na troca iônica do sódio de zeólitas naturais (AgX) com prata, também conhecida como faujasite, que é seu nome comercial. As zeólitas são baseadas em misturas de SiO₂ e Al₂O₃ e a razão entre seus componentes distingue os diferentes tipos de zeólitas. Quanto menor for a razão entre SiO₂:Al₂O₃, melhor será sua capacidade de absorção, que está intimamente relacionada com a capacidade de troca iônica (maior quantidade de átomos de prata). A combinação de absorção física e adsorção química variam com o tipo de zeólita, sendo responsável pela melhor captação de iodo, na busca por um mecanismo mais eficaz. A reação que ocorre com a zeólitas é:



Supondo-se que a prata possa ser substituída diretamente pela mesma porção de sódio da estrutura da zeólita ($x\text{Na}_2\text{O}\cdot y\text{Al}_2\text{O}_3\cdot z\text{SiO}_2$), a maior vantagem das zeólitas é a propriedade de não ser inflamável, devido ao alto ponto de ignição (300 °C) e baixo risco de explosão. Muitos estudos têm sido executados com essas zeólitas (PENNYCOCK, 1972; JOLLEY, 1984; PARK, 2000).

Os adsorvedores AgX têm mostrado altos fatores de descontaminação para ambos: iodo elementar e iodados orgânicos, entre 10^3 e 10^5 . Os resultados dos testes com esses substratos, sob altas umidades, não tem apresentado efeitos relevantes sobre a captação do iodo elementar, porém, para os iodados orgânicos, diminuem consideravelmente. Para minimizar este efeito, calor é adicionado ao sistema, aumentando-se a temperatura para 150 °C, diminuindo, assim, a umidade. Em relação à concentração de NO_2 [$> 2\%$] no ar, a remoção de iodo elementar não se altera, porém, a presença desse gás no ar diminui significativamente a captação de iodados orgânicos. Sendo assim, os adsorvedores de zeólita AgX não são resistentes aos ácidos H_2S e SO_2 e, por isso não são aplicados nas práticas que apresentam liberação de gases com esses contaminantes e, também, em altas concentrações de NO_2 (HAEFNER, 2007).

A influência da radiação gama na eficiência de remoção das zeólitas de prata foi examinada em doses de 10^6 a 10^7 Gy. A pré-irradiação não causou nenhuma alteração significativa na eficiência de remoção, contudo, um suave declínio foi observado, quando o material era irradiado durante a carga ou depois da purgação. Esse efeito foi observado ser bem maior com o carvão ativo nas mesmas condições (EVANS, 1972).

Mordenites (Zeolons) são classes de zeólitas sintéticas que apresentam uma razão de Si:Al muito maior que os da classe da Faujasite, podendo chegar a uma razão de 10 e apresentar uma estrutura química de $(\text{Na}_2\text{O})\cdot(\text{Al}_2\text{O}_3)\cdot(\text{SiO}_2)_{10}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

As formas sintéticas também podem ser feitas, com pequenos tamanhos de poros e grande área superficial, que podem ser úteis para cada tipo molecular a ser adsorvido. A alta estabilidade química dessas zeólitas gera substratos de alta resistência aos ácidos, sendo conhecida comercialmente como AgZ, que apresenta 15 % wt de prata, áreas superficiais de $400\text{ m}^2/\text{g}$ e estabilidade térmica acima de 500 °C. Para alcançar alta capacidade de adsorção do iodo, a zeólita AgZ precisa ser ativada, reduzindo-se o óxido

de prata para prata elementar Ag^0Z com fluxo de gases de hidrogênio à 500 °C. A AgZ perde sua eficácia de adsorção química em presença de NO_2 . A zeólita AgZ é mais vantajosa que a AgX devido a alta resistência a ácidos.

