

USO DAS TÉCNICAS DE RADIODTRAÇADORES E DE CONTAGEM TOTAL EM
MEDIDAS DE VAZÃO DE SISTEMAS ABERTOS

Vitor Santos Ramos

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

Aprovada por:

Profa. Verginia Reis Crispim, D.Sc.

Dr. Luís Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Profa. Rose Mary Latini, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

RAMOS, VITOR SANTOS

Uso das técnicas de radiotraçadores e de contagem total em medidas de vazão de sistemas abertos. [Rio de Janeiro] 2006

IX, 79 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia Nuclear, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Traçadores Radioativos
2. Funções DTR
3. Técnicas Nucleares
4. Contagem de atividade total
5. Vazão em sistemas complexos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

"O valor das coisas não está no tempo que elas duram,
mas na intensidade com que acontecem. Por isso,
existem momentos inesquecíveis, coisas
inexplicáveis e pessoas incomparáveis".

É neste contexto que dedico este
trabalho aos meus pais, Jorge
e Cilea, por minha formação
e carinho, a Robson e Isis,
estimados irmãos e ao
meu afilhado Renan.

“O êxito nas tarefas a que você se propôs,
depende da persistência com que
estão sendo levados avante seus
empreendimentos”.
(Jacques Gamier)

AGRADECIMENTOS

“Todas as realizações não dispensam as participações das grandes e das aparentes pequenas contribuições, que em última análise lhe são fundamentais. A melhor engrenagem pode desarticular-se quando alui o modesto parafuso”.

Concordando integralmente com estas idéias é dever manifestar meus agradecimentos a todos aqueles que tornaram possível à realização deste trabalho.

Primeiramente agradeço a DEUS pela oportunidade dada a mim de poder aprender.

A minha namorada Maria Luisa, pelo apoio e principalmente pela tolerância, por todos os fins de semana dedicados ao trabalho e momentos em que não pude estar presente.

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

Aos orientadores, Prof^a. Vergínia Reis Crispim, pela oportunidade que me deu para fazer parte deste grupo de pesquisa, por sua orientação e dedicação, diligente e segura, na realização desta dissertação; e ao Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, crítico contundente e amigo de todos os momentos, presente constantemente orientando as diretrizes dessa dissertação. Grande foi o privilégio de aprender com estes grandes pesquisadores.

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

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

Ao amigo Ricardo Candeiro, pelo auxílio e apoio em laboratório.

A CAPES, que me concedeu a bolsa de Mestrado, sem a qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

A todos os meus amigo(a)s e àqueles que direta ou indiretamente tenham colaborado com o meu trabalho.

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

USO DAS TÉCNICAS DE RADIODTRAÇADORES E DE CONTAGEM TOTAL EM MEDIDAS DE VAZÃO DE SISTEMAS ABERTOS

Vitor Santos Ramos

Março/2006

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão

Programa: Engenharia Nuclear

Diversas metodologias são usadas para medir a vazão de canais e rios, sendo a mais versátil a técnica da “Contagem Total”, que utiliza traçadores e cuja principal vantagem é ser independente das características geométricas do meio. O objetivo do trabalho foi desenvolver esta metodologia empregando radiotraçadores e medir vazão em sistemas complexos (divergentes e convergentes), comparando os resultados com a já estabelecida metodologia do Transiente de Tempo. A técnica de Contagem Total baseia-se na adição no meio do radiotraçador, com atividade definida, registrando-se a passagem da nuvem radioativa através de um detector cintilador de Iodeto de Sódio (2”x 2”). As medidas foram efetuadas em um duto parcialmente preenchido (75 mm de diâmetro interno) e usando-se o radiotraçador ^{140}La (atividade média em torno de 5,8 k Bq) para vazão de alimentação variando de 0,8 a 8,0 litros por minutos. Encontrando erros relativos nas medidas experimentais de vazão para a técnica do transiente de tempo 1% e para a técnica de contagem total de até 14% referentes ao valor teórico.

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

USE OF THE RADIOTRACER TECHNIQUES AND TOTAL COUNTING IN
MEASURING THE OF OUTFLOW OF OPEN SYSTEMS

Vitor Santos Ramos

March/2006

Advisors: Verginia Reis Crispim

Luís Eduardo Barreira Brandão

Department: Nuclear Engineering

Many methodologies are used to measure the outflow of canals and rivers; the most versatile technique used is "Total Counting", which uses tracers and whose main advantage is its independence from the geometric characteristics of the medium. The purpose of the paper was to develop a methodology using radiotracers to measure outflow in complex systems (divergent and convergent), and compare the results with the already established methodology of Time Transient. The technique of Total Counting is based on the addition of radiotracer, with defined activity, in the medium register the radioactive cloud through a Sodium Iodide detector scintillator (2"x 2"). The measurements were taken in a partially filled duct (75 mm of diameter inside) and using the radiotracer ^{140}La (activity measured around 5.8 kBq) for outflow feeding varying of 0.8 to 8.0 liters per minutes. Finding relative errors in the experimental measurements discharge in relation to the theoretical value was 1%, with the Time Transient Technique and 13% with the Total Counting Technique.

ÍNDICE GERAL

	Página
1. Capítulo I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
I.1 – Generalidades	1
I.2 – Revisão Bibliográfica	3
I.3 – Objetivo	10
2. Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
II.1 – Traçadores	12
II.2 – Medidas de Vazão	18
II.2.1 – Metodologia da injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo	23
II.2.2 – Metodologia da injeção instantânea pela técnica de Contagem Total	24
II.3 – Calibração dos detectores de NaI	31
II.4 – Técnica de Estímulo-Resposta	39
II.5 – Funções distribuição do tempo de residência (DTR)	41
3. Capítulo III: MATERIAIS E MÉTODOS	44
III.1 – Calibração de detectores cintiladores NaI	44
III.1.1 – Determinação da eficiência de fotopico	45
III.2 – Sistema de aquisição e de análise de dados	45
III.3 – Preparação dos traçadores radioativos	48
III.4 – Projeto e construção da unidade para a determinação da atividade total da amostra	50
III.5 – Sistema montado para a determinação do Fator de Calibração	54

III.6 – Unidade experimental destinada às medidas de vazão	55
4. Capítulo IV: RESULTADOS E COMENTÁRIOS	58
IV.1 – Ponto de operação dos detectores NaI (2”x2”)	58
IV.2 – Cálculo do ângulo sólido (Ω) e Fator Geométrico (FG)	59
IV.3 – Cálculo da eficiência de fotopico para o detector A	60
IV.4 – Cálculo da atividade usando o contador de atividade total	63
IV.5 – Fator de Calibração	64
IV.6 – Cálculo da vazão utilizando o método de transiente de tempo e o método de contagem total	66
5. Capítulo V: CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 – Generalidades.

No dia 23 de março comemora-se o dia mundial da água, contudo este bem natural não tem recebido a devida importância pela humanidade.

Estudos multidisciplinares demonstram o rápido esgotamento dos recursos hídricos naturais decorrente principalmente da urbanização que cresce sem um planejamento adequado, ocasionando uma série de desastres ambientais, contaminando águas e mananciais hídricos em virtude da liberação de esgotos clandestinos e resíduos industriais em baías, rios ou em mar aberto. Em geral, esses desastres ocorrem no Brasil, nas grandes metrópoles, tais como: Rio de Janeiro; São Paulo e Belo Horizonte, causando a poluição das águas potáveis, que resultam em prejuízo à saúde humana, podendo-se destacar, como exemplos dessa situação de descaso, os fatos citados pela imprensa nacional:

- A Baía do Rio Paraíba do Sul (São Paulo/Rio de Janeiro/Minas Gerais) é responsável pelo abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro, com mais de nove milhões de habitantes, abrangendo uma área de 55.500 km², sendo 20.900 km² no Rio de Janeiro; 13.900 km², em São Paulo; e 20.700 km², em Minas Gerais, onde estão instalados em sua proximidade mais de oito mil estabelecimentos industriais. As indústrias localizadas nas proximidades de São Paulo liberam seus resíduos nessa Baía e, quando as águas chegam ao Rio de Janeiro, já estão contaminadas por metais pesados (chumbo, mercúrio, cromo, e outros), dificultando o tratamento da água (MINC, 2004).
- O Rio Guandu (Rio de Janeiro) é o responsável pelo abastecimento de 85% de água para a população do município, entretanto, recebe também lixo urbano proveniente de áreas ribeirinhas. Lixo urbano, plásticos, vidros, pneus e metais são jogados diretamente nesse rio, variando seu nível, e, em decorrência, em períodos pluviais, ocorrem enchentes (CANAVARRO et al., 2005).

- Em Belo Horizonte, numa fábrica de papel desativada, onde existem barragens com águas tóxicas, uma delas se rompeu contaminando o Rio Pomba, afluente do Rio Paraíba do Sul (DARIANO, 2005).
- No Ribeirão de Anicuns (Goiânia), um estudo local revelou que amostras coletadas de peixes continham grandes quantidades de metais pesados, provenientes de indústrias que lançam seus resíduos no leito do rio (SILVA, 2001). Os metais pesados (chumbo, mercúrio, cromo) podem causar males à saúde, inclusive, a perda de fertilidade (VALENTE, 2005).

Assim, metodologias que venham a contribuir para o levantamento de dados técnicos que permitam estabelecer procedimentos adequados para o controle das emissões de efluentes industriais e também estudar as reais condições dos mananciais naturais são de extrema importância para a sociedade. Visando contribuir para uma melhoria das condições ambientais, o presente trabalho tem como propósito desenvolver uma metodologia que permita a medida de vazão em sistemas abertos como rios, canais de irrigação, dutos de transporte de água ou tanques de tratamento de esgoto.

Existem muitas técnicas eficazes para medidas de vazão, entretanto, cada qual tem suas restrições e aplicações. Medidas de vazão e dispersão em rios são práticas já adotadas e bem dominadas em diversos campos das ciências que estudam as condições ambientais, destacando-se como uma das mais precisas as que usam traçadores químicos (corantes) ou radioativos (radioisótopos).

O uso de traçadores em hidrologia é muito antigo, tendo sido utilizados os mais diferentes tipos de traçadores, algumas vezes adicionados diretamente na água e, em outras, aproveitando-se de determinadas substâncias nela incorporadas (conseqüência de processos naturais ou de derramamentos acidentais). Baseando-se no comportamento desses traçadores, parâmetros hidrológicos importantes podem ser avaliados, para isto, a condição fundamental é que o comportamento do material marcado seja igual ou, ao menos, muito parecido ao da água (sistema).

Os corantes são bons traçadores, porém, perdem sua eficácia, quando as propriedades do meio em estudo variam e tornam-se desfavoráveis, por exemplo:

alteração do pH, salinidade, temperatura, fotodecaimento (o traçador perde a fluorescência com a incidência de luz solar), viscosidade e opacidade do fluido. Com relação aos radioativos, sua maior problemática deve-se ao receio quanto ao uso da liberação de material radioativo no meio ambiente.

A escolha do traçador é de crucial importância, assim é necessário o estudo detalhado das características físico/químicas de cada traçador como também das propriedades do meio em que o mesmo será injetado.

Nas indústrias, também encontram-se sistemas complexos cujos volumes não são definidos, como por exemplo nos casos de dutos parcialmente preenchidos ou tanques com variação do volume, com a técnica desenvolvida neste trabalho a mais indicada por ser uma medida absoluta, além disso pode também ser utilizada para aferir e calibrar outros medidores instalados na unidade.

I.2 – Revisão Bibliográfica.

Em sistemas complexos, a medida da vazão de fluido sempre representou um desafio para a ciência, pois dispositivos mecânicos nem sempre podem ser aplicados de maneira a fornecer um resultado mais preciso. HULL (1958) com o objetivo de medir vazão em um oleoduto, utilizando-se da técnica de radiotraçadores com a metodologia de Transiente de Tempo, posicionou vários detectores ao longo do duto e verificou que, para uma mesma injeção do radiotraçador, a contagem total gerada pela passagem da nuvem radioativa registrada em cada detector não variava e relacionou a atividade injetada do radiotraçador com a contagem gerada pela nuvem radioativa, criando uma nova metodologia utilizando radiotraçadores denominada “Contagem Total”, onde a principal vantagem deste método é medir sistemas de fluxo confluentes e divergentes sem a necessidade de se predeterminar o volume. Esta técnica, patenteada por HULL (1958), se aplica às medidas de fluxos em tubulações com níveis de volume totalmente completo ou incompleto; tubulações com óleos em operações industriais; vazamentos em condensadores; e trocadores de calor em colunas de destilação, podendo, inclusive, ser utilizada em medidas ambientais, canais abertos e correntes naturais, com fluxos divergentes ou convergentes.

TAYLOR (1954) desenvolveu equações simplificadas para as medidas de fluxo (dispersão) em tubulações, considerando que a dispersão dependeria, em fluxos turbulentos, da velocidade, do raio do tubo, da velocidade de fricção e da viscosidade do fluido.

HULL (1962), com o objetivo de medir vazão com traçador em rios e sua dispersão no meio em um determinado percurso, estimou-os, por meio de algumas equações, usando o método de radiotraçador com injeção instantânea pela técnica de “Contagem total”, que envolviam parâmetros, tais como: a turbulência do rio, a velocidade da corrente média, a viscosidade e a área da seção reta do sistema.

BREG, O. et al. (1962), com uma embarcação, navegaram em alto mar com o objetivo de estudar a pluma de saída de um emissário industrial, para saber se ela chegaria a contaminar a praia e um porto local de peixes. Com o auxílio da técnica de radiotraçadores e o método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total, usando o ^{82}Br como traçador, não encontraram vestígios de traçador na praia e nem no porto, concluindo que a pluma levava os rejeitos para alto mar e lá os dispersava.

CLAYTON et al. (1959.a) mediram a precisão do método de diluição do isótopo com injeção constante, realizando dois testes com o radiotraçador ^{24}Na : o primeiro, com 0,7 mCi, e o segundo, com 2 mCi. Encontraram incertezas menores que 1%, sendo as principais fontes de erros: a estimativa incorreta da quantidade de injeção inicial do traçador; o background (radiação natural no sistema ou ruído eletrônico) deve ser coletado (medido) antes do ponto de injeção; a calibração incorreta dos instrumentos; as amostras do traçador devem ser retiradas diretamente do injetor, sendo que, quanto maior a quantidade de amostras coletadas, melhor será a precisão da medida.

CLAYTON et al. (1959.b), com o objetivo de medir a precisão do método de velocidade com injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo, usaram as equações de TAYLOR (1954), para calcular a dispersão do traçador em tubulações fechadas usando o ^{24}Na (1 mCi/ml) como traçador líquido, em tubulações de vários diâmetros e comprimentos. Concluíram que a imprecisão desse método está em torno de $\pm 1\%$, aumentando, quando não se conservam as condições da tubulação totalmente

preenchida e quando o posicionamento do primeiro detector, ocorre após uma distância mínima, que equivale a 10 vezes o diâmetro do tubo.

AGUDO et al. (1973), visando calibrar os medidores de vazão de um tanque de cloração para o tratamento de esgoto, usaram uma régua linimétrica (localizada na vertical do tanque), onde, com uma simples leitura de variação da superfície do fluido na régua linimétrica obtinha-se o valor da vazão do volume de esgoto a ser tratado, permitindo assim ao operador saber a quantidade exata para uma rápida adição de cloro. Devido às condições do meio (altamente redutor, turvo, grande quantidade de matéria sólida em suspensão), escolheram a técnica com radiotraçadores e a técnica de “Contagem-Total” (usando ^{82}Br com atividade de 10 mCi) para o cálculo de vazão. Encontraram uma vazão média de (996 ± 19) litros/s, com a injeção do traçador a 40 m do ponto de medida.

SZPILOWSKI, S. et al. (1976) avaliaram a vazão do efluente de esgotos na saída de uma indústria e os parâmetros de mistura em correntes naturais, usando a técnica de Contagem Total. Para a fase líquida, usaram o ^{82}Br como radiotraçador e, na fase sólida, o ^{198}Au e os resultados encontrados mostraram que a metodologia pode ser usada para se prever a localização de um acidente casual, assim como, se estimar o tempo de mistura em correntes naturais, demonstrando que o método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total pode ser muito utilizado para se analisar o controle de águas de emissários de indústrias: petroquímicas, metalúrgicas, usinas de açúcar e fábricas de cimento.

NAJERA, F.J. et al, (1976) calcularam a vazão, simulando canais abertos, através de vários experimentos, utilizando diversos métodos com a técnica de radiotraçadores (Injeção Contínua, Contagem Total e Transiente de Tempo), testando em modelos laboratoriais e validando cada método em fluxos de canais reais. Concluíram que todos os métodos descritos nas literaturas têm uma boa precisão, quando utilizados de maneira correta, e que os métodos citados podem ser utilizados em medidas de fluxos reais, como em canais abertos.

AGUDO et al. (1976) estudaram o tempo de trânsito sobre a carga poluidora transportada pelos rios Tietê e Pinheiros até a represa Billings, usando a técnica de

radiotraçadores e a técnica de “Contagem Total” com ^{131}I (12,5 Ci), analisando a influência das diferentes condições hidrometeorológicas. Também mediram a contribuição da vazão dos oitos principais afluentes (rios que despejam suas águas em outros), utilizando a mesma técnica, porém, marcando-os com ^{82}Br . Realizaram duas injeções de traçadores em dez pontos de medida distintos distribuídos rio abaixo e encontraram, na primeira injeção de traçadores, do primeiro ponto de medida (localiza da ponte de Guarulhos) até a estação de Pedreiras, um tempo de trânsito de 32,6h e concluíram que o tempo de trânsito é variável em cada ponto de medida devido aos afluentes. Além disso, as estações elevatórias de Pedreiras e da Traição, ao bombearem a água rio abaixo, também variaram o tempo médio de trânsito.

KUOPPAMÄKI (1977) discorreu sobre o uso de radiotraçadores em estudos de distribuição do tempo de residência, aplicado a inspeções de afluentes ou/e efluentes de esgotos, marcando a fase líquida (^{82}Br ou ^{24}Na) e a fase sólida (^{59}Fe ou ^{54}Mn), tendo como referência vários estudos realizados em campo. Utilizou a técnica de radiotraçadores, usando tanto a metodologia de Contagem total como a de Transiente de Tempo, dependendo apenas das características do meio estudado. As dificuldades nas análises foram devidas: às condições das técnicas usadas no tratamento de esgoto, à turbulência nos locais, à oxidação do traçador na fase sólida e à homogeneização do traçador no meio, causando resultados não reprodutíveis; porém, os resultados referentes à vazão dos efluentes líquidos foram sempre de boa qualidade.