A principal vantagem das zeólitas carregadas com prata é a capacidade de poder ser regenerada, o que seria impossível com os substratos que usam nitrato de prata como impregnante. A regeneração das zeólitas é feita com um gás de purga a 500 °C contendo hidrogênio. A AgX mostra uma redução de 50 % na capacidade de regeneração, após 5 ciclos, enquanto que, AgZ mostra uma redução de 20 %, após 13 ciclos de regeneração. Os estudos mostraram que o iodo reage muito ativamente com o hidrogênio sob altas temperaturas formando HI (HAEFNER, 2007).

ANEXO D

Fundamentos de Mecânica de Fluidos (FOX, 2004)

D - Fenômeno de Transporte.

O estudo de fenômenos de transporte tem diversas aplicações e é de extrema importância para estudos de engenharia, pois permite estabelecer as características de escoamento de fluidos através do transporte de massa ou energia em canais, tubulações, além da quantificação da dissipação de calor em motores. O estudo dos fenômenos de transporte é indispensável para o projeto, operação e otimização de processos e equipamentos, em todos os campos da engenharia.

Os fenômenos de transferência tratam basicamente da movimentação de uma grandeza física de um ponto a outro do espaço, a saber: transporte da quantidade de movimento, transporte de energia térmica e transporte de massa. A seguir, são apresentados alguns exemplos das aplicações de fenômenos de transporte:

Engenharia Civil e Arquitetura: hidráulica, hidrologia e conforto térmico de edificações;

Engenharia Sanitária e Ambiental: estudo da difusão de poluentes e tratamento de resíduos;

Engenharia Elétrica e Eletrônica: cálculos da dissipação térmica e de potência;

Engenharia Química: todas as operações unitárias;

Engenharia Mecânica: usinagem, tratamentos térmicos, máquinas hidráulicas, máquinas térmicas (motores e refrigeração) e aeronáutica (aerodinâmica);

Engenharia de Produção: otimização de processos, transporte de fluidos e de material, troca de calor e estudos de ciclo de vida.

D.1 – Conceitos fundamentais de fluidodinâmica.

Os fluidos são definidos como qualquer substância capaz de fluir como os líquidos e os gases e que não resiste de maneira permanente às mudanças de forma

provocadas pela pressão, isto é, se deforma continuamente (escoa) sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento tangencial, conforme mostra a figura D1.



Figura D1 – Escoamento de um fluido sob a ação de uma força tangencial.

Pode-se considerar o fluido como um meio contínuo, isto é, uma substância que pode ser dividida em infinitas partes, sem apresentar vazios. Independe do comportamento individual de cada partícula, com o efeito macroscópico mensurável de um conjunto de partículas.

Os fluidos podem ser classificados como:

- Compressíveis ou incompressíveis (sob o efeito da pressão),
- Dilatáveis ou indilatáveis (sob o efeito da temperatura).

D.1.1 – Hipótese do Contínuo.

O comportamento dos fluidos é explicado por sua estrutura molecular, a qual se mantém coesa pela atração entre as partículas elementares que a compõem e que fornecem sua mobilidade. Se uma estrutura molecular for ampliada serão vistos imensos vazios entre as moléculas. Isto gera dificuldades matemáticas, principalmente, para o cálculo diferencial. Isto é, a derivada de uma função só pode ser calculada num ponto, se a função for contínua naquele ponto. Para contornar essa situação, a hipótese do contínuo foi formulada, que admite a matéria contínua nas condições normais da engenharia, permitindo a aplicação das ferramentas utilizadas em cálculo diferencial e integral, anteriormente, válidas para sistemas contínuos. Mesmo assim, não deve ser aplicada para gases rarefeitos, como nos estudos com plasma ou em vôos no limite da atmosfera.

D.1.2 – Massa específica ou Densidade (ρ).

A massa específica de um fluido (também conhecida como densidade) é definida como a quantidade de matéria contida num certo volume de fluido.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (\text{D1})$$

Esta propriedade é utilizada normalmente para caracterizar a massa de um fluido. Pode-se inferir por meio das definições dadas anteriormente que, um fluido incompressível e não dilatável (tal como os líquidos), apresentam massa específica constante com a temperatura e com a pressão. Já para um fluido compressível e dilatável, a massa específica é uma função da temperatura e da pressão.

D.1.3 – Volume específico (V_e).

O volume específico é definido como o volume ocupado por unidade de massa. Assim, o volume específico é o recíproco da massa específica, ou seja:

$$V_e = \frac{\text{volume}}{\text{massa}} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{D2})$$

D.1.4 – Peso específico (γ).

O peso específico de uma substância, designado por γ , é definido como o peso dividido por volume. Assim, o peso específico pode ser obtido pelo produto da massa específica, dividido pela aceleração da gravidade. Então:

$$\gamma = \frac{G}{\text{volume}} = \frac{mg}{\text{volume}} = \rho g \quad (\text{D3})$$

D.1.5 – Pressão média (P) e Tensão de cisalhamento média (τ_s).

A pressão pode ser definida pelo quociente de uma força de módulo constante, perpendicular a uma superfície sujeita à sua ação, dividida pela área dessa superfície. A tensão de cisalhamento é a força aplicada sobre um corpo sólido, por unidade de área, e que provoca o deslocamento lateral, paralelamente a si mesmo, de um plano do corpo.

$$P = \frac{F_n}{A} \quad (D4)$$

$$\tau_s = \frac{F_\tau}{A} \quad (D5)$$

onde: F_n é a força normal;

F_τ é a força tangencial;

A é a área.

Considere uma força aplicada contra a superfície de um fluido e decomposta numa direção perpendicular à superfície (F_n) e numa direção tangencial ao fluido (F_τ), conforme a figura abaixo.

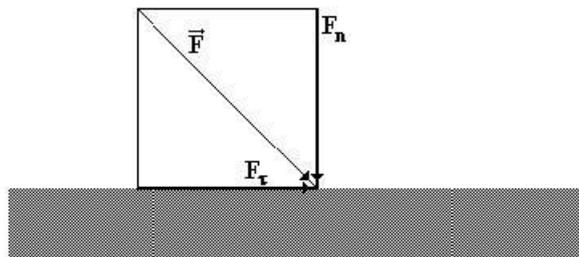


Figura D2 – Decomposição de uma força em suas componentes tangencial e normal.

D.1.6 – Reologia.

Reologia é o ramo da física que estuda a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria, ou seja, é o estudo das mudanças na forma e no fluxo de um material, englobando todas essas variantes. Na mecânica dos fluidos, a reologia estuda

as propriedades físicas que influenciam o transporte de quantidade de movimento num fluido. A viscosidade é a propriedade reológica mais conhecida e a única que caracteriza os fluidos newtonianos.

D.2 – Princípio da aderência.

Este princípio afirma que as partículas de fluido que estão juntas a um contorno sólido (camada limite) apresentam a mesma velocidade do contorno (corpo) sólido. Portanto, se o fluido estiver em contato com o corpo sólido em repouso, a camada limite (isto é, o fluido adjacente) também estará em repouso.

D.2.1 – Perfil de um fluxo tubular.

Um problema clássico é o escoamento induzido entre duas placas, uma inferior fixa e uma superior movendo-se uniformemente com velocidade V , como mostra a Figura D3. Aplicando-se o princípio da aderência à experiência das duas placas, chegamos a um perfil esboçado na Figura D3. Neste perfil, vemos que a velocidade do fluido junto à placa fixa a velocidade é nula e junto à placa móvel, a velocidade é máxima.