ROLDÃO et al. (1989) mediram a capacidade de transporte e a dispersão de poluentes solúveis, biodegradáveis ou não, lançados pelas indústrias locais no Rio Paraíba do Sul, nos trechos de Volta Redonda – Barra do Pirai (extensão de ± 40 km), que causam prejuízos para a população ribeirinha, inclusive, a população da cidade do Rio de Janeiro. Usaram dois traçadores fluorescentes (Fluoresceína Sódica e Amidorodamina G extra), objetivando caracterizá-los quanto às suas eficácias. Para medirem o coeficiente de dispersão (K_d) e velocidade média de transporte (V_d) dos poluentes, usaram o método de injeção instantânea pela técnica de “Contagem Total”, ajustando-o ao modelo clássico de Taylor (1954). Foram realizadas quatro injeções de traçadores, em seis pontos de medida diferentes, e concluíram que o traçador nacional, o de menor custo, a Fluoresceína Sódica, respondeu bem, nos pontos localizados, após uma distância em que o traçador se homogeneizava ao meio; apesar de suas perdas por

fotodecaimento, produziu respostas semelhantes às do traçador importado (mais caro), a Amidorodamina G extra, cuja eficácia já era estabelecida. Encontraram os valores médios de $K_d = (30 \pm 3) \text{ m}^2/\text{s}$ e $V_d = (0,75 \pm 0,02) \text{ m/s}$, no percurso citado.

TUGRUL et al. (1994) compararam os erros encontrados, quando se usam as técnicas de contagem total e de transiente de tempo, e os resultados mostraram que um importante fator a ser estudado é a escolha do traçador (meia vida, custo, disponibilidade, emissão de radiação gama, energia e a natureza do radioisótopo). No método de injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo, o erro aumenta com o aumento da vazão e, no de Contagem Total, não apresentou valores confiáveis em regimes laminares, porém, o erro diminui com o aumento da vazão.

ALTINSOY et al. (1999), através do método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total, estudaram a dispersão em fluidos turbulentos em tubos, usando como traçador o ^{24}Na radioativo, em conjunto com o corante Methylene-blue. Foram feitas as medidas em três pontos distintos e, através de comparações dos resultados, usando as equações de TAYLOR et al. (1974), encontraram valores satisfatórios para o radiotraçador e desaconselharam o uso de corantes em águas poluídas.

THOMAS (2002) discutiu os benefícios das práticas usando radiotraçadores e do programa de padronização de normas, dentro do campo de medidas de fluxo de canais abertos, com base nas ISO's (TC/113; TR/8363) existentes.

GODLEY (2002) desenvolveu técnicas que permitem medir o fluxo em tubulações fechadas. Godley descreveu cada uma das informações reportadas pela ISO Technical Report 9824 (1990). Adotou métodos tradicionais: volumétrico com sensores; traçadores com o método de diluição (Gauging structure); uso de ultra-sons (Doppler e Cross Correlation); eletromagnéticos (Local Velocity Sensor, Pré-fabricated coil assemblies, Spool Piece Sensors); métodos sem contato (Radar e Óptico) e outros (Variable gate meter, Flow-stick e Full-bore meter e Tipping bucket flowmeter).

TUGRUL et al.(2002) modificaram a técnica de Contagem total (Método de Balanço do Radiotraçador) de Hull, acrescentando uma correção ao fator de

retroespalhamento na investigação do estudo. Com isso, conseguiram diminuir os erros percentuais nas medidas de vazão.

ROLDÃO et al. (2003), a pedido da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, avaliaram a capacidade de dispersão transversal do rio Paraíba do Sul e validaram um programa computacional desenvolvido para simulações sobre a dispersão de poluentes no trecho a 5 km das proximidades do emissário da CSN. Usaram a técnica de injeção contínua de traçadores corantes (12 kg de Amidorodamina G e 8 kg de Fluoresceína Sódica). Com o auxílio de um registrador “datalogger” e de um fluorímetro, registraram a passagem da nuvem de traçador, numa embarcação. Levantaram-na também com um GPS (Global Positioning System) nas secções transversais do rio. Registraram ainda, com um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), a distribuição transversal e vertical da velocidade da nuvem nas diversas secções. Fixaram nove pontos de medida, ao longo do percurso do rio, a partir do emissário. Encontraram uma mistura do traçador no meio, após uma distância de 4750 m, a partir do ponto de lançamento do traçador, numa concentração média de $1,75 \text{ mg/m}^3$, com aproximadamente 10% de variação de uma margem a outra. Com os dados obtidos elaboraram um programa de simulação de acidentes. Apesar de ser uma técnica bastante versátil e prática para aplicações em campo, a metodologia exige o conhecimento preciso da atividade total inserida no meio em estudo, assim para que os resultados das medidas experimentais tenham uma precisão adequada é necessário que todo o sistema de contagem seja previamente calibrado.

No processo de calibração dos detetores são necessários o levantamento do ponto de operação e a medida da eficiência para o cada um dos detetores empregados, foram utilizadas as metodologias de calibração sugerida por: TSOLFANIDIS (1983), para o cálculo do ângulo sólido, fator geométrico e eficiência; MAFRA (1973), para o cálculo da atividade; e KNOLL (1989), para a calibração dos detectores.

Para o cálculo da atividade total a ser inserida um fator importante é o conhecimento do fator geométrico do sistema de contagem, ou seja, a medida do ângulo sólido do conjunto fonte/detector.

OBLOZINSKY et al. (1971) apresentaram uma equação para calcular o ângulo sólido entre uma fonte em forma de disco e detector também em forma de disco, variando a posição de ambos, a equação desenvolvida permite variar-se o raio da fonte, o raio do detector, e as distâncias entre eles.

JAFFEY, A.H., (1954) apresentou novas equações para o cálculo do ângulo sólido definido geometricamente pela fonte e as posições radiais dos detectores, apresentando os valores de ângulo sólido para diversas geometrias entre fonte e detectores.

GARDNER et al. (1969) apresentaram uma equação para calcular o ângulo sólido de uma fonte pontual e um detector em forma de disco circular, onde foram considerados: o raio do detector, altura e distância entre a fonte e o detector.

RUBY et al. (1968) apresentaram o cálculo do ângulo sólido para um detector com face circular colinear a uma fonte circular, empregando o método de funções Bessel e método Monte Carlo. Foram usadas diversas geometrias, variando-se a distância entre fonte/detector e o tamanho da face do detector. O método de Monte Carlo apresentou pequena vantagem devido à facilidade de se empregar geometrias mais complexas.

TIWARI et al. (1966) calcularam a eficiência de fotopico total para uma fonte cilíndrica, através de um detector cintilador de poço NaI(Tl) montado em uma unidade completamente blindada de chumbo, com energia de fonte variando de 0,14 MeV até 2,75 MeV. Apresentaram curvas de eficiência para vários filtros de absorvedores (ar, cobre, chumbo e latão) com erros relativos às eficiências de até 5%.

CARVALHO, M.R et al. (1996) apresentaram metodologia para calcular o fator geométrico e demonstraram a relação da variação desse fator para tipos distintos de fontes (pontual, circular, cilíndrica).

BEAM, G.B et al (1978) calcularam a eficiência intrínseca de um detector cintilador cilíndrico [NaI(Tl) 2"x2"], utilizando fontes pontuais com energias variadas de 0,2 a 1 MeV. Comparou seus resultados experimentais com os gerados por simulação

pelo método de Monte Carlo, encontrando erros relativos ao método de Monte Carlo entre 1% a 4%.

UOSIF et al. (2004), calcularam a eficiência, através da placa de multicanal da Canberra, usando o programa de análise de espectros Genie-2000, para diversos detectores cintiladores NaI(Tl), sendo quatro de 2"x 2" e um de 3"x 3", variando a posição da fonte de 1 a 8 cm, para energias de 0,356, 0,662, 1,17 e 1,33 MeV, comparando a eficiência experimental ao ajuste pelo modelo de Weibull, chegando a valores precisos para a eficiência.

I.3 – Objetivo.

A técnica aplicada neste trabalho, “Contagem Total”, permite medir vazão em sistemas onde não se tem um volume definido, como por exemplo em rios, canais e estuários, e também em situações de sistemas de fluxo confluentes (fluxos adicionais ao sistema principal) e fluxos divergentes.

A técnica permite a utilização de traçadores na forma sólida, líquida ou gasosa e baseia-se na injeção instantânea do traçador que, após uma distância em que este se homogeneiza ao sistema, é registrado pelos detectores cintiladores NaI. A vazão é encontrada pela relação entre a contagem total gerada pela nuvem do traçador, com a concentração inicial do traçador injetado.

Como objetivos do trabalho de pesquisa temos:

- a. Desenvolver uma metodologia que permita efetuar medidas de vazão em sistemas abertos pela técnica de Contagem Total.
- b. Construir uma unidade para medir a atividade total para uma amostra de radioisótopo conhecido.
- c. Comparar as metodologias de Contagem Total e Transiente de Tempo.
- d. Verificar a aplicação da técnica, medindo-se a vazão em dutos parcialmente preenchidos.

Este trabalho está subdividido em capítulos, onde, no capítulo II, são apresentados os fundamentos teóricos apresentando as diversas técnicas existentes para medidas de vazão, salientando as vantagens e restrições de cada uma delas. No capítulo III, é descrita a metodologia usada, assim como os materiais usados. O capítulo IV contém os resultados das análises. No capítulo V, encontram-se as conclusões deste trabalho e também sugestões que poderiam melhorar o desempenho da técnica.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1 – Traçadores.

Quando se deseja estudar as características de perfil de deslocamento de fluidos em sistemas simples ou complexos, a mais indicada é a técnica de traçadores, que consiste em adicionar um material previamente marcado no sistema e observá-lo se deslocando pelo meio.

Para que a informação do comportamento do traçador (população marcada) no meio represente as reais condições do fluxo principal, é necessário que as propriedades físico/químicas e hidrodinâmicas do traçador escolhido sejam similares aos da população principal. Além disso, as características do sistema, tais como o ponto de inserção do traçador, a localização dos pontos de medida e a geometria de detecção sejam bem definidas.

Para que o traçador seja considerado ideal, para o uso em diversos tipos de sistemas, são requisitos importantes as seguintes condições (IAEA, 1966):

- não deve produzir reações com o meio que venham interferir em sua posterior identificação;
- não deve ser absorvido e/ou adsorvido pelos materiais sólidos do meio;
- no caso de traçadores iônicos (íon cloreto), não devem ser produzidos fenômenos de troca com os átomos do mesmo tipo existentes no meio;
- a quantidade de traçador a ser usada em uma experiência não deve modificar de forma significativa as características do meio, tais como: densidade, viscosidade e temperatura, para não provocar alterações no fluxo natural;
- os fenômenos de dispersão e difusão do traçador no meio devem ser iguais aos da população local;
- no meio, não se deve ter quantidades detectáveis do traçador a ser adicionado, isto é, ter concentrações tão baixas, que não interfiram nos resultados;

- deve ser facilmente solúvel no meio;
- deve permitir fatores de diluição bastantes elevados, isto é, com uma quantidade de traçador razoavelmente pequena para marcar volume muito grande do meio;
- não deve contaminar o meio por períodos muito grandes, evitando-se interferências em outras experiências futuras;
- deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo para os seres vivos.

Pode-se classificar os traçadores em duas categorias: traçadores naturais e os artificiais (os químicos não isotópicos, os corantes fluorescentes e os radioativos).

Naturais são os traçadores que já estão no meio onde é realizado o estudo, podendo ser inclusive proveniente de um acidente e, dessa forma, não apresentam custo financeiro devido a já existirem no meio. Como traçadores naturais, destacam-se: Isótopos (^{14}C , ^3H , ^2H , ^{18}O), Químicos (detergentes, cloreto de sódio, fenóis, ácido bórico, Terras Raras) e Biológicos (algas, bactérias).

Artificiais são normalmente empregados no estudo de pequenas regiões ou em ensaios de curta ou média duração, sendo a injeção do traçador feita de forma intencional e controlada. A medição do traçador é normalmente fácil de ser realizada no campo e no laboratório, porém, o custo financeiro do traçador pode ser significativo. São os traçadores mais utilizados, para estudo no meio ambiente e nas aplicações industriais, podendo ser de três tipos: os químicos não isotópicos, os corantes fluorescentes e os radioativos.

• **Traçadores Químicos não isotópicos:**

O uso desse tipo de traçador consiste em adicionar uma quantidade mensurável de compostos com propriedades específicas no meio, e através de análises físico/químicas, identificá-los, na medida que se deslocam pelo sistema estudado. Alguns exemplos de traçadores químicos não isotópicos são: cloreto de sódio, fenóis,

ácido bórico, detergentes, Terras Raras. Um dos mais aplicados é o cloreto de sódio, pois a retenção do íon cloreto em sedimentos sólidos do meio é praticamente inexistente, constituindo-se assim num traçador ideal. Além disso, sua determinação analítica em amostras de água é simples, porém, também apresenta o inconveniente de se encontrar presente na água, dificultando a análise dos resultados. Quando sua concentração natural é elevada, torna-se necessário juntar-se grandes quantidades, alterando-se consideravelmente as características do meio em estudo, por isso, não é viável a utilização do cloreto de sódio como traçador em águas salgadas, (DUARTE, 1973).

• **Traçadores Corantes Fluorescentes:**

O uso desse tipo de traçador consiste em se adicionar uma quantidade mensurável de corante com propriedades fluorescentes no meio. Através de amostras coletadas distantes do ponto de injeção e usando-se de técnicas fluorimétricas, deve-se medir a concentração do traçador em cada amostra, levantando-se assim uma curva de concentração em função do tempo, que representa a passagem da nuvem de corantes no ponto de coleta. A fluoresceína de Sódio (Uranina) é o colorante mais empregado, tendo o inconveniente de se decompor com certa facilidade pela ação das argilas, matérias orgânicas e óxido de ferro. Sua limitada solubilidade na água exige o uso de grandes volumes de soluções traçadoras.

Os traçadores corantes fluorescentes apresentam inconvenientes quanto à variação na fluorescência, devido a alterações nas características do meio, pois mudanças na temperatura, no pH e na salinidade alteram as características do traçador. As solubilidades dos traçadores fluorescentes e salinos são mostradas na tabela II.1 e tabela II.2, respectivamente.

Tabela II.1 - Tabela de solubilidade dos principais traçadores corantes fluorescentes (BENISCHKE, 1989).

Traçador:	Solubilidade (g/l)
Uranina	500
Eosina	300
Rhodamina B	15
Pyranina	178

Tabela II.2 - Tabela de solubilidade dos principais traçadores salinos (DUARTE, 1973).

Traçador:	Solubilidade (g/l)
Cr ₂ O ₇	600
NaI	>1.500
NaCl	300-400
MgSO ₄	500
NaNO ₃	75
LiCl	600

• **Traçadores Radioativos:**

Devido às propriedades de penetração da radiação, são os mais utilizados, quando se trabalha com sistemas onde não se tem acesso fácil. O uso desse tipo de traçador baseia-se na adição de um radioisótopo no meio e, após uma certa distância, registrar a passagem da nuvem radioativa (sem a necessidade de se coletar amostras), por meio de um detector de radiação e sua eletrônica associada, obtendo-se assim informações do sistema ou de suas partes, mediante a observação do comportamento dessa substância específica (traçador) agregada ao sistema.

Em determinadas situações, principalmente, em estudos de cinética de reação, faz-se necessário que o traçador seja quimicamente idêntico ao material a ser estudado. Nesses casos, o processo de ativação direta permite que amostras retiradas da unidade possam ser submetidas à irradiação para induzir a atividade necessária e o “traçador” é inserido novamente no meio e seu deslocamento monitorado (técnica de traçadores radioativos químicos), (GUIDEBOOK, 1990).

Quando as condições do meio em estudo não permitem a ativação direta, isótopos radioativos são usados para marcar moléculas que serão inseridas na unidade, contudo, a condição essencial é que estas moléculas marcadas tenham as mesmas características hidrodinâmicas do material estudado.

Por causa das propriedades relacionadas à desintegração nuclear, os traçadores radioativos são praticamente os únicos que cumprem perfeitamente os requisitos apresentados anteriores, quer sejam físicos (para marcar determinada fase do sistema) ou químicos (composto radioativo específico tem as mesmas propriedades químicas dos outros elementos que compõem o sistema). Como todos os materiais existentes na natureza, são formados por átomos, existindo um ou mais isótopos radioativos para cada elemento, pode-se por meio de métodos químicos apropriados de síntese, preparar-se radiotraçadores para vários produtos, desde substâncias puras até moléculas complexas. Em cada caso particular, a escolha do radiotraçador depende do objetivo do trabalho, da sensibilidade do sistema de medida e da facilidade de medição.

Radioisótopos são muito utilizados como traçadores, pois apresentam as seguintes vantagens (GUIDEBOOK, 1990):

- extraordinária sensibilidade de detecção, permitindo diluições da ordem de $2 \cdot 10^6$ m³ de água por Ci. Uma marcação similar com fluoresceína ou dicromato de potássio exige aproximadamente 500 kg desses produtos;
- possibilidade de medida “in situ”;
- diversidade de isótopos que podem ser utilizados;
- meia-vida variando de minutos até anos, possibilitando a escolha do traçador de acordo com a duração prevista para a experiência. Esta vantagem tem um valor decisivo, quando se trata de águas de renovação

lenta (águas subterrâneas), que ficariam contaminadas durante um longo tempo, se fosse empregado um traçador não radioativo;

- medida sem a interferência de outros materiais contidos no meio. Mediante técnicas de espectrometria de raios gama, pode-se identificar o traçador de forma inequívoca, detectando-se sua energia característica. Essa técnica permite o emprego simultâneo de dois ou mais traçadores com garantia de identificação e medida de cada um deles;
- o mesmo traçador pode ser empregado sob diversas formas químicas. Isso é muito importante, pois dessa forma garante-se que o traçador tenha um comportamento semelhante ao do meio estudado.

Dentre as desvantagens dos radiotraçadores, pode-se citar:

- no caso de isótopos de vida curta, eles tem que ser adquiridos e utilizados em datas fixas;
- necessidade de autorização, para a aquisição e manipulação e transporte de materiais radioativos;
- problemas de proteção radiológica, de forma a se manter os níveis da contaminação ambiental de acordo com a legislação adequada.

Metodologia e processos que venham a contribuir para a obtenção de dados experimentais sobre a vazão dos efluentes, são de extrema importância para o controle das unidades de captação/tratamento de água e centrais de tratamento de esgoto.

As técnicas de medidas de vazão empregando-se traçadores radioativos permitem tanto a obtenção de dados experimentais em tempo real como também e também permite a coleta de amostras para análise posterior. Além disso, por ser uma técnica absoluta pode ser aplicada para calibrar e aferir medidores de vazão instalados em linha.

II.2 – Medidas de Vazão.

O conceito de vazão para uma unidade é definido pela relação entre o volume de fluido que se desloca pela unidade, em um determinado intervalo de tempo. Também pode ser expresso pelo produto do valor da velocidade média de escoamento do fluido pela área da secção reta do sistema. Desse modo, a vazão é expressa pela equação (II.1), (GASPAR, 1972).

$$Q = \bar{v}.w \quad (\text{II.1})$$

onde:

Q é a vazão do sistema;

\bar{v} é a velocidade média de escoamento;

w é a área da secção reta de escoamento.

Várias técnicas experimentais são usadas para se medir a vazão de fluidos, dentre elas, destacam-se:

- **método volumétrico**, que se baseia no tempo gasto para que um determinado fluxo de água ocupe ou escoe de um recipiente de volume conhecido, sendo a vazão expressa por:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{II.2})$$

onde:

V é o volume;

t é o intervalo de tempo.