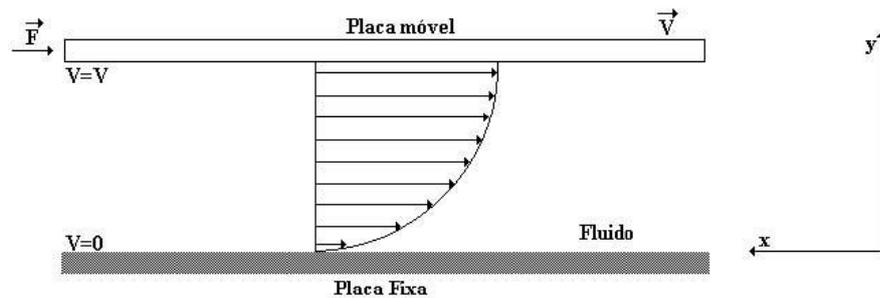


Figura D3 – Experiência das duas placas planas.

Conclui-se assim, que o perfil de fluxo tubular descreverá sempre a trajetória de uma parábola, apresentando uma velocidade máxima no centro do tubo e tendendo a zero a velocidade nas extremidades (paredes).

D.3 – Lei de Newton da viscosidade.

Newton realizou o experimento das duas placas planas e verificou que ao aplicar a força F na placa superior (móvel), esta era inicialmente acelerada até adquirir uma velocidade constante, o que permitiu concluir que o fluido aplicava a placa uma força contrária ao movimento e de mesma intensidade. Após a realização de vários experimentos laboratoriais, chega-se a equação D6.

$$\tau = \mu \left(\frac{dV}{dy} \right) \tag{D6}$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento,

μ é a viscosidade absoluta ou dinâmica e

dV/dy é o gradiente de velocidade.

D.3.1 – Viscosidade.

É a resistência que um fluido oferece ao escoamento e que se deve ao movimento relativo entre suas partes, isto é, um atrito interno de um fluido (para os fluidos, a viscosidade é o análogo da fricção, assim pode-se pensar que a viscosidade é a mediada do atrito do fluido). Pode-se inferir que quanto maior a viscosidade, menor a velocidade em que o fluido se movimenta. Normalmente a pressão tem pouca influência sobre a viscosidade. É interessante ressaltar que nos fluidos líquidos a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Já a viscosidade dos gases tende a aumentar com o aumento da temperatura.

Newton também verificou que, em alguns fluidos, não havia uma proporcionalidade constante entre o gradiente de velocidade e a tensão de cisalhamento. Aos fluidos cuja proporcionalidade é verificada damos o nome de fluido newtoniano. Os demais fluidos recebem diferentes nomes dependendo do comportamento, como se pode verificar no diagrama reológico através da figura D4.

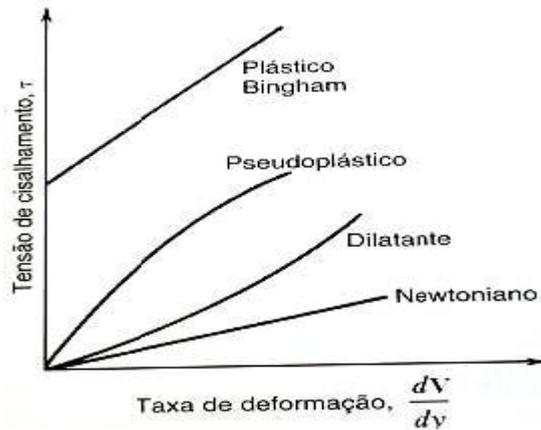


Figura D4 – Classificação de fluidos em função da tensão de cisalhamento.

D.4 – Fluidos não-newtonianos.

Fluidos que não seguem a lei de Newton da Viscosidade são chamados não-newtonianos e são tratados em livros sobre reologia. Um fluido que se dilata aumenta a resistência ao escoamento com o aumento da tensão aplicada. Alternativamente um fluido pseudoplástico diminui a resistência ao escoamento com o aumento da tensão. Já o plástico de Bingham requer um valor finito de tensão antes de começar a escoar. Um exemplo de um fluido com limite de escoamento é a pasta de dentes, que não escoará do tubo até que uma tensão finita seja aplicada, espremendo o tubo.