- **método gravimétrico**, que consiste na pesagem de um determinado volume de água obtido em um determinado intervalo de tempo, t. O peso obtido é convertido em volume, através do peso específico do líquido; Neste caso, a vazão é dada por:

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{\gamma . t} \quad (\text{II.3})$$

onde:

P_1 é o peso inicial;

P_2 é o peso final;

γ é o peso específico do fluido.

• **método da variação de nível.** Conhecendo-se a área de um reservatório, a vazão pode ser determinada, marcando-se o intervalo de tempo necessário para que a superfície livre de água se eleve de uma cota definida pela diferença de altura de nível. Assim sendo, a vazão é:

$$Q = \frac{A \cdot \Delta h}{t} \quad (\text{II.4})$$

onde:

A é a área do reservatório;

Δh é a diferença de altura de nível da água.

• **método do flutuador,** que consiste em se determinar a vazão, conhecendo-se a área da secção transversal de escoamento do curso d'água e a velocidade média da corrente. Para tal, adiciona-se um flutuador e marca-se o tempo de percurso do deslocamento, calculando-se sua velocidade média, e com ela calcula-se a vazão pela relação:

$$Q = A_t \cdot V_m \quad (\text{II.5})$$

onde:

A_t é a área da secção reta de escoamento;

V_m é a velocidade média da corrente.

• **método dos vertedouros,** que define vertedouro como sendo uma obstrução posta em um curso d'água, dotada de uma abertura com forma definida pela qual o líquido escoar. Os vertedouros podem ser considerados como um orifício incompleto, faltando-lhes a borda superior. A denominação de vertedor ou vertedouro é também aplicada aos extravasadores de barragens. O método aplica-se às medições de vazão em córregos, rios pouco profundos, canais de irrigações e outras modalidades. Sua maior

inconveniência é que represa o curso d'água, provocando perdas por infiltração e evaporação. No entanto, quando corretamente empregado, permite medições de vazão de 0,15 l/s até cerca de 10 m³/s. A vazão é função da carga H, que é a altura atingida pela água, a contar da cota da soleira do vertedor (base da obstrução). Baseia-se então, em represar um canal e, através de um orifício, a água escoar e atinge um deslocamento de comprimento (H) até chegar à superfície do canal. Com este comprimento (H), através da equação (II.6), calcula-se a vazão.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot g \cdot H^{1/2} \quad (\text{II.6})$$

onde:

L é a largura total do vertedouro;

g é a aceleração da gravidade;

H é a carga do vertedouro.

• **método do molinete.** Os molinetes são os equipamentos mais comuns usados na determinação da velocidade de escoamento de um curso d'água, contudo, medem a velocidade do fluido e não, a vazão. São dotados de uma hélice ou concha que, quando colocada em contato com a água em escoamento, adquire um movimento de rotação proporcional à velocidade do líquido naquele ponto e, através de um sistema eletrônico, o número de rotações é transmitido a um dispositivo registrador na superfície, permitindo ao operador saber a velocidade do filete que está sendo analisado. Através de uma análise gráfica e/ou analítica associada à área da seção do curso d'água, calcula-se a vazão, mas em termos de:

$$V = a \cdot n + b \quad (\text{II.7})$$

onde:

V é a velocidade do fluxo em m/s;

a é o coeficiente que indica o passo real da hélice, em metros;

b é o coeficiente que corresponde à velocidade de atrito, em m/s;

n é o número de rotações da hélice por segundo.

• **método da diluição química,** que consiste na injeção de uma solução salina ou radioativa no curso d'água. Determinando-se em que proporção ela é diluída, isto é,

medindo-se a variação de sua concentração, calcula-se a vazão em riachos e cachoeiras. Pode ser usado para o cálculo de vazão em sistemas complexos que será detalhado nos capítulos seguintes.

Dentre os métodos citados, o que melhor fornece o valor real da vazão é o de diluição química, devido à sua versatilidade, onde o traçador químico se incorpora ao meio se comportando da mesma maneira que os átomos da população do sistema. Pode-se classificar o método de diluição pelo tipo de injeção: se contínua ou instantânea (LAFFERTY, 1971).

- Injeção contínua:

Quando a injeção é contínua, ela ocorre durante um intervalo de tempo determinado e é feita por meio de uma bomba injetora de fluxo constante pré-determinado. Após uma distância, no mínimo, igual à de homogeneização, isto é, no mínimo de dez vezes a área da secção reta do sistema estudado (TAYLOR, 1954), é então posicionado um detector que registra a passagem do material marcado, (LJUNGGRENT, 1967). O arranjo esquemático para a injeção contínua está representado na figura II.1 e a vazão no ponto de medida é expressa pela equação (II.8).

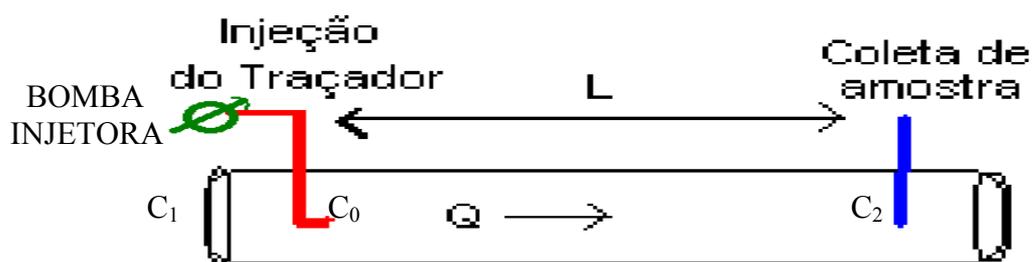


Figura II.1: Arranjo esquemático do método de diluição química por Injeção Contínua.

$$\frac{Q}{q} = \frac{C_0}{C_2 - C_1} \quad (II.8)$$

onde:

q é a vazão da bomba injetora na entrada do sistema;

L é a distância entre o ponto de injeção e ponto de coleta da amostra;

C_0 é a concentração inicial do traçador antes de ser injetado no sistema;

C_1 é a concentração no meio sem o traçador;

C_2 é a concentração no ponto de medida (onde é coletada a amostra).

Um método similar, que também consiste em uma injeção contínua, porém, ainda pouco utilizado, é o método conhecido como “Amostra Contínua”. Ele se baseia na relação entre a “Atividade Total” inserida no sistema e a média da contagem total medida pela passagem da nuvem do traçador registrada pelo detector, durante um intervalo de tempo, dado pela equação (II.9).

$$Q = \frac{C_0}{\bar{c} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (\text{II.9})$$

onde:

C_0 é a concentração da injeção do traçador,

t_1 é o tempo relativo ao início da contagem no ponto de amostragem,

t_2 é o tempo relativo ao término da passagem do traçador,

\bar{c} é a concentração média no ponto de amostragem.

- Injeção instantânea:

O método consiste em injetar, o mais rápido possível, o traçador no sistema, num ponto em que melhor ele se homogeneíze com o meio. Existem várias maneiras de se injetar o traçador, podendo ser em um ou mais pontos distintos (sendo a injeção realizada sempre na mesma secção reta do sistema, facilitando a homogeneização), por meio de difusores, com apenas uma injeção no centro do sistema. Duas metodologias distintas fazem uso da técnica de injeção instantânea para a medida de vazão, são elas: Transiente de Tempo e Contagem Total.

II.2.1 – Metodologia da injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo.

Este método é indicado para medidas de vazão em dutos com área da secção reta definida. A vazão do fluido é medida a partir da diferença entre o sinal de tempo do pulso de traçador que é medido em dois pontos diferentes (GASPAR, 1972 e CLAYTON, 1967).

Consiste na injeção rápida em um ponto do sistema e, após uma distância mínima de homogeneização, são posicionados dois detectores, que registram a passagem da nuvem radioativa. Da relação entre o volume do sistema entre os dois pontos de medida e a diferença de tempo da passagem da nuvem radioativa pelos detectores, determina-se a vazão pelo produto da velocidade média de deslocamento do fluido com a área da secção reta da tubulação, cuja relação é representada pela equação (II.10).

A distância mínima de separação entre os dois detectores depende da capacidade de o sistema de detecção conseguir separar uma possível interferência entre os dois sinais, ou seja, depende da vazão, das características físico/químicas do sistema e também da resolução dos detectores.

A técnica é muito utilizada com traçadores radioativos (devido a ser um método não destrutivo, onde o detector não necessita estar dentro do sistema). Esquemáticamente, está representado pela figura II.2, com o valor da vazão expressa pela equação (II.10).

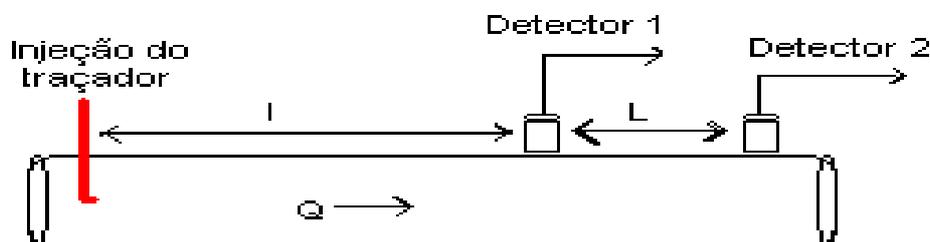


Figura II.2: Arranjo esquemático da metodologia de injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo.

$$Q = \frac{\text{Volume.do.fluido}}{\text{Transiente.de.Tempo}} = \frac{S.L}{\Delta t} = S.v \quad (\text{II.10})$$

onde:

S é a área da seção reta da unidade a ser medida;

L é a distância entre os detectores;

l é a distância entre o ponto de injeção e a posição do primeiro detector, fixado na distância mínima de homogeneização do traçador com o meio;

Δt é o transiente de tempo de passagem da nuvem do radiotraçador pelos dois detectores.;

v é a velocidade média de deslocamento do fluido.

Devido à dependência do volume do fluido entre os detectores, esse método não é aconselhado para medidas ambientais, pois o volume da região entre os dois detectores deve ser totalmente preenchido e bem estabelecido. Quando o sistema estiver obstruído ou tenha variações consideráveis, esta metodologia não poderá ser aplicada, pois acarretará em uma medida imprecisa.

II.2.2 – Metodologia da injeção instantânea pela técnica de Contagem Total.

O método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total é bastante utilizado para medidas de vazão de gases ou líquidos em tubulações, canalizações e rios, sendo muito útil na medida de vazão de rios turbulentos, já que a atividade injetada em cada medição é relativamente pequena.

O método consiste no lançamento instantâneo de um traçador radioativo com atividade conhecida. Em uma seção, distante do ponto de injeção, o sistema formado por detectores e eletrônica associada registra a passagem da nuvem radioativa, com a concentração na seção de medição variando somente em função do tempo de passagem da nuvem radioativa (HULL 1958).

Nesse método, uma amostra do traçador cuja atividade A foi previamente determinada é injetada na corrente. No ponto de medida, o detector é adequadamente posicionado (geometria de detecção bem definida) e registra a passagem da nuvem radioativa durante certo intervalo de tempo T.

Considerando-se um pequeno elemento de volume contendo uma atividade, dA , sujeita a uma vazão, dQ , a concentração do traçador no seu interior é dada por:

$$\frac{dA}{dQ} = \int_{t_a}^{t_b} C \cdot dt \quad (\text{II.11})$$

onde:

dA é a atividade do elemento de volume;

dQ é a vazão na secção transversal do elemento de volume;

C é a concentração do traçador no elemento de volume;

t_a a t_b é o intervalo de tempo de passagem do traçador pelo elemento de volume.

Considerando-se o sistema estacionário e que não ocorram perdas do traçador durante as medidas, então:

$$\frac{dA}{dQ} = \frac{A}{Q} \quad (\text{II.12})$$

onde:

A é a atividade total inserida na unidade de medida;

Q é a vazão no sistema.

Assim, tem-se de (II.11):

$$\frac{A}{Q} = \int_{t_a}^{t_b} C \cdot dt \quad (\text{II.13})$$

Para o sistema em estudo, define-se um fator F , denominado “Fator de Calibração”, que relaciona a concentração do traçador e a taxa de contagem registrada pelo detector. O valor de F depende das características do detector, da energia do traçador e da geometria de medida.

Esse fator é determinado experimentalmente no laboratório para um sistema com geometria igual a do sistema avaliado, onde se registra a taxa de contagem para determinadas injeções com atividades definidas; assim, para cada injeção do traçador, tem-se que:

$$N = \int_{t_a}^{t_b} R \cdot dt \quad (\text{II.14})$$

onde:

R é a taxa de contagens registrada;

N é a contagem total registrada.

O valor de R é diretamente proporcional à concentração do traçador no meio, ou seja:

$$R \propto C \Rightarrow R = F \cdot C \quad (\text{II.15})$$

onde:

F é o Fator de Calibração;

Assim, de (II.14), tem-se que:

$$N = \int_{t_a}^{t_b} F \cdot C \cdot dt \Rightarrow N = F \int_{t_a}^{t_b} C \cdot dt$$

$$\frac{N}{F} = \int_{t_a}^{t_b} C \cdot dt \quad (\text{II.16})$$

De (II.13) e (II.16) tem-se:

$$\frac{A}{Q} = \frac{N}{F} \Rightarrow Q = \frac{F \cdot A}{N} \quad (\text{II.17})$$

onde:

A é a atividade injetada ou concentração do traçador;

F é o fator de calibração;

N é contagem total registrada pelo detector.

A vantagem deste método está principalmente na possibilidade de obter-se diretamente a vazão, sem que seja necessário medir-se a área da secção reta da unidade ou seu volume. Esta característica torna o método indicado para medidas ambientais em sistemas abertos como rios, canais, estuários, etc. Além disso, a técnica utiliza apenas um conjunto de medidas para registrar a passagem da nuvem radioativa.

Este método é o foco deste trabalho, podendo ser utilizado num sistema simples ou complexo e baseia-se na injeção rápida de uma quantidade definida de traçador, podendo ser radioativo ou corante. Após uma distância mínima de homogeneização, coleta-se uma amostra (para um traçador corante) ou usam-se detectores (para um radiotraçador).

No caso dos traçadores fluorescentes, é necessário o levantamento de uma curva de eficiência do equipamento, para se medir corretamente a fluorescência, ou seja, levantar-se um fator que relacione a quantidade de amostra injetada e a fluorescência registrada pelo equipamento. A vazão será a relação entre a massa de traçador injetada, com a integral da curva da concentração das leituras das amostras retiradas no ponto de coleta.

Já, no caso do uso de um radiotraçador, necessita-se de uma calibração do sistema eletrônico, que será detalhado no capítulo seguinte. Na figura II.3, apresenta-se o esquema do aparato experimental utilizado com o radiotraçador pela técnica de Contagem Total.

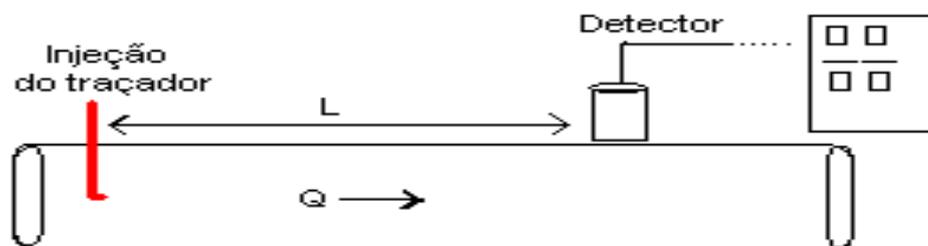


Figura II.3: Arranjo esquemático da metodologia de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total.

As condições fundamentais para validar este método são:

- a atividade injetada, A , deve atingir o ponto de medição sem perdas, por absorção, troca iônica, etc., durante o percurso;
- a concentração (atividade por unidade de volume) no instante dado, C_t , deve ser a mesma, em qualquer ponto da secção de medição;
- a constante F deve ser determinada nas mesmas condições das medições realizadas no experimento;
- a constante F e a medição da vazão devem ser determinadas no intervalo onde a resposta do detector, R_t , é linear com respeito à concentração C_t ;
- a radiação natural de fundo no ponto de detecção não deve variar, durante o período de medição;
- a meia-vida do radioisótopo deve ser compatível com o tempo gasto na experiência. Quando um isótopo de meia-vida curta é usado, a contagem obtida deve ser corrigida para o mesmo instante em que se mede o fator de calibração;
- o tempo ou intervalo de contagem, t_a até t_b , deve ser superior ao tempo de passagem da nuvem radioativa.

O método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total, não necessitando de um volume definido, pode ser usado para medir correntes divergentes e confluentes.

A medição da vazão Q de uma canalização, rio ou tubulação pode ser feita em efluentes ou subsidiários, sempre que a distância entre o ponto de injeção e o ponto de divergência for superior à distância mínima de homogeneização, ou seja, pode-se medir a vazão no efluente do caudal principal, desde que seja cumprida a condição de homogeneidade, antes da divergência, como mostra a figura II.4.

Para o fluxo principal tem-se a equação (II.17); para a condição de não ser possível posicionar um detector na posição 1 (P1), a medida da vazão principal pode ser efetuada, posicionando-se o detector em um canal ou efluente subsidiário. Para o detector posicionado na posição 2 (P2), tem-se:

$$Q_2 = \frac{F_2 \cdot A_2}{N_2} \quad (\text{II.18})$$

onde:

F_2 é o Fator de Calibração para a geometria do sistema P2;

A_2 é a atividade total na região de medida P2;

N_2 é a contagem total registrada em P2, pela passagem da nuvem radioativa.

Sendo x a fração do fluxo principal que desloca na região de P2, então, tem-se, $Q_2 = x \cdot Q$ e $A_2 = x \cdot A$, assim:

$$x \cdot Q = \frac{F_2 \cdot x \cdot A}{N} \Rightarrow Q = \frac{F_2 A}{N_2} \quad (\text{II.19})$$

Esta vantagem do método pode ser útil nos casos de canalizações principais inacessíveis ou de rios com margens de difícil acesso.

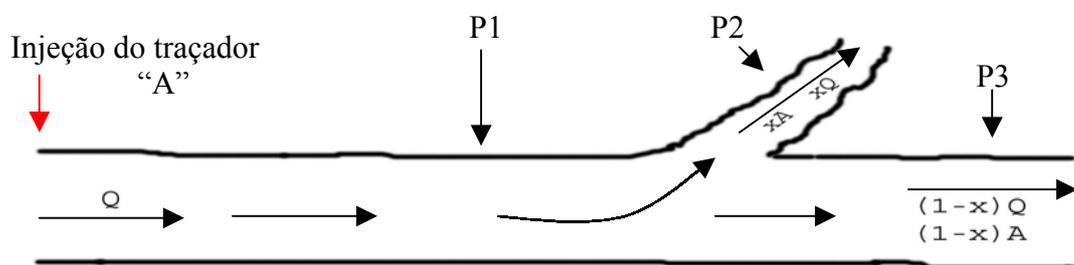


Figura II.4 – Representação esquemática de uma corrente divergente.

Em correntes confluentes, quando se tem a união de um ou vários materiais de sistemas diferentes, pode-se medir a vazão com o método de injeção instantânea pela técnica de contagem total, utilizando-se apenas uma injeção do traçador em um ponto estratégico. A vazão é contada na passagem da nuvem de traçador, em pontos diferentes da corrente dos afluentes, ou utilizando uma relação entre vazão do sistema e contagem total gerada pelo detector, conforme mostra a equação (II.20) .

A figura II.5 mostra uma representação esquemática de um sistema confluyente industrial, onde quatro tanques diferentes (A, B, C e D) são dispostos paralelamente e que se misturam em apenas um, sendo a vazão de alimentação de cada tanque (1, 2, 3 e 4) monitorada.

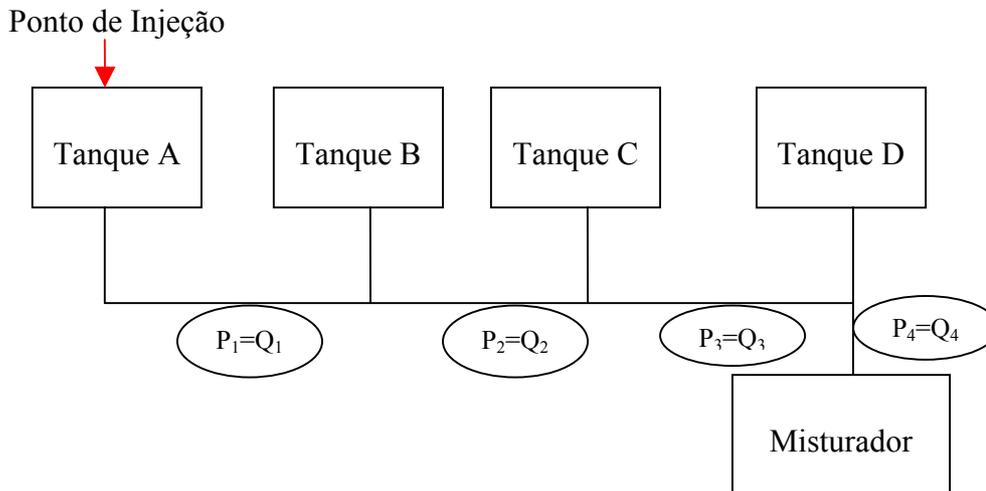


Figura II.5 – Representação esquemática de um sistema confluyente industrial constituído de quatro tanques A, B, C e D que se juntam no misturador.

Como a injeção do traçador é única, a atividade total em P_1 e P_2 é a mesma e igual a A. Mantendo o sistema de medida com a mesma geometria em P_1 e P_2 então F_1 e F_2 determinam-se iguais, assim:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{F \cdot A}{N_1} \\
 Q_2 &= \frac{F \cdot A}{N_2}
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_2}{N_1}
 \quad (II.20)$$

No método de injeção instantânea pela técnica de contagem total, não é necessário se conhecer o volume do sistema, como no método com a técnica de transiente de tempo, que mede a vazão indiretamente. Desta forma, a técnica é indicada para medidas ambientais realizadas em pontos onde uma variação irregular no contorno ocorre, como no caso de rios, canais e mar aberto. A principal condição necessária é que a medida do fator de calibração seja bem estabelecida, para a geometria usada.

Duas configurações de medidas podem ser usadas: uma, com o detector posicionado na superfície do sistema, e outra, com ele submerso. O fator de calibração pode ser determinado, mediante experiência montada num laboratório, utilizando-se de um tanque com grande volume, cujo tamanho é função da energia e atividade do traçador.

II.3 – Calibração dos detectores de NaI.

Ao se usar a técnica de radiotraçadores, para manter a reprodutibilidade dos resultados, é de extrema importância a calibração de todo o sistema eletrônico, principalmente, nos casos em que mais de um detector é empregado.

Detectores de radiação são dispositivos que se baseiam na interação da radiação com a matéria. Quando um tipo de radiação incide sobre o detector, este gera um pulso eletrônico cuja forma e amplitude é proporcional às características da radiação incidente, este pulso é, então, amplificado e analisado por meio de um dispositivo que permite classificá-lo, de acordo com a energia da radiação incidente.

A técnica adotada, Contagem Total, baseia-se no levantamento da taxa de contagem na medida em que a nuvem radioativa se movimenta pela região sensível do detector. Esta metodologia necessita de apenas um detector e, como a vazão depende do valor da contagem total, para que esta medida tenha uma precisão adequada, é necessário que o conjunto detector/módulos de medida seja adequadamente calibrado.

Em casos de fluxos divergentes ou sistemas complexos, mais de um detector deve ser empregado nas medidas da vazão e, para um bom resultado, faz-se necessário o ajuste de cada um dos sistemas de medição, o levantamento do ponto de operação, da eficiência e o ajuste do ganho do amplificador (KNOLL, 1989 e MAFRA, 1973).

No uso da técnica de Contagem Total, é condição primordial que se tenha bem estabelecida a atividade da amostra (traçador); por isso, projetou-se uma unidade para a contagem de atividade absoluta, para cada uma das amostras que serão apresentadas nos experimentos.

A medida da atividade absoluta de uma fonte de radiação gama deve ser feita, através do uso de um analisador de pulsos monocanal ou multicanal, sendo necessário escolher um radioisótopo que tenha uma energia que seja bem discriminada.

Para a medida da atividade absoluta de uma amostra, é necessário o conhecimento preciso do ângulo sólido do conjunto fonte/detector; o procedimento para medida da atividade absoluta também depende das dimensões do detector e da fonte radioativa, da distância entre eles e da energia da radiação incidente.

Para uma determinada geometria fonte/detector, tem-se que a atividade absoluta, A , da amostra é dada por:

$$A = \frac{R}{t \cdot p \cdot \varepsilon \cdot F_g} \cdot 100 \quad (\text{II.21})$$

onde:

A é a atividade absoluta da fonte;

R é a contagem total registrada pelo detector;

t é o tempo total de aquisição dos dados;

p é a probabilidade de decaimento no fotopico;

ε é a eficiência do detector para a energia da fonte radioativa;

F_g é o fator geométrico.

De acordo com a equação (II.21), fazem-se necessários a determinação do fator geométrico, que está intimamente relacionado ao ângulo sólido formado entre a posição fonte e a do detector, assim como, a eficiência do fotopico.

- Eficiência:

Dentre as principais características de um detector, destaca-se o valor de sua eficiência, definida pela relação entre o que o detector registra e o que deveria ser registrado por ele, quando se utilizam fontes radioativas padronizadas.

Observa-se, na figura II.6, considerando um feixe colimado de radiação gama, que a intensidade do feixe incidente, I_0 , sobre o volume sensível de um detector NaI (de densidade μ) é diferente da intensidade do feixe emergente, I_L , após a radiação percorrer o comprimento, L , do volume sensível do detector. Isso ocorre devido a interação da radiação gama com o meio, no volume sensível do detector (pode ser através dos efeitos fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares). Para efeito de registro, é interessante que os fótons depositem toda a sua energia no meio, resultando na formação de fotopico, que pode ser registrado adequadamente por um multicanal e, posteriormente, analisado.

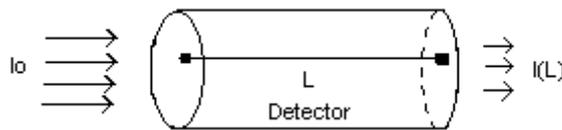


Figura II.6: Volume sensível de um detector cintilador (NaI).

Tanto as características do detector, como seu volume sensível e as propriedades do cristal, quanto às características das fontes radioativas, como a energia do fóton e a geometria da mesma, são fatores relevantes que influenciam na determinação de sua eficiência. Também a distância entre a fonte/detector contribui na determinação da eficiência do detector.

Nos experimentos realizados, optou-se utilizar a eficiência da energia total do fotopico, que é obtida medindo-se a área total de fotopico, para diferentes fontes radioativas padronizadas, definida como:

$$\text{Eficiência de Fotopico} = (\text{eficiência total do detector}) \times \frac{(\text{cont. tot. no fotopico})}{(\text{cont. tot. do espectro})} \quad (\text{II.22})$$

O espectro de fontes padrões distintas foi levantado, onde se selecionou as energias, para se calcular o valor de eficiência para cada fotopico, através da equação (II.23). A partir desses resultados, empregando-se técnicas de mínimos quadrados não lineares, ajustou-se uma curva para a eficiência do detector. Considerando-se as fontes

padrões como fontes planares, com o detector cilíndrico de face plana e ambos posicionados centrados (colineares), então:

$$\varepsilon = \frac{R}{t \cdot p \cdot A_0 \cdot F_g} \cdot 100 \quad (\text{II.23})$$

onde:

ε é a eficiência do detector para a energia da fonte radioativa;

R é a contagem registrada no fotopico;

t é o tempo de contagem;

p é a probabilidade de decaimento no fotopico;

A_0 é a atividade da fonte padrão;

F_g é o fator geométrico.

- Ângulo Sólido (Ω) e Fator Geométrico (F_g):

Um importante parâmetro a ser considerado na detecção de radiação nuclear é o ângulo sólido, Ω , 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 pontual isotrópica a uma certa distância de um detector, como mostra a figura II.7.

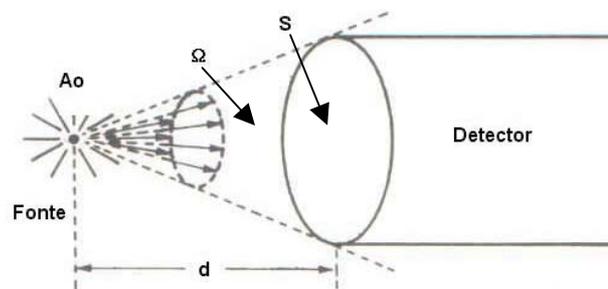


Figura II.7 – Dependência da taxa de contagem registrada pelo detector em relação a distância fonte/detector.

Apesar da fonte emitir fótons em todas as direções, apenas uma fração deles atinge o volume sensível do detector. A intensidade de fótons que atingem o detector é proporcional ao ângulo sólido do sistema fonte/detector e se define fator geométrico como:

$$F_g = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{número de partículas por segundo emitidas} \\ \text{no espaço definido pela fonte/detector} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{número de partículas por} \\ \text{segundo emitidas pela fonte} \end{array} \right)} \quad (\text{II.24})$$

Considerando-se uma fonte de radiação que emite fótons isotropicamente, o fator geométrico, F_g , pode ser expresso, por (MAFRA, 1973):

$$F_g = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (\text{II.25})$$

Considere uma fonte isotrópica com taxa de emissão S_0 , área A_s , distanciada “d” do detector de face plana e área A_d . A figura II.8 mostra o sistema; considerando-se os elementos de área dA_s , para a fonte, e dA_d , para o detector, o fator geométrico é calculado por:

$$F_g = \frac{\iint_{A_s A_d} (S_0 dA_s / 4\pi r^2) \cdot dA_d (\hat{n} \cdot \mathbf{r} / r)}{S_0 A_s} \quad (\text{II.26})$$

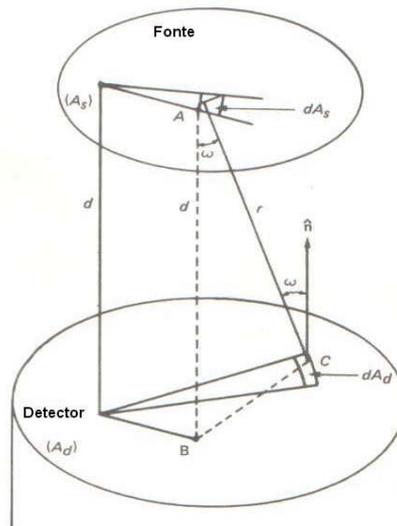


Figura II.8 – Definição do fator geométrico para a fonte plana e detector plano centrados.

Se \hat{n} é o vetor normal, na superfície do detector; \hat{r} , o vetor unitário, na direção que produzem os elementos de área dA_s e dA_d , então:

$$\frac{\hat{n} \circ \hat{r}}{r} = \frac{|\hat{n}| |\hat{r}| \cdot \cos \omega}{r} = \frac{\cos \omega}{r} \quad (\text{II.27})$$

Substituindo-se a equação (II.27) na (II.26), chega-se à equação (II.28).

$$F_g = \frac{1}{4\pi A_s} \oint_{A_s} dA_s \oint_{A_d} dA_d \frac{\cos \omega}{r^2} \quad (\text{II.28})$$

A solução dessa função foi resolvida neste trabalho, utilizando-se dois métodos distintos, onde o primeiro, definido como método 1, utiliza a integração pelo método de função de Bessel e o segundo, definido como método 2, é resolvido por integração numérica, pelo método de Simpson.

O primeiro método considera uma fonte de radiação plana de superfície paralela a um detector de abertura circular voltada para fonte. Da teoria das funções de Bessel tem-se que:

$$F_g = s \int_0^{\infty} e^{-xz} \frac{J_1(x)}{x} J_1(xs) \cdot dx \quad (\text{II.29})$$

$J_1(x)$ é a Função de Bessel de primeira ordem, sendo:

$$s = \frac{R_d}{R_s};$$

$$z = \frac{d}{R_s};$$

R_d é o raio do detector;

R_s é o raio da fonte.

Considerando-se que R_d/d e R_s/d são menores que um, a expressão algébrica, para se calcular o ângulo sólido para esta configuração, para uma fonte plana e um detector com face circular, posicionados paralelamente e centrados entre si, que permite variar o raio do detector, da fonte e também a distância entre fonte/detector, é representada pela equação (II.30), (TSOLFANIDIS, 1983):

$$\Omega = \omega^2 \pi \left\{ 1 - \frac{3}{4}(\psi^2 + \omega^2) + \frac{15}{8} \left(\frac{\psi^4 + \omega^4}{3} + \psi^2 \omega^2 \right) - \frac{35}{16} \left[\frac{\psi^6 + \omega^6}{4} + \frac{3}{2} \psi^2 \omega^2 (\psi^2 + \omega^2) \right] \right\} \quad (\text{II.30})$$

onde:

$$\psi = R_s/d;$$

$$\omega = R_d/d;$$

R_s é o raio da fonte radioativa;

R_d é o raio do detector;

d é a distância entre a fonte radioativa e o detector.

O segundo método simplificado para se calcular o ângulo sólido foi sugerido por OBLOZINSKY (1971), que resolveu a equação (II.28), considerando uma fonte, emitindo fótons isotropicamente em forma de disco, e um detector cilíndrico de face plana, utilizando como base um sistema de coordenadas, XYZ, sendo o detector posicionado no plano-XY, a fonte posicionada com o centro no eixo Z, e o detector posicionado com o centro no eixo X, conforme mostra a figura II.9.a. Em princípio, calculou o ângulo sólido gerado por uma fonte pontual emitindo fótons isotropicamente a um detector de raio, R_d , onde considerou a unidade de volume do detector, $dS = r.dr.d\phi$ (sendo ϕ o ângulo gerado pela rotação da unidade de volume do detector e r a variação do raio do detector referente a unidade de volume), e a distância da fonte até a unidade de volume do detector, d . Posicionou a fonte no eixo Z, com o centro em h_0 e o detector no eixo X com o centro em ρ_0 , encontrando o ângulo sólido nesta configuração:

$$\omega = 2 \int_0^{R_d} \int_0^\pi \frac{hr.dr.d\phi}{(h^2 + \rho^2 + r^2 + 2\rho r \cos\phi)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{II.31})$$

Expandindo-se esta equação, para uma fonte radioativa plana, considera-se um segundo eixo de coordenadas, $x'y'z'$, onde o centro da fonte é posicionado no plano $x'y'$, como se pode observar na figura II.9.b.

Considerando-se que:

$$x' = q \cos \Psi,$$

$$y' = q \sin \Psi,$$

$$z' = 0.$$

e que os eixos do sistema de coordenadas são relacionados por:

$$X = t_{11}.x' + t_{12}.y' + t_{13}.z',$$

$$Y = t_{21}.x' + t_{22}.y' + t_{23}.z',$$

$$Z = t_{31}.x' + t_{32}.y' + t_{33}.z' + h_0,$$

onde, t_{ij} ($i,j = 1,2,3$) são os cossenos diretores dos eixos entre as coordenadas, isso permite variar-se o raio da fonte, raio do detector, distância entre fonte/detector e representa uma vantagem por se poder variar a posição tanto do detector, quanto da fonte, no plano horizontal e/ou vertical, para o cálculo do ângulo sólido, através da equação (II.32).

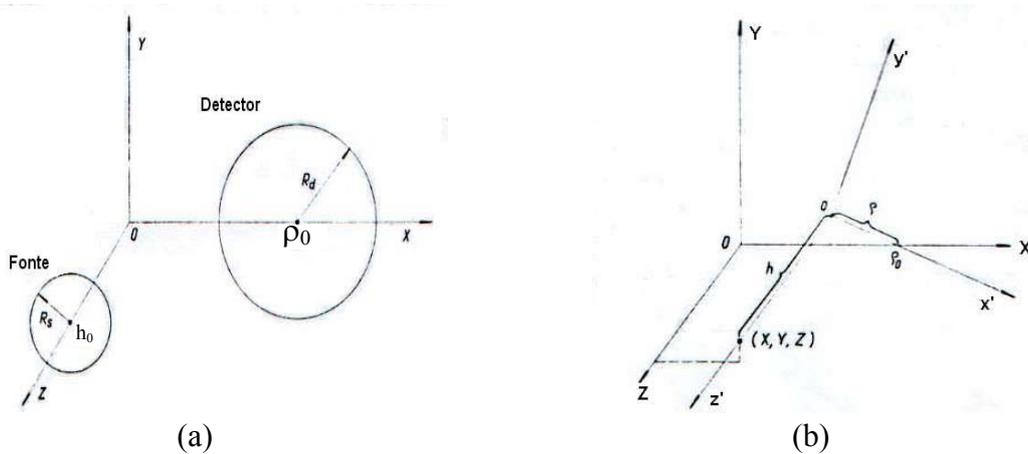


Figura II.9 – (a) Sistema de coordenadas XYZ e posição do detector e fonte radioativa
(b) Sistema de coordenadas $x'y'z'$.

$$\Omega = 2\pi - \frac{4}{\pi \cdot R_s^2} \int_0^{R_s} dq q \int_0^\pi d\psi h \int_0^\pi d\Phi \frac{h^2 + \rho^2 + R_d \cos \Phi}{h^2 + \rho^2 - \rho^2 \cos^2 \Phi} \times (h^2 + \rho^2 + R_d^2 + 2R_d \rho \cos \Phi)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{II.32})$$

onde:

$$\rho = [(\rho_0 - X)^2 + Y^2];$$

q = raio da fonte;

$$h = Z .$$

A posição do detector em relação à fonte determina a região de sensibilidade e, nesse caso, a colimação do detector influencia no processo de detecção. Desse modo, o ângulo sólido será reduzido e, como consequência, o número de fótons detectados também diminuirá. Neste trabalho, projetou-se um porta-amostra constituído de uma bandeja com três posições diferentes, para as amostras radioativas, de modo que aquelas com altas atividades ficassem posicionados mais distantes do detector, enquanto que, as menos ativas, mais próximas dele. Dessa forma, pode-se variar o ângulo sólido formado entre a posição da fonte, relativamente à do detector.