Outros exemplos de fluidos não-newtonianos são as tintas, graxas, plásticos, chocolates, iogurtes, petróleo, lamas de perfuração, mel, ovos, leite, entre outros.

D.5 – Difusão.

A difusão é um fenômeno comum na natureza e ocorre, em geral, quando um sistema encaminha-se para o estado de equilíbrio. Em um processo de difusão num conjunto de elementos que se movem: energia, momento linear, átomos, moléculas, produtos químicos, células, animais, etc; Cada elemento realiza uma trajetória randômica. Como resultado desse movimento individual altamente irregular, o conjunto se difunde. Num nível macroscópico, este comportamento coletivo, contrastando com o

movimento individual microscópico, apresentam grande regularidade e segue leis dinâmicas bem definidas, conhecida pela Lei de Fick.

D.5.1 – Lei de Fick.

Através de várias experiências nota-se, por exemplo, que ao, abrir um frasco de perfume ou de qualquer outro líquido volátil, pode-se senti-lo rapidamente em um recinto fechado. Diz-se que as moléculas do líquido, depois de evaporar, se difundem pelo ar, distribuindo-se em todo o espaço circundante. O mesmo ocorre ao se colocar um pouco de açúcar em um vaso de água; as moléculas de sacarose difundem-se por toda a água. Estes e outros exemplos mostram que, para que aconteça o fenômeno da difusão, a distribuição espacial de moléculas não deve ser homogênea, devendo existir uma diferença, ou gradiente de concentração, entre dois pontos do meio.

Suponha que a concentração varia com a posição ao longo do eixo “x”. Seja J a densidade de corrente das partículas, logo, o número efetivo de partículas, que atravessam na unidade de tempo uma área unitária perpendicular à direção, a qual terá lugar a difusão. Segundo a lei de Fick, pode-se afirmar que a densidade de corrente das partículas é proporcional ao divergente da concentração, conforme representa a equação D7.

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x_i} \tag{D7}$$

A constante de proporcionalidade é denominada coeficiente de difusão D, que é característico, tanto do soluto, como do meio no qual se dissolve.

D.6 – Número de Peclet, P_e .

O número de Peclet é um número adimensional que relaciona a velocidade de difusão de um fluxo dispersivo e caracteriza o tipo de mistura. Quando ele tem valor próximo de 1, caracteriza uma mistura perfeita; quando apresenta um valor superior a

100, caracteriza um fluxo tipo pistão, e quando o valor é intermediário, entre 1 e 100 este fluxo é caracterizado como um escoamento não-ideal (turbulento). O número de Peclet é igual ao inverso do número de dispersão, sendo definido pela equação D8.

$$P_{\varepsilon} = \frac{1}{N_d} = \frac{vL}{D} \quad (D8)$$

onde: D é o coeficiente de dispersão axial ou longitudinal (cm^2/s);

N_d é o número de dispersão;

v é a velocidade média (cm/s);

L é o comprimento característico descritivo da geometria do campo de escoamento (cm).

D.7 – Número de Reynolds, R_e .

Outra constante adimensional que também caracteriza um fluxo é chamada de número de Reynolds, R_e , que é a razão entre as forças de inércia e a viscosa. Escoamentos com grande número de Reynolds, acima de 4.000, são, em geral, turbulentos. Aqueles em que as forças de inércia são pequenas, menores que 2.100, em comparação com as forças viscosas, são tipicamente escoamentos laminares. E é dito intermediário, para R_e entre 2.100 e 4.000. A equação D9 define o número de Reynolds.

$$R_{\varepsilon} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (D9)$$

onde: ρ é a densidade do fluido (g/cm^3);

v é a velocidade média do fluido (cm/s);

d é o diâmetro do tubo (fluxo tubular) (cm);

μ é a viscosidade dinâmica do fluido (N.s/cm^2).