Quando se tem uma posição distinta para o centro do detector, sem o alinhamento com o centro da fonte radioativa, o desenvolvimento matemático para o cálculo do ângulo sólido é complexo, tanto para fontes planas ou volumétricas, sendo necessária a utilização de métodos numéricos.

São vários autores que tratam desse assunto e apresentam fórmulas e equações relacionadas ao cálculo do ângulo sólido, envolvendo geometrias diferentes, diversos tamanhos e volumes de detectores, a saber: KNOLL, 1989; MAFRA, 1973; TSOLFANIDIS, 1983; OBLOZINSKY et al., 1971; PAPP, 1995; CARVALHO et al., 1996; GARDNER et al., 1969.

II.4 – Técnica de Estímulo-Resposta.

Atualmente, com a disponibilidade de uma grande variedade de radioisótopos no mercado, bem como com 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 freqüentes aplicadas em diversas atividades industriais e ambientais (GUIDEBOOK, 1990; THÝN, 1975; THOMAS, 2002; CHARTON, 1990).

A técnica de traçadores para se estudar um sistema consiste em se observar o comportamento de uma determinada porção do material, denominada de população marcada, que ao interagir com o sistema, têm seus parâmetros físico/químicos continuamente modificados e cujo registro permite obter-se 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 inserção do traçador; localização dos pontos de medida; geometria do sistema de detecção) sejam bem definidas, como também é necessário que as propriedades físico/químicas e hidrodinâmicas do traçador escolhido devem ser similares aos 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 $F(t)$ a função de transferência (ação do sistema depende dos processos internos), como mostram o fluxograma da figura II.10 e a equação (II.33).

$$Y(t) = X(t) * F(t) \quad (II.33)$$

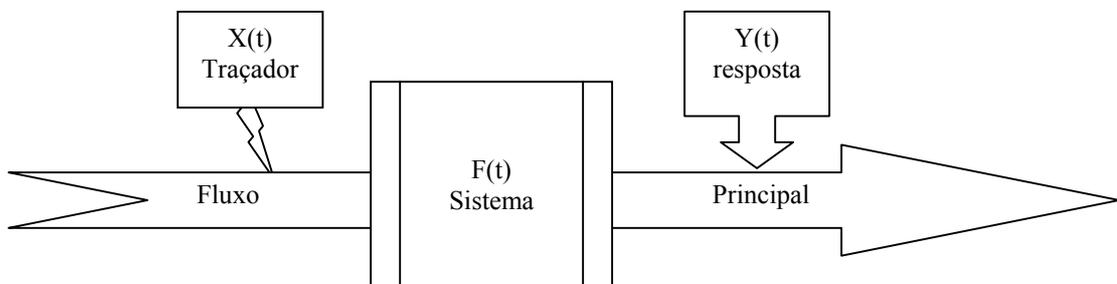


Figura II.10: Esquema da representação matemática da técnica de estímulo-resposta.

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

Métodos apropriados para a identificação e o registro do traçador na saída da unidade permitem obter a curva de resposta, $Y(t)$, que é representativa do 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. Esta 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 obtida por meios de métodos matemáticos de deconvolução.

II.5 – Funções distribuição do tempo de residência (DTR).

Dentre as metodologias analíticas mais efetivas para estudos de escoamento de fluidos em unidades reais, especialmente para sistemas de escoamento contínuo, encontram-se as Funções Distribuição do Tempo de Residência (DTR), definidas por DANCKWERTS (1953), cuja principal vantagem é descrever as condições reais do deslocamento do radiotraçador no sistema.

As DTR são funções estatísticas e são determinadas experimentalmente, injetando-se o traçador, no tempo $t = 0$, a partir do qual, mede-se a concentração do traçador, C , no efluente do sistema, em função do tempo.

Podem ser usados dois métodos de injeção com entradas: tipo pulso e do tipo degrau. Para uma entrada do tipo pulso, a quantidade de traçador, N_0 , é repentinamente injetada na corrente de alimentação do sistema, de tal maneira, que quando comparado com a duração do experimento, seu valor, sempre muito inferior com a concentração na saída, é então medida, em função do tempo, gerando a curva $C(t)$. Já a entrada do tipo

degrau ocorre, quando se injeta o traçador continuamente na alimentação do sistema, durante um tempo pré-definido (HIMMELBLAU, 1968).

- A Função Distribuição de Tempo de Residência, $E(t)$:

Também conhecida como distribuição de frequências de idade do fluido, é uma função distribuição estatística que descreve a distribuição de frequências da idade do fluido e representa a fração de material que passou pela unidade, no intervalo de tempo entre t e $t + \Delta t$, conforme mostra a figura II.11.

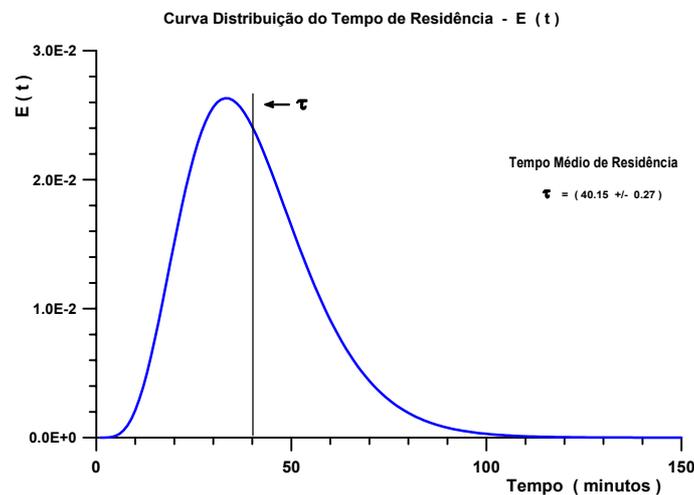


Figura II.11 – Curva $E(t)$ típica medida pela técnica de traçadores.

Considerando-se a idade do elemento de volume do traçador como o tempo que ele permaneceu no interior da unidade então, $E(t)$ se refere à distribuição estatística das idades da corrente efluente. Ela é a mais usada das funções distribuições indicadas para a análise de sistemas complexos, pois permite que o perfil de deslocamento do fluido pela unidade passa ser conhecido e, além disso, possibilita obter o tempo médio de residência, parâmetro importante no estudo das unidades.

Maiores detalhes sobre as funções e o desenvolvimento das equações encontram-se disponíveis em BRANDÃO, 2001.

Experimentalmente $E(t)$ é obtida pela medida de concentração $C(t)$ do traçador na saída da unidade, podendo ser expressa por:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_{t_1}^{t_2} C(t).dt} \quad (\text{II.34})$$

onde:

t_1 é o início da entrada do traçador na unidade;

t_2 é o final da passagem do traçador pela unidade.

Por definição, a função $E(t)$ é normalizada, ou seja:

$$\int_{t_1}^{t_2} E(t).dt = 1 \quad (\text{II.35})$$

O ajuste matemático de parâmetros de uma função para uma unidade pode ser simplificado, considerando-se que as funções Distribuição do Tempo de Residência, por definição, são análogas às distribuições estatísticas e assim relacionadas a parâmetros como média e variância.

Define-se como tempo médio de residência, τ , o tempo médio gasto para que todo traçador injetado percorra a unidade.

Como $E(t)$ é uma função distribuição da idade do traçador, da teoria geral da estatística (SPIEGEL, 1970), defini-se τ como o primeiro momento de $E(t)$ em torno da origem, isto é:

$$\tau = \int_{t_1}^{t_2} tE(t).dt \quad (\text{II.36})$$

onde:

t_1 e t_2 são os limites de integração de $E(t)$

A incerteza, S^2 (variância), associada a τ é dada pelo segundo momento da distribuição $E(t)$ em torno da média, isto é:

$$S^2 = \int_{t_1}^{t_2} (t - \tau)^2 E(t).dt \quad (\text{II.37})$$

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 – Calibração de detectores cintiladores NaI.

Para que os resultados das medidas registradas em sistemas independentes possam ser analisados e comparados é necessário que todos os conjuntos de medida (detector e os módulos eletrônicos associados), sejam adequadamente calibrados. Esta é uma condição fundamental para garantir resultados com medidas precisas, principalmente em situações com altas taxas de diluição do traçador, onde a relação sinal/ruído piora à medida que a concentração do traçador diminui.

O procedimento de calibração foi realizado seguindo sugestão de KNOLL, 1989 e MAFRA, 1973. Primeiramente, mediu-se o ponto de operação de cada um dos detectores, para tal, posicionou-se uma fonte padrão de ^{137}Cs (662 keV) atividade de 23,53 k Bq, na face dianteira do detector e variou-se lentamente a alta tensão registrando-se a contagem total por minuto no contador. A partir da curva da taxa de contagens registrada para cada tensão, determinou-se a tensão de operação do detector, no patamar da curva, mais ou menos a 1/3 do início dele.

Com o auxílio do osciloscópio, calibrou-se o ganho do amplificador, padronizando para todos os detectores uma altura de pulso de três volts para o fotopico de energia de 662 k eV do ^{137}Cs . O ruído eletrônico foi discriminado com o auxílio de um analisador de pulso monocanal.

Quatro detectores de NaI foram empregados nos experimentos e estão nomeados, de acordo com suas finalidades de uso.

- Detector A – Módulo de Contagem de Atividade Total;
- Detector B – Primeiro Detector (Transiente de Tempo);
- Detector C – Segundo Detector (Transiente de Tempo);
- Detector D – Contador Total e Fator de Calibração.

III.1.1 – Determinação da eficiência de fotopico.

Para a determinação da atividade a ser empregada, é necessário o levantamento da curva de eficiência do detector A, para diversas energias das fontes radioativas utilizadas e também em função das posições na bandeja. Para a determinação da eficiência de fotopico, cinco fontes padrões foram usadas e suas características encontram-se listadas na tabela III.1.

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

Isótopos	$T_{(1/2)}$ (anos)	Energia gama (k eV)	Probabilidade (%)	Atividade Corrigida para 2005 (k Bq)
²⁴¹ Am	432,20	59,54	35,90	375,41
¹³⁷ Cs	30,17	661,65	89,98	23,53
²² Na	2,60	1274,50	99,94	0,52
		244,69	7,49	
¹⁵² Eu	13,60	344,27	26,49	126,30
		1408,00	20,74	
⁶⁰ Co	5,27	1173,20	100,00	15,08
		1332,50	100,00	

Através da equação (II.23), para um tempo de contagem de 16 horas, calculou-se a eficiência através dos espectros gerados, utilizando as áreas das energias citadas na tabela III.1 e com os valores do fator geométrico listados na tabela IV.2. Através destes valores e com auxílio do programa computacional GENIE-2000 (1999), determinou-se curvas da eficiência de fotopico em função da energia da radiação incidente.

III.2 – Sistema de aquisição e de análise de dados.

As medidas foram realizadas em quatro etapas:

1^a) Determinação da atividade total:

Construiu-se uma unidade que permitisse a determinação da atividade total a ser inserida no sistema de interesse. Uma alíquota de 25µl do traçador foi depositada em papel de filtro, sendo medida, com o auxílio de um espectrômetro MS-4031, que compreende o mesmo conjunto completo de módulos, representados na figura III.1, porém de fabricação do IEN/CNEN (Instituto de Engenharia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear) ESPECTRÔMETRO, (1997), obtendo-se assim a atividade total.

2^a) Método de injeção instantânea pela técnica de Transiente de Tempo:

Para a medida de vazão por esta técnica, utilizaram-se dois detectores em pontos distintos e um conjunto de módulos eletrônicos compostos por pré-amplificador, amplificador, medidor de taxa de contagens, placa conversora ADC (conversor analógico/digital), analisador monocanal e ou analisador multicanal, como mostra o diagrama em blocos na figura III.1, onde:

- DET – Detector cintilador NaI (2x2)”, Marca HARSHAW, Modelo Integral Line;
- AT – Fonte de alta-tensão, Marca Micronal, Modelo 1023 A;
- PA – Pré-Amplificador Marca ORTEC, Modelo 113;
- AMPL – Amplificador com Filtro Ativo Marca ORTEC, Modelo 435 A;
- AMC – Analisador Mono Canal, Marca Micronal, Modelo 4010;
- AMTC – Analisador Multicanal, Marca Camberra, GENIE-2000;
- MTC – Medidor de Taxa de Contagem, Marca ORTEC, Modelo 449-2;
- SAD – Sistema de aquisição de dados: microcomputador e placa conversora ADC.

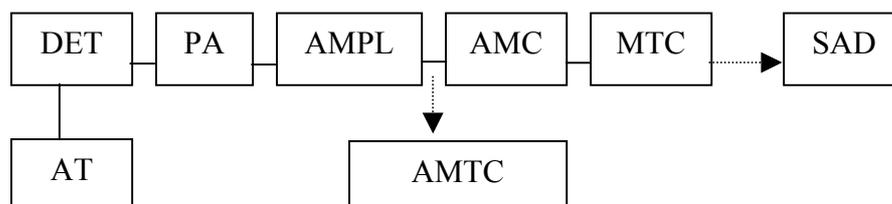


Figura III.1 – Conjunto de módulos eletrônicos para a medida de vazão.

3ª) Método de injeção instantânea pela técnica de Contagem Total:

Esta técnica se baseia na passagem do traçador por apenas um detector, e esse gera uma curva na qual sua taxa de contagem total se relacionará à atividade injetada, permitindo assim, calcular a vazão pela relação da equação (II.17). Foi utilizado para isso, o espectrômetro MS-4031.

4ª) Fator de Calibração:

Para a determinação da vazão, utilizando a técnica de contagem total, faz-se necessário o uso de um fator que relacione os seguintes parâmetros: geometria de medição; tipo de energia do radioisótopo; características do detector; e tempo de contagem. Para sua determinação foi projetado um conjunto experimental, consistindo de um tubo de PVC fixo com as mesmas características do tubo usado no ensaio para a medida de vazão (mantendo a mesma geometria de detecção) e o mesmo sistema de medidas utilizados nos experimentos para o cálculo da vazão, que se encontra descrito no capítulo III.5. Para a determinação do fator de calibração, o espectrômetro MS-4031 também foi empregado.



Figura III.2 – Conjunto de aquisição e análise de dados, dispostos sobre a bancada experimental

Ao serem registrados, os sinais são processados pelo conjunto de aquisição e analisados por uma placa conversora ADC, acoplada a um microcomputador que

disponibiliza o Sistema de Aquisição de Dados (SAD, 1991), habilitado a efetuar a conversão dos dados necessários ao monitoramento do traçador. A placa possui oito canais independentes e permite programar a quantidade de detectores a serem usados para aquisições múltiplas, o intervalo de tempo entre contagens sucessivas (variando de 50 ms até 10 minutos), e o tempo total de aquisição. A figura III.2 mostra os equipamentos eletrônicos ligados, que formam o conjunto de aquisição e análise de dados, dispostos sobre a bancada experimental.

III.3 – Preparação dos traçadores radioativos.

Existe uma grande diversidade de traçadores que podem ser utilizados para se efetuar medidas de vazão e a escolha do mais adequado depende das características do sistema e do tempo de realização do experimento.

Alguns dos principais radiotraçadores convenientes para marcar a fase líquida, numa medida de vazão, e seus respectivos parâmetros característicos encontram-se listados na tabela III.2 (WESTMEIER, 1983). A meia-vida física do traçador é um parâmetro também relevante, no que concerne ao tempo de duração do experimento.

Os traçadores foram produzidos, por ativação neutrônica, no canal J9 do Reator Argonauta no IEN/CNEN. Para o processo de ativação neutrônica, as condições operacionais do reator foram:

- potência = 340 W;
- fluxo de nêutrons térmicos = $1,6 \times 10^9$ nêutrons/cm²-s;
- fluxo de nêutrons epitérmicos = $2,54 \times 10^7$ nêutrons/cm²-s;
- volume máximo de amostra a ser ativada = 5,0 ml;
- tempo de irradiação variável de 4 a 6 horas.

A escolha do ¹⁴⁰La como traçador se deu devido à facilidade de sua produção, pois é irradiado no próprio IEN por ativação neutrônica no reator Argonauta, através da reação ¹³⁹La (n,γ) ¹⁴⁰La. O lantânio é irradiado na forma sólida La₂O₃ e posteriormente dissolvendo com ácido clorídrico concentrado obtendo-se assim o LaCl₃.

Além do reator Argonauta (IEN/CNEN), o serviço de Radiofármacos/IEN dispõe do Ciclotron-CV28, que pode ser utilizado para gerar os traçadores via reações nucleares do tipo (p,n), como por exemplo o Iodo-123 (fornecido pelo IEN a hospitais e clínicas médicas especializadas), através da reação $^{124}\text{Xe} (p,n) ^{123}\text{I}$.

Os espectros referente aos radiotraçadores do Iodo-123 e do Lantânio-140 encontram-se na figura III.3

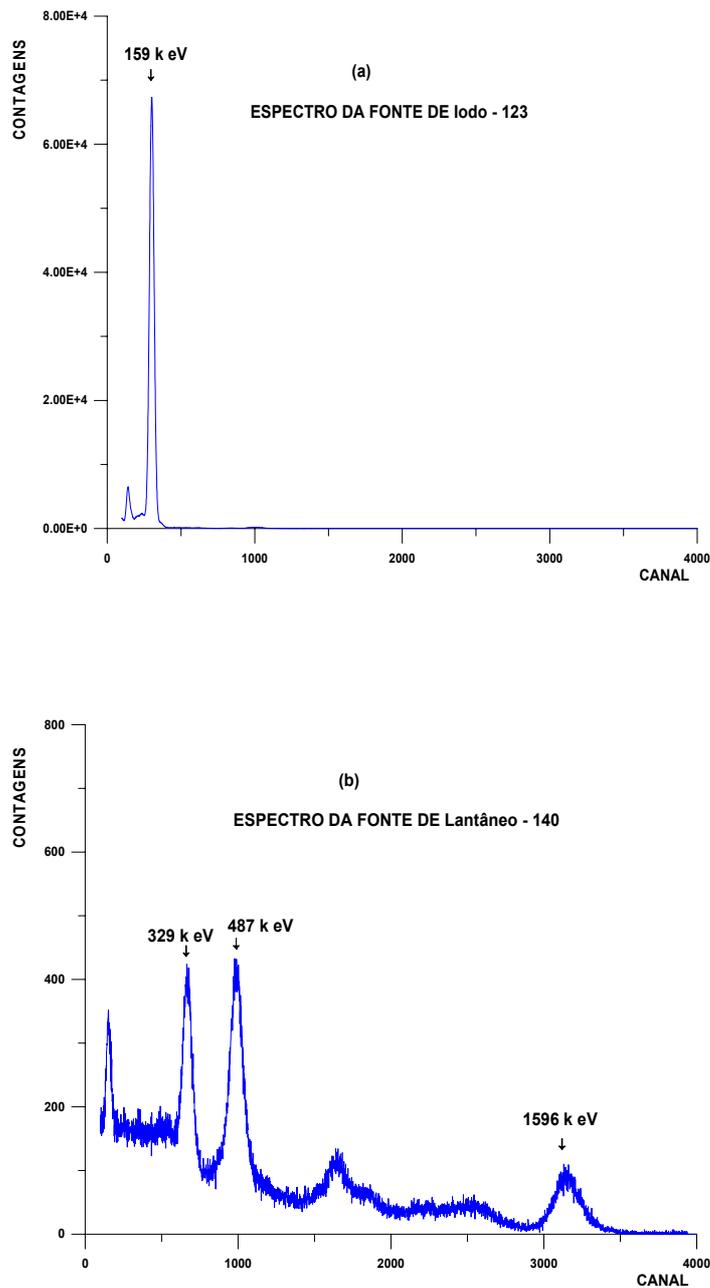


Figura II.3 – Espectros referentes aos radioisótopos: a) Iodo-123 e b) Lantânio-140.

Tabela III.2 – Radiotraçadores usados para marcar a fase líquida numa medida de vazão.

Isótopos	$T_{(1/2)}$	Energia gama (MeV)	Fórmula química
⁵⁶ Mn	2,6 h	0,847 (100%)	MnSO ₄
		1,812 (27,5%)	
		2,11 (14%)	
⁸² Br	36 h	0,776 (100%)	NH ₄ Br
		0,554 (84,6%)	
		1,317(32,2%)	
¹⁴⁰ La	40 h	1,596 (95,5%)	LaCl ₃
		0,487 (45,5%)	
		0,815 (23,5%)	
²⁰³ Hg	46,6 dias	0,279 (77,3%)	HgCl ₂
¹²³ I	13,2 h	0,027 (45,9%)	NaI
		0,031 (15,9%)	
		0,159 (83,4%)	
		0,657 (94,3%)	
		0,706 (16,6%)	
		0,763 (22,2%)	
^{110m} Ag	249,85 dias	0,884 (72,5%)	AgCl
		0,937 (34,1%)	
		1,384 (34,2%)	
		1,505 (13%)	
¹⁹⁸ Au	2,696 dias	0,411 (95,5%)	Au
¹⁵³ Sm	46,7 h	0,103 (28,3%)	SmO ₃
¹³¹ I	8 dias	0,364 (81,1%)	NaI

III.4 – Projeto e construção da unidade para a determinação da atividade total da amostra.

A técnica de radiotraçador que usa o método de injeção instantânea pelo método de Contagem-Total necessita do conhecimento acurado da atividade do traçador no volume a ser injetado, assim, projetou-se uma unidade, para a determinação da atividade total da amostra, medindo-se apenas 25 µl de solução contendo o radiotraçador. Para determinar-se a atividade, usa-se a equação (II.21).

A unidade foi montada num módulo retangular móvel, conforme ilustrado na figura III.4, com sua base forrada por tijolos de chumbo com 5,0 cm de espessura. Um cilindro de aço inox, com 5 mm de espessura de parede, 175 mm de diâmetro e

400 mm de altura foi posicionado verticalmente sobre o chumbo, conforme mostra a figura III.5.a, onde os componentes do módulo é mostrado em detalhe na figura III.5.b. Uma entrada para a estante que comporta o porta-amostra foi cortada na base inferior do cilindro e tem forma retangular com 42 mm de altura e 130 mm de comprimento. No interior do cilindro, foi posicionado um colimador de chumbo para o detector de NaI de 2"x 2", conforme ilustra a figura III.6, para blindar ao máximo a interferência das medidas provenientes da radiação de fundo.



Figura III.4 – Conjunto de aquisição e análise de dados, dispostos sobre a bancada experimental



(a)



(b)

Figura III.5 – (a) Unidade para determinação da atividade total;
(b) Detalhes da unidade com seus respectivos componentes: Cilindro de aço, blindagem e colimador de chumbo, detector A e estante porta-amostra.

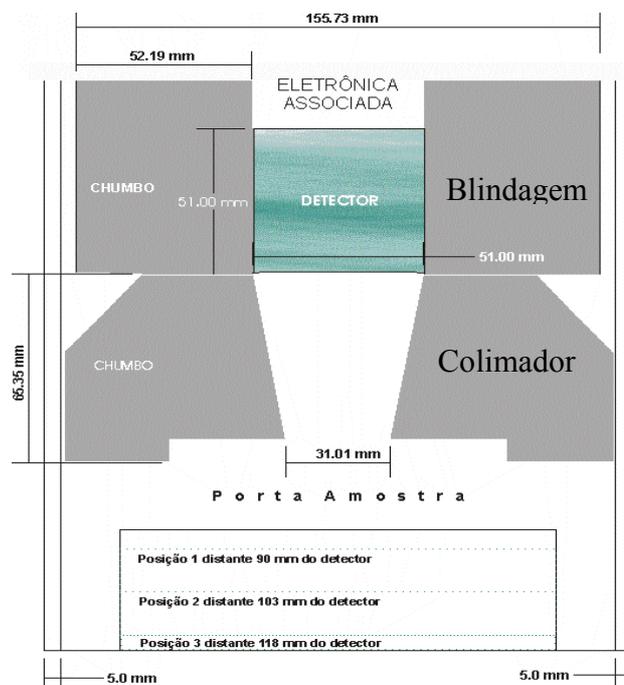
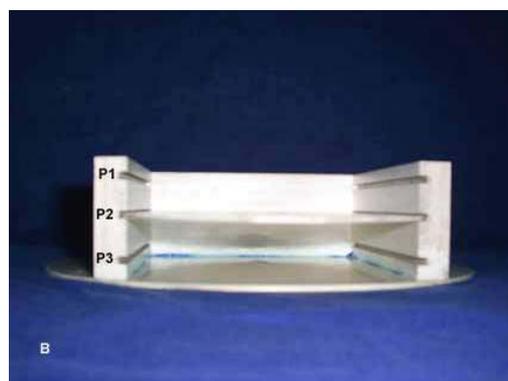


Figura III.6 – Corte frontal da unidade vista na figura III.5.a., mostrando a posição em detalhe da blindagem e do colimador de chumbo.

A estante que comporta o porta-amostra foi projetada de forma a dispor três posições diferentes para a colocação da bandeja. A bandeja possui um orifício, centrado com o detector, de modo a permitir que amostras com atividades maiores sejam posicionadas, nas posições de bandejas mais afastadas do detector (terceira posição), enquanto que a menos intensa, na primeira posição. As distâncias entre as posições da bandeja e o detector foram: 90 mm, em relação à primeira; 103 mm para a segunda; e de 118 mm, para a terceira, como mostra a figura III.7.



(a)



(b)

Figura III.7 – Estante com o porta-amostras, (a) Visão superior e (b) Visão frontal com os posicionamentos da bandeja no porta-amostra.

III.5 – Sistema montado para a determinação do Fator de Calibração.

Foi montado um sistema que possibilita relacionar taxa de contagem registrada pelo detector cintilador e a atividade empregada nos experimentos. Esse conjunto foi empregado na determinação do fator de calibração, F , necessário para o conhecimento da vazão.

O conjunto consiste em um cilindro de PVC, montado na vertical, com 1000 mm de altura e 75 mm de diâmetro, preenchido com água até um volume final a 2,5 l. O detector cintilador NaI (2" x 2") (detector D), foi posicionado na horizontal junto ao cilindro de PVC, e envolvido por um colimador de chumbo com 31 mm de diâmetro (exatamente o mesmo que foi utilizado nos experimentos da medida de vazão), como é mostrado a figura III.8.

Para se medir o fator de calibração o procedimento adotado consiste em adicionar-se com uma micropipeta de precisão modelo PIPETMEN da marca Gilson, alíquotas de $(25,00 \pm 0,35) \mu\text{l}$ do radiotraçador (^{140}La) e medir-se a contagem total durante 10 minutos. Gerou-se uma curva que relaciona a contagem registrada a cada injeção do traçador e a atividade e ajustou-se uma reta cujo coeficiente angular fornece o Fator de Calibração. A figura III.8 mostra a montagem experimental para a determinação do Fator de Calibração.

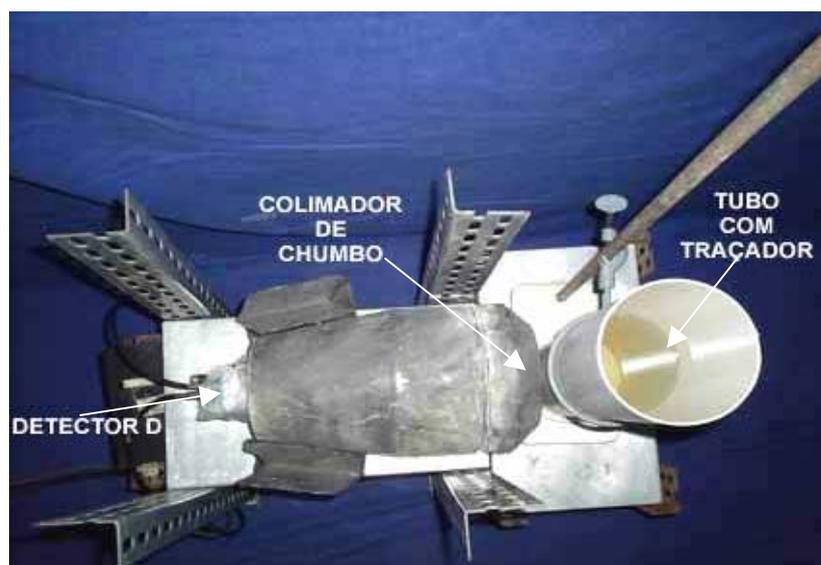


Figura III.8 – Visão panorâmica da unidade de medida para a determinação do fator de calibração.

III.6 – Unidade experimental destinada às medidas de vazão.

Um protótipo experimental montado no laboratório de Traçadores do IEN foi utilizado por BRANDÃO (2001), já que ele permite simular diferentes vazões de alimentação de sistemas. O conjunto é formado por dutos com diâmetros variados (20 mm e 75 mm), e um medidor de fluxo na entrada (Modelo Dwyer Instruments Inc., marca Michcity Ind.), que permite o ajuste constante para a vazão de alimentação entre $(0,8 \pm 0,2)$ l/min e $(8,0 \pm 0,2)$ l/min. O conjunto de dutos possui de diversos pontos para a injeção do traçador.

Em todos os experimentos foram empregados três detectores cintiladores que estavam posicionados em diferentes pontos permitindo a medida simultânea da vazão no sistema pelas técnicas: transiente de tempo e contagem total.

Os dois primeiros detectores, detector B e C, estavam localizados na posição em que o duto encontrava-se totalmente preenchido (detector B a 20,50 m e detector C a 42,60 m) do ponto de injeção do traçador e os resultados registrados pela passagem da nuvem radioativa pela região de sensibilidade destes detectores será empregado no cálculo da vazão pela técnica do transiente de tempo.

O detector D, posicionado a 46,20 m do ponto de injeção encontra-se em uma posição onde o detector não está totalmente preenchido (duto de 75 mm de diâmetro), e o seu resultado será usado para medida de vazão pela técnica de contagem total. Este detector é blindado por um colimador de chumbo igual ao empregado nos experimentos para medida do fator de calibração.

As figuras III.9 (visão geral do sistema, posicionamento dos detectores C e D), III.10 (posição do detector B e dutos totalmente preenchidos), III.11 (módulo detalhado do sistema de contagem total) e III.12 (detalhe do tanque de rejeito e detector D), mostram todo o conjunto usado para as medidas de vazão.

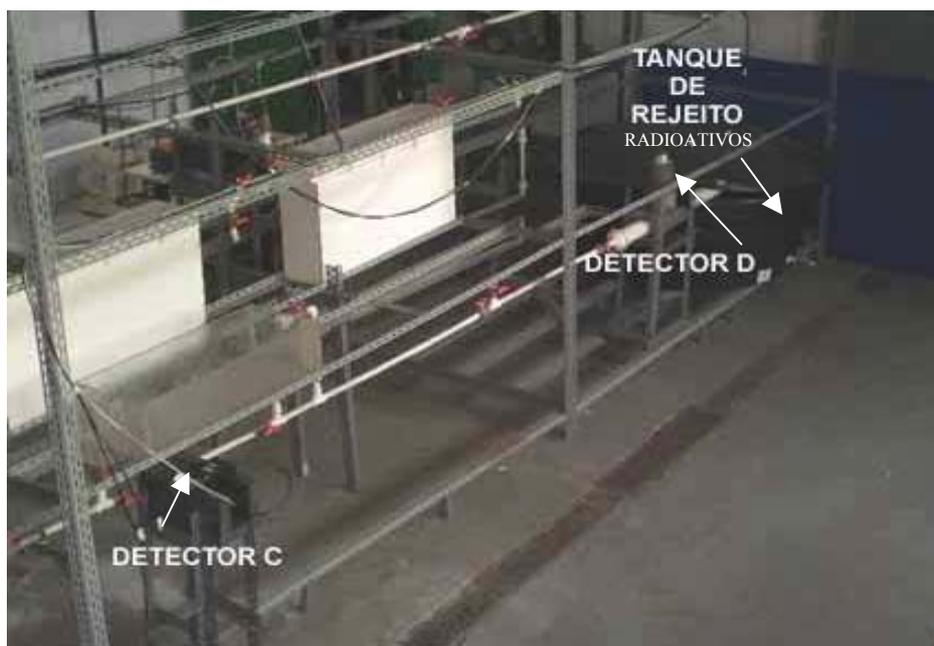


Figura III.9 – Visão panorâmica do final do sistema onde o traçador é mantido em um tanque, até sua atividade decair completamente, mostrando também os posicionamentos dos detectores C e D.

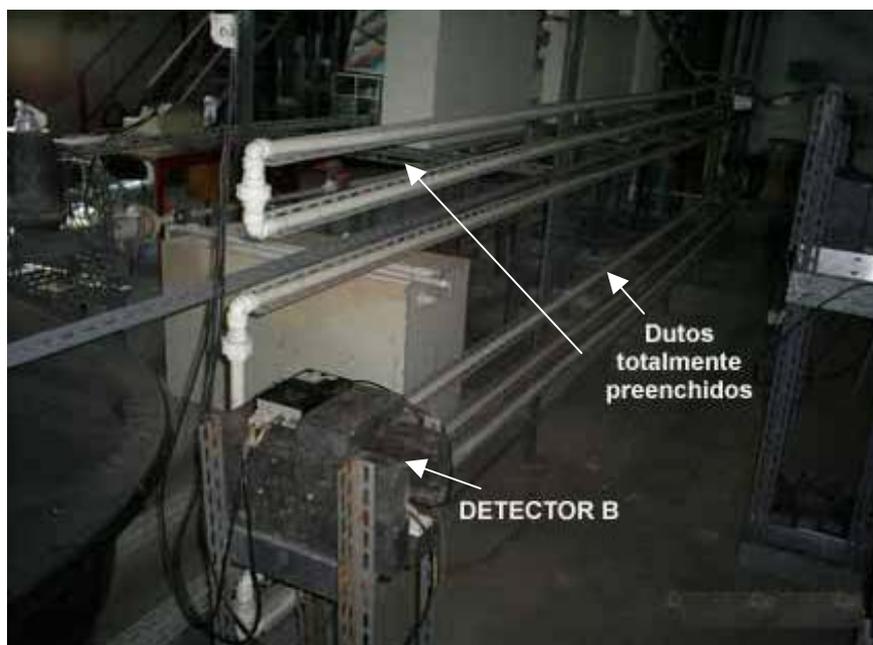


Figura III.10 – Condições de dutos totalmente preenchidos e o posicionamento do detector B blindado com chumbo.

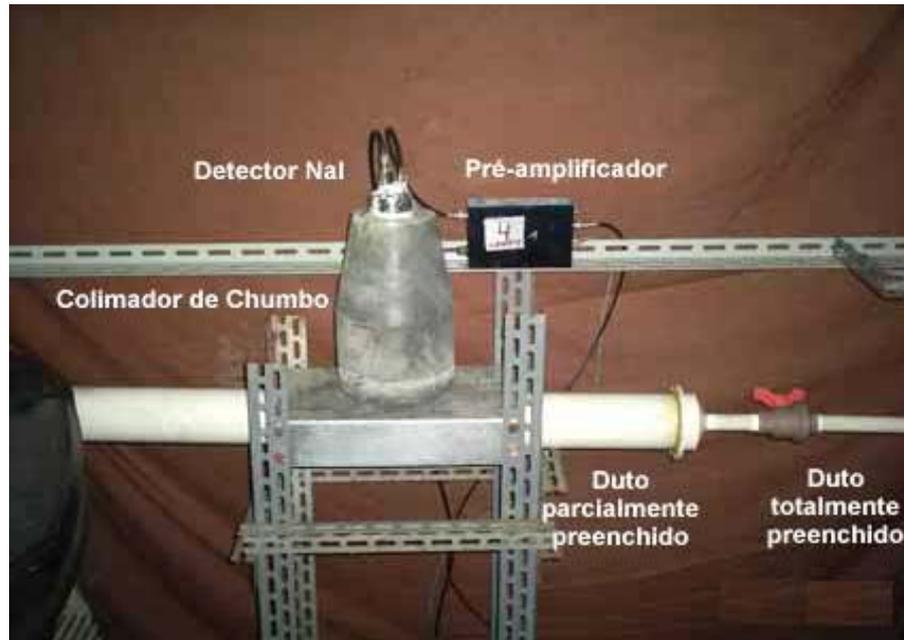


Figura III.11 – Geometria e posicionamento em detalhe do detector D, onde a blindagem de chumbo é colimada e moldada à entrada do detector NaI (2”x 2”) - sistema contador total.

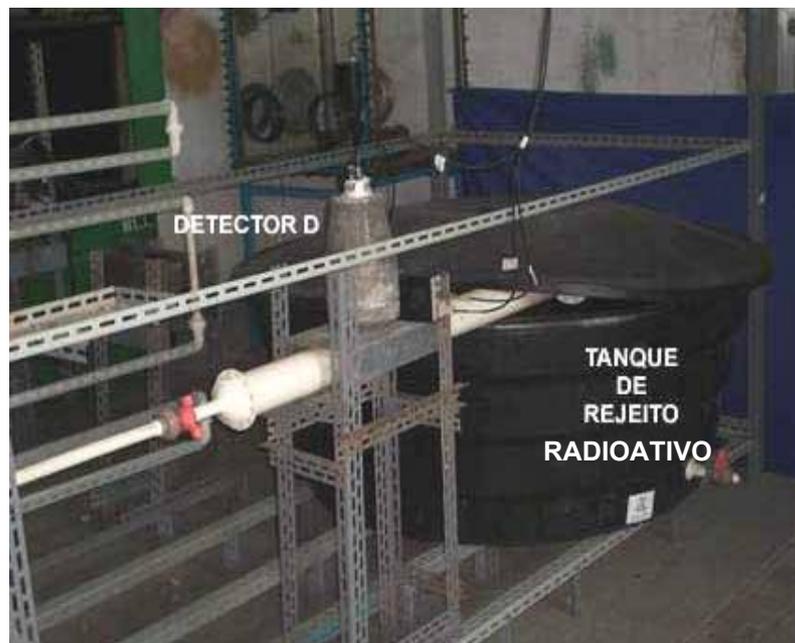


Figura III.12 – Final do sistema onde o traçador é mantido em um tanque, até sua atividade decair completamente, mostrando o posicionamento do detector D e o Tanque de Rejeitos Radioativos (efluentes radioativos).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E COMENTÁRIOS

IV.1 – Ponto de operação dos detectores NaI (2”x 2”).

A primeira etapa do trabalho foi levantar o ponto de operação dos detectores, cujo valor para cada um dos detectores está listado na tabela IV.1, na tabela também é mostrado o valor da resolução e da FWHM para o fotopico de 662 keV do ^{137}Cs . A figura IV.1 apresenta a curva característica para o detector A, e curvas semelhantes foram obtidas para os demais detectores.

Nota-se na figura IV.1 que a curva característica do detector A apresenta um pequeno patamar entre 1075 V e 1165 V, e de acordo com os procedimentos o ponto de operação ficou estabelecido em 1100 V, para este valor de tensão há uma pequena variação na taxa de contagem (referente a uma fonte padrão) para qualquer aumento/diminuição nessa tensão de operação.

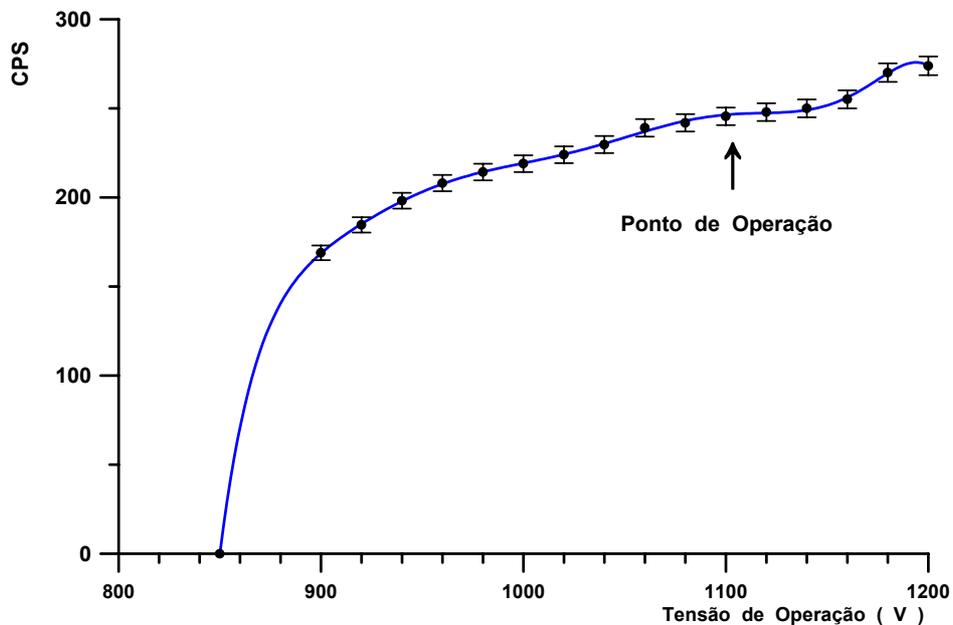


Figura IV.1 – Determinação do ponto de operação do detector A.

Tabela IV.1 – Características dos detectores cintiladores NaI: tensão de operação, FWHM e resolução para o pico de 662 keV do ^{137}Cs empregados nos experimentos.

DETECTOR	TENSÃO DE OPERAÇÃO (V)	FWHM (Canais)	RESOLUÇÃO (%)
A (Módulo de contagem de Atividade Total)	1100 ± 20	121	8,84
B (Primeiro detector - Transiente de Tempo)	1010 ± 20	90	11,23
C (Segundo detector - Transiente de Tempo)	1020 ± 20	134	11,84
D (Terceiro detector - Contador Total)	1080 ± 20	97	9,15

IV.2 – Cálculo do ângulo sólido (Ω) e fator geométrico (FG).

Para se determinar a atividade do radiotraçador, dada pela equação II.21, é necessário medir-se com precisão o valor do fator geométrico, formado pelo conjunto fonte/detector, conforme expressa a equação II.28, onde tem-se uma fonte radial plana e detector de face circular. Para isso, variou-se a posição da bandeja que serve de suporte para o porta-amostra, correspondendo às três distâncias diferentes entre o detector e a fonte, de acordo como descrito no item III.4.

A fonte radioativa possui um raio de 1,27 cm e o colimador do detector, 2,55 cm de raio, a figura III.4.b apresenta um esquema evidenciando o detalhe do conjunto detector/colimador de chumbo. A cada alteração da posição da bandeja, o ângulo sólido também muda, determinando-se, assim, a região sensível ao registro de fótons pelo detector.

Como mencionado no capítulo II.3, dois métodos foram empregados para o cálculo do ângulo sólido e do fator geométrico, porém pouco diferem nas duas metodologias adotadas, apresentando erros percentuais relativos entre os fatores geométricos menores que 0,2 %, conforme os valores dispostos na última coluna da tabela IV.2. No presente trabalho o método adotado para o cálculo do fator geométrico foi o sugerido pelo TSOLFANIDIS (1983), pois possibilita também o cálculo da incerteza associada a esta medida. Esta metodologia (método 2) já havia sido mostrada no trabalho de CANDEIRO (2003), onde estes procedimentos foram referenciados e validados pelo método de Monte Carlo.

Tabela IV.2 – Valores do ângulo sólido (Ω) e do fator geométrico (FG), em função do posicionamento da bandeja no porta-amostra, segundo método 1 e método 2, (onde P1:Posição 1 da Bandeja; P2:Posição 2 da Bandeja; P3:Posição 3 da Bandeja).

Posição	Ω método 1 (St rad)	FG método 1 (10^{-4})	Ω método 2 (St rad)	FG método 2 (10^{-4})	Erro Relativo de FG2 em FG1 (%)
P1	2,34E-01	(186,6 \pm 0,7)	2,35E-01	186,9E-02	0,14
P2	1,82E-01	(144,9 \pm 0,6)	1,82E-01	145,0E-02	0,07
P3	1,41E-01	(111,9 \pm 0,4)	1,41E-01	111,9E-02	0,04

A metodologia desenvolvida adotada por OBLOZINSKYE et al (1971), permite também o cálculo do ângulo sólido para sistemas em que o conjunto fonte/detector não sejam coplanares, já a adotada por TSOLFANIDIS (1983), por ser um procedimento mais simplificado exige que o detector esteja centralizado com a fonte de radiação.

Como neste trabalho todos os arranjos experimentais consideravam o detector centrado na unidade de medida, o procedimento adotado foi o desenvolvido por TSOLFANIDIS.

IV.3 – Cálculo da eficiência de fotopico para o detector A.

De acordo com o item II.3, o conhecimento do valor da eficiência de fotopico para o detector é um parâmetro importante no processo de medida da atividade absoluta das amostras que serão injetadas no sistema. Assim, para medir-se esta característica do detector foram registrados espectros de cada uma das fontes citadas na tabela III.1, cujos espectros para as fontes de ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{22}Na e ^{60}Co são mostrados na figura IV.2.

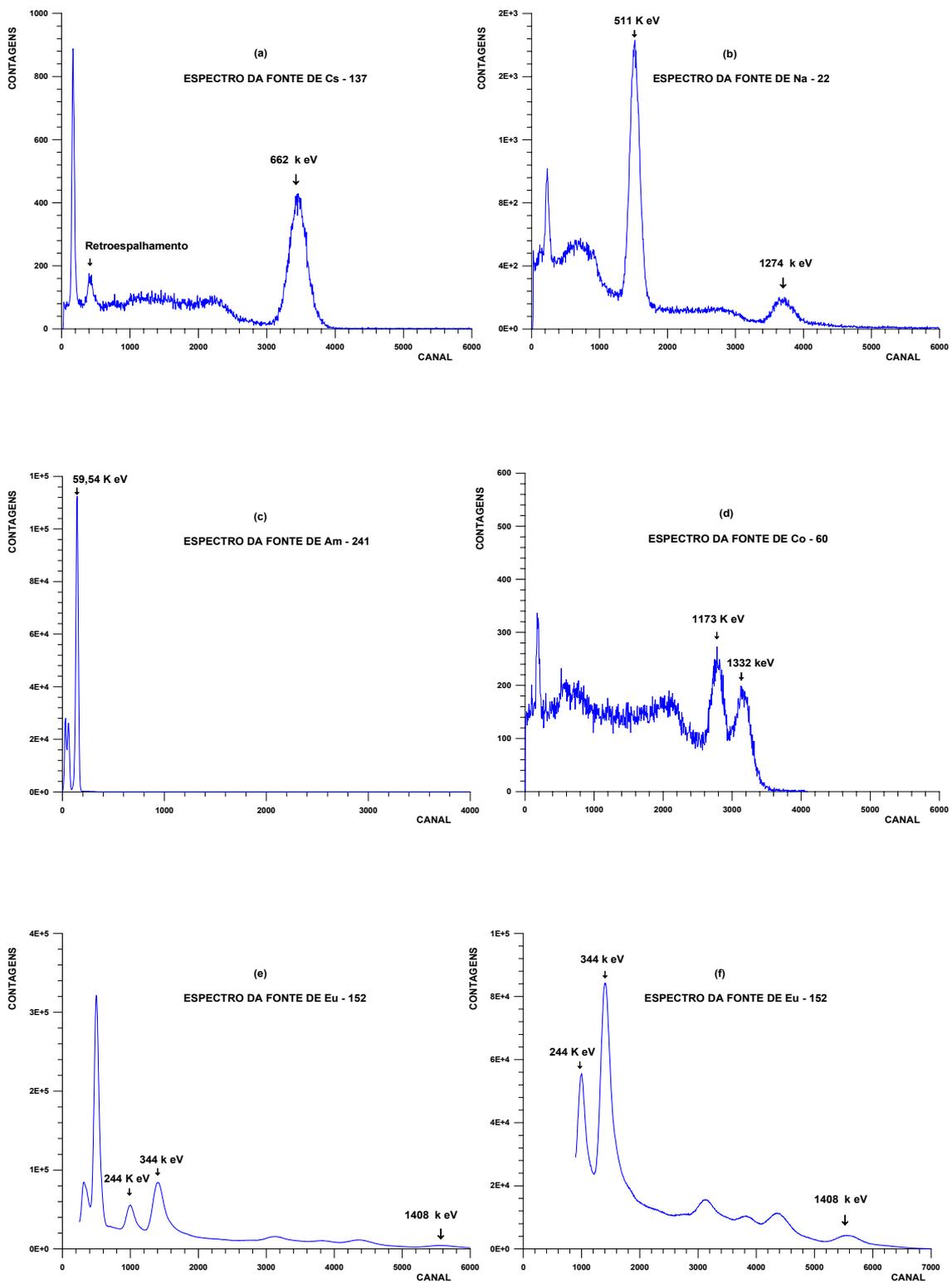


Figura IV.2 – Espectros referentes aos radioisótopos: a) ^{137}Cs , b) ^{22}Na , c) ^{241}Am , d) ^{60}Co , e) ^{152}Eu e f) detalhe das energias do espectro do ^{152}Eu .

Apesar de alguns espectros registrarem mais de uma energia, foram selecionadas as mais intensas e as bem discriminadas em energia para o cálculo da eficiência, não havendo possibilidade de interferentes no cálculo da área total do fotopico.

Para cada uma das fontes de calibração, foram registrados três espectros independentes durante dezesseis horas em cada uma das posições (P1, P2 e P3) da bandeja na unidade de medida. Com o auxílio da equação II.23 e dos valores de fator geométrico dispostos na tabela IV.2, determinou-se os valores correspondentes da eficiência para cada uma das energias de interesse, a figura IV.3 apresenta uma curva ajustada para um valor médio, de cada ponto experimental, da eficiência de fotopico para o detector A.

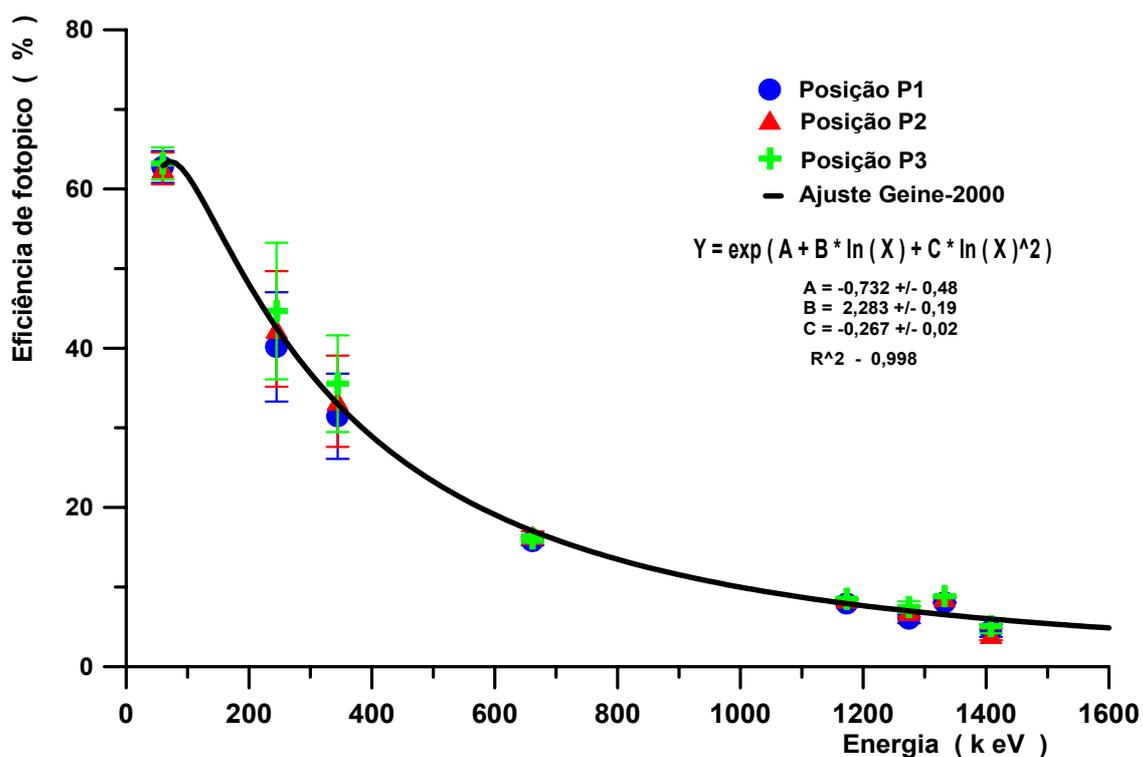


Figura IV.3 – Eficiência de fotopico do detector A com os pontos calculados referentes as três posições da bandeja.

A curva representa um ajuste matemático por método de mínimos quadrados não linear para os valores da eficiência calculada nas energias definidas da tabela III.1, cujos valores são ajustados através do programa da placa de multicanal da Canberra, GENIE-2000 (1999), e os ajustes para cada posição da bandeja são apresentados na tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Valores ajustados para a função $\ln(\epsilon) = A + B \ln(E) + C \ln(E)^2$, sendo E a energia em keV.

Posição da Bandeja	A	B	C	R ²
1	-0,26	2,11	-0,25	0,99
2	-0,72	2,28	-0,27	0,99
3	-1,19	2,46	-0,28	0,99

De acordo com a figura IV.3 e a tabela IV.3, observa-se que, neste sistema, as curvas ajustadas se sobrepõem, não ocorrendo uma variação significativa da eficiência de fótópico entre as posições de bandeja. Este fato é devido à pequena variação na distância entre as posições, o que é acarretado, por sua vez, pela pequena variação no ângulo sólido e no fator geométrico. Nota-se também, como mencionado no item II.3, que, quanto maior a energia da fonte radioativa mais baixa será a eficiência de fótópico.

IV.4 – Cálculo da atividade usando o contador de atividade total.

Para se testar o contador de atividade total, foi usada uma fonte de ¹³⁷Cs padrão com atividade de 168 kBq. Três medidas foram efetuadas com trinta minutos de duração, correspondentes a cada posição da bandeja. Os valores médios das atividades encontram-se dispostos na tabela IV.4.

Como pode se observar na tabela IV.4, os valores encontrados para as atividades apresentam um erro relativo ao valor absoluto da atividade de até 5%, esse fato é devido principalmente a dificuldade de obter-se espectros bem resolvidos para fonte de césio empregando detectores cintiladores de NaI, que apresenta baixa resolução em energia de aproximadamente 9%.

Tabela IV.4 – Valores das atividades médias, considerando-se a área sob o fotopico de energia de 662 keV para a fonte calibrada de ^{137}Cs .

11/10/2005	Exp.	Atividade (k Bq)	Atividade Média (k Bq)	Valor teórico (k Bq)
P1	1	(166,10 ± 6,66)	(166,36 ± 11,55)	168,24
	2	(166,71 ± 6,68)		
	3	(166,30 ± 6,66)		
P2	1	(172,08 ± 6,09)	(169,34 ± 11,76)	168,24
	2	(169,69 ± 6,81)		
	3	(166,26 ± 6,67)		
P3	1	(174,56 ± 7,00)	(176,62 ± 12,27)	168,24
	2	(177,31 ± 7,11)		
	3	(177,99 ± 7,14)		

IV.5 – Fator de calibração.

Este fator é o ponto mais importante da técnica de contagem total, onde sem ele é inviável sua utilização, e depende do instrumental usado na medição, da energia do radioisótopo utilizado e da geometria de detecção.

Na medida experimental do fator de calibração foi empregado o dispositivo descrito no item III.5, e o detector empregado foi o mesmo usado nos experimentos da medida de vazão.

Em todos os testes foram utilizados como traçador o ^{140}La (fotopico de 1596 keV) e o $^{123}\text{Iodo}$ (fotopico de 159 keV) e o procedimento consistia em acrescentar alíquotas de 25 μl (atividade média calculada de $(9,15 \pm 0,91)$ kBq para o Lantânio e $(40,19 \pm 3,96)$ kBq para o Iodo), em um volume total de 2,5 litros de água contidos no tubo de PVC.

Utilizando-se do sistema SAD, descrito no item III.2, registrou-se as contagens totais relativas às atividades injetadas no sistema, e o procedimento adotado para a elaboração que relaciona a atividade injetada com a contagem registada pelo detector cintilador e descrito no item III.5. A figura IV.4 mostra a curva gerada pelo SAD e para

eliminação do ruído eletrônico empregou-se o programa TRACER desenvolvido por BRANDÃO (2001), que por meio de técnica de Fourier filtra o espectro.

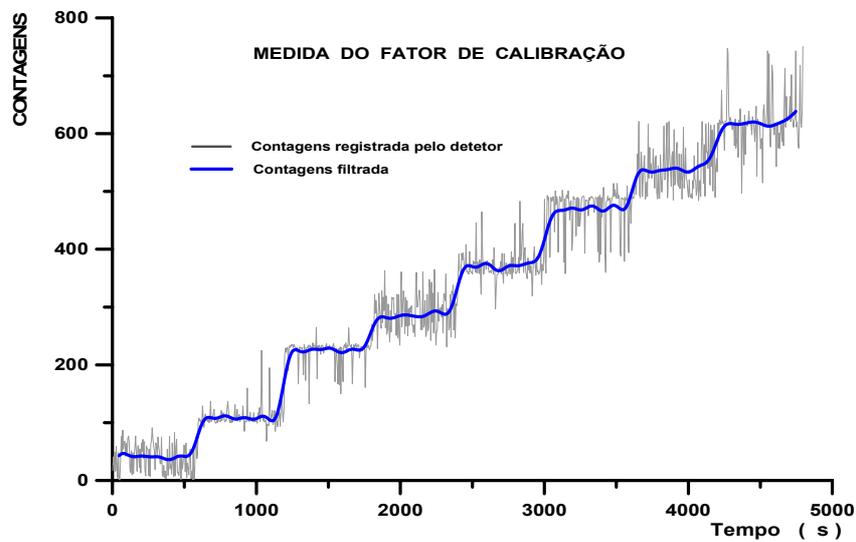


Figura IV.4 – Contagens relativas a cada injeção de 25µl do traçador ^{140}La .

A cada degrau formado por alíquota injetada, selecionou-se o intervalo de tempo de 200 segundos para integração, gerando contagens por segundo (CPS) a cada degrau, e estes pontos formaram a curva mostrada na figura IV.5, que relaciona a taxa de contagens com a atividade injetada por unidade de volume.

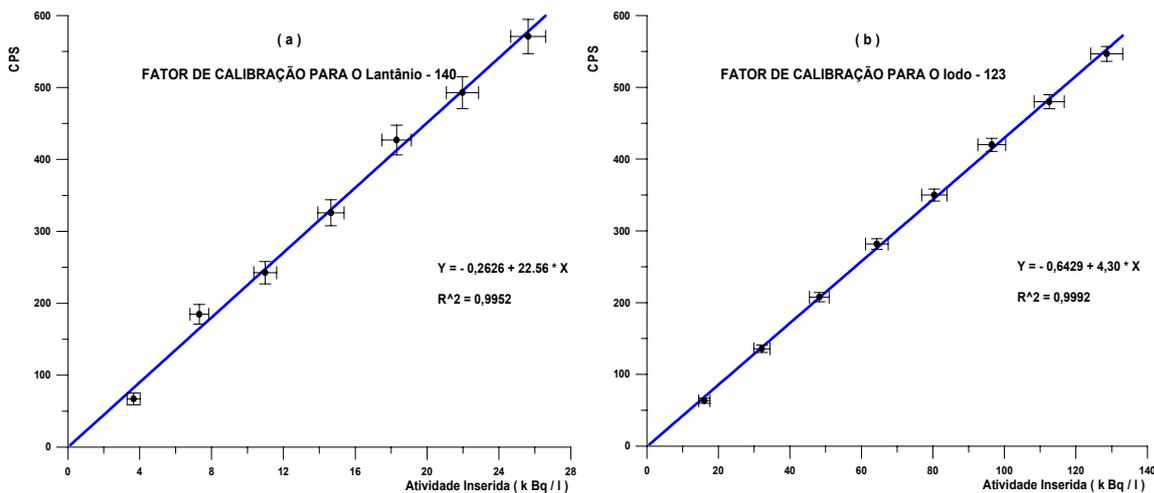


Figura IV.5 – Determinação do Fator de Calibração, dado pelo coeficiente angular da curva ajustada para os valores das taxas de contagens totais relativas às atividades de radiotraçador injetadas no sistema, sendo: a) Lantânio-140 e b) Iodo-123.

O coeficiente angular da reta ajustada é o fator de calibração do sistema para o duto de 75 mm de diâmetro e o seu valor é de $(22,56 \pm 0,70)$ CPS/kBq/litro para o Lantânio-140 e $(4,3 \pm 0,05)$ CPS/kBq/litro para o Iodo-123.

Para diferentes escolhas de geometrias e de radioisótopos, necessita-se determinar o novo fator de calibração, correspondente ao conjunto traçador/sistema de medida.

IV.6 – Cálculo da vazão utilizando o método de transiente de tempo e o método de contagem total.

Como radiotraçador empregou-se o ^{140}La , pois apresenta as vantagens: uma energia maior (1596 keV) possibilitando o uso de atividades menores, e também de ter meia-vida curta de 40 horas. Já o ^{123}I por apresentar uma energia menor 159 keV, com meia-vida de 13 horas, possui também solubilidade variando de (1,587 g/litro para 0 °C) até (2,568 g/litro para 60 °C) (HANDBOOK, 1960), causando uma dispersão do traçador maior, com isso, necessita-se de usar uma atividade maior. A tabela IV.5 apresentam as principais características do radiotraçador de ^{140}La e do ^{123}I .

Tabela IV.5 – Características dos radiotraçadores estudados neste trabalho.

Características	^{140}La	^{123}I
Nome do elemento	Lantânio	Iodo
Número Atômico	57	53
Número de Massa	140	123
Massa Atômica	138,906	126,904
Meia-Vida	40,22 Horas	13,13 Horas
	329 (20,5)	27 (45,9)
Energias (k eV)	487 (45,5)	31 (15,9)
(probabilidade %)	816 (23,5)	159 (83,4)
	1596 (95,5)	-

Através de uma mesma injeção, foram determinados os valores da vazão, empregando-se a técnica de Transiente de Tempo e a técnica de Contagem Total, simultaneamente, permitindo relacioná-los entre si e ainda referenciar esses valores ao fornecido pelo medidor de fluxo na entrada do sistema (vazão teórica).

Os detectores foram posicionados em locais distintos, com os detectores B e C usados para medir a vazão pelo método de Transiente de Tempo (onde o duto estava totalmente preenchido), e o detector D, na saída do sistema, usado para calcular a vazão pelo método de Contagem Total (duto parcialmente preenchido).

Para o cálculo da vazão utilizando o método de transiente de tempo foram normalizadas as curvas geradas pelo SAD, para os detectores B e C. As curvas E(t) geradas foram utilizadas para calcular o tempo médio de residência da nuvem radioativa ao passar por cada detector.

Nove injeções foram feitas e os valores de vazão foram determinados pelas técnicas de transiente de tempo e de contagem total e os valores encontrados pela técnica de transiente de tempo são listados na tabela IV.6 e os decorrentes do uso da técnica de contagem total, na tabela IV.7.

Na tabela IV.6, τ_1 é o tempo médio de residência do primeiro detector; τ_2 é o tempo médio de residência do segundo detector. Tanto τ , como o erro para o tempo médio de residência, são determinados, a partir dos dados experimentais, com $\tau = M_1$ (o momento de ordem zero em torno da origem) e o erro relativo a cada tempo, M_2 , momento de ordem dois em torno da média, dados pelas equações II.36 e II.37, respectivamente.

Tabela IV.6 – Valores de vazão determinados pela técnica de transiente de tempo.

Vazão Teórica (l/min.)	Exp.	τ_1 (s)	τ_2 (s)	Vazão Exp. (l/min.)	Vazão Média (l/min.)
(7,97 ± 0,19)	1	(226,89 ± 2,1)	(327,04 ± 2,7)	(7,99 ± 0,58)	(7,96 ± 0,97)
	2	(202,88 ± 2,2)	(303,10 ± 2,3)	(7,94 ± 0,49)	
	3	(206,79 ± 2,5)	(307,14 ± 2,9)	(7,96 ± 0,61)	
(3,97 ± 0,19)	1	(129,06 ± 2,6)	(178,98 ± 2,7)	(3,98 ± 0,13)	(3,97 ± 0,23)
	2	(150,74 ± 2,3)	(200,92 ± 2,1)	(3,98 ± 0,12)	
	3	(71,32 ± 2,4)	(121,39 ± 3,1)	(3,97 ± 0,15)	
(1,89 ± 0,19)	1	(341,38 ± 4,8)	(551,08 ± 5,3)	(1,90 ± 0,64)	(1,91 ± 1,14)
	2	(278,08 ± 5,1)	(486,12 ± 4,9)	(1,92 ± 0,65)	
	3	(294,79 ± 5,5)	(503,43 ± 5,4)	(1,91 ± 0,70)	

Para o cálculo da vazão pelo método de injeção instantânea com a técnica de contagem total, utilizou-se um duto com diâmetro de 75 mm que se encontrava parcialmente preenchido. A área das curvas gerada, para cada detector, pela passagem da nuvem radioativa, representa a contagem total do traçador e exemplos para cada vazão são mostradas na figura IV.6, assim como o filtro.

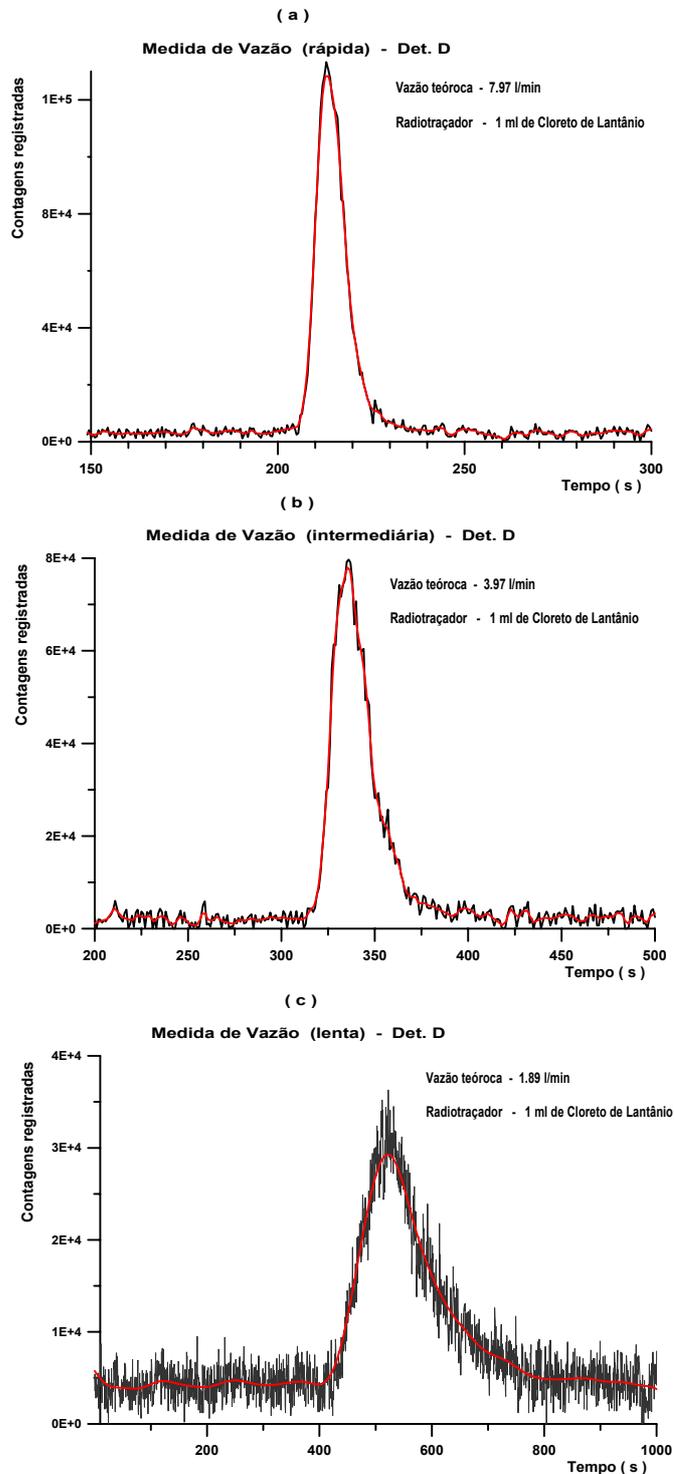


Figura IV.6 – Curvas C(t) com seu respectivo filtro para o detector D: a) vazão rápida, b) vazão intermediária e c) vazão lenta.

Observa-se na figura IV.6 que perdemos parte da área da curva C(t) ao filtra-la, sendo esta a principal fonte de erro neste método, sendo o erro maior encontrado nas vazões mais lentas, uma possível minimização deste erro é aumentar a atividade.

Na tabela IV.7, Vz é a vazão teórica fornecida pelo medidor; At é a atividade total injetada no fluido; N é a contagem total registrada no detector pela passagem pela nuvem radioativa no ponto de medida; Vazão Exp. é a vazão calculada experimentalmente e o valor do fator de calibração foi determinado, de acordo como exposto no item IV.5.

Tabela IV.7 – Valores de vazão determinados pela técnica de contagem total.

Vz (l/min.)	Exp.	N (contagem)	At (* 10 ² kBq)	Vazão Exp. (l/min.)	Vazão Média (l/min.)
(7,97 ± 0,19)	1	(85573 ± 292)	(5,138 ± 0,04)	(8,13 ± 0,66)	(8,14 ± 1,14)
	2	(85183 ± 291)		(8,16 ± 0,66)	
	3	(85423 ± 292)		(8,14 ± 0,66)	
(3,97 ± 0,19)	1	(182472 ± 427)	(5,138 ± 0,04)	(3,81 ± 0,31)	(3,81 ± 0,54)
	2	(183063 ± 428)		(3,80 ± 0,31)	
	3	(182533 ± 427)		(3,81 ± 0,31)	
(1,89 ± 0,19)	1	(295219 ± 543)	(3,661 ± 0,04)	(1,62 ± 0,16)	(1,63 ± 0,28)
	2	(293393 ± 542)		(1,63 ± 0,16)	
	3	(294494 ± 543)		(1,63 ± 0,16)	

Técnica de transiente de tempo:

Os resultados das medidas apresentaram uma incerteza relativa da ordem de 1%. O método é uma técnica absoluta, podendo ser usado para a calibração e a aferição de medidores de vazão instalados em linha e pode ser usado para a medida direta de vazão de fluidos em geral, dependendo somente da condição do duto estar totalmente preenchido e de que o traçador seja completamente misturado ao meio.

Para assegurar um registro ideal da passagem do traçador nas posições de medidas e garantir uma boa precisão dos resultados finais, devem ser observadas as seguintes condições:

- processo de injeção do traçador no meio é uma operação que deve ser efetuada com atenção, para que o sinal de entrada seja o mais próximo possível de um pulso perfeito.
- uso de colimadores apropriados.

Técnica de contagem total

Os resultados das medidas apresentaram uma incerteza relativa ao medidor da ordem de 2,5% para vazões rápidas (7,97 l/min.), de 4% para vazões intermediárias (3,97 l/min) e 14% para vazões lentas (1,89 l/min). O método revelou-se bem versátil, podendo ser utilizado em medidas ambientais e industriais. Devido a sua praticidade, por não necessitar do volume da secção reta, pode medir fluxos simples e complexos, como os encontrados em rios, com sistemas divergentes e convergentes, os erros encontrados são relativamente baixos. A técnica necessita, para tal, que se determine o valor do fator de calibração, para a mesma geometria e tempo de contagem do experimento real.

Pelos valores encontrados na tabela IV.7, observa-se que, para a vazão mais lenta de 1.89 l/min, os erros relativos aos teóricos resultaram maiores, isso devido a nuvem gerada pelo traçador apresentar-se mais dispersa e com uma calda maior, gerando assim um erro maior na medida da área sob a curva, uma possível solução é aumentar a atividade para medir vazão lenta. Para se assegurar um registro mais próximo do ideal, a injeção deve ser feita com atenção, de forma a ser a mais rápida possível.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Como conclusão deste trabalho tem-se:

- A unidade de contagem de atividade total apresentou medidas relacionadas a uma fonte padrão com erro aproximado de 4%, permitindo medir amostras com energias variando de 50 keV até 1600 keV.

- Os resultados para medida de vazão mostraram-se eficientes, obtendo-se um erro percentual de 1% referente às medidas para o método de transiente de tempo e de 2% a 14 % para o método de contagem total. Apesar de terem sido obtidos em condições controladas no laboratório, as técnicas possibilitam serem empregadas em medidas de campo, onde a precisão está relacionada com a qualidade dos dados registrados nos detectores e que independe de qualquer outro dado. Por isso, as técnicas de medida de vazão empregando-se traçadores radioativos são consideradas técnicas absolutas e podem ser aplicadas nas mais diversas condições de: vazão, geometria do recipiente e do tipo de fluido.

- A técnica de contagem total foi bem sucedida com erros referente ao valor teórico de 2,5% para vazões rápidas (7,97 l/min.), de 4% para vazões intermediárias (3,97 l/min) e 14% para vazões lentas (1,89 l/min), possibilitando medir em sistemas com volumes incompletos. Sendo a metodologia dependente apenas do fator de calibração que quando calculado com precisão, permite encontra-se valores de vazão para as mais diversas condições de fluxo. O procedimento experimental para o dado real é muito mais simples no caso de dutos já que a medida experimental do fator de calibração é muito mais simplificada que para os casos de sistemas complexos, como por exemplo, num rio ou em um estuário. Com a grande vantagem de poder medir vazão em sistemas de fluidos convergentes ou divergentes, o que não ocorre com a técnica de transiente de tempo.

Como sugestão de trabalhos futuros fica a proposta da aplicação do método de injeção instantânea pela técnica de contagem total, efetuando medidas de vazões em rios, canais, entrada de estuários e oceanos ou até em um sistema de tratamento de esgoto, posicionando o detector sobre ou submerso ao sistema, obtendo diferentes geometrias para aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUDO, E.G., DUARTE, V., OHARA, T., SANCHES, W., 1973, *Studies for the disposal system of the sewers of Santos and São Vicente (Brazil)*. In: IEA-319, Instituto de Engenharia Atômica, São Paulo, Brasil.

AGUDO, E.G., SANTOS, J.L., MERIGHI, J.A., SANCHEZ, W., ALBUQUERQUE, A.M., 1976, *Study of the water transit time in the Tiete and Pinheiros rivers*. In: IEA-404, Instituto de Energia Atômica, São Paulo, Brasil.

ALTINSOY, N., TUGRUL, A.B., “A radiotracer application for the turbulent dispersion of fluids”, *Applied Radiation and Isotopes*, 51, pp.367-375.

BEAM, G.B, WIELOPOLSKI, L., GARDNER, R.P., VERGHESE, K., 1978, “Monte Carlo calculation of efficiencies of right-circular cylindrical NaI detectors for arbitrarily located point sources”, *Nuclear Instruments and Methods*, n.154, pp. 501-508.

BEDMAR, P., 1972, *Isótopos em Hidrologia*. Editora Albambra.

BENISCHKE, R., 1989, “Fluorescent Tracers in Hydrology, principles, instrumentation, Physico-Chemical Properties, Analytics”, *Institute for Geothermics e Hydrogeology*, Joanneum Research.

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.

BREG, O., SOMER, E., 1962, “Determination of the distribution of sewage concentration in large natural waters from planned sewage outlets”, *Int. J. appl. Rad. & Isotopes*, 14, pp.525-526.

CANAVARRO, M., PEREIRA, C., 2005, “Blecaute afeta estação da Cedae”, *Jornal do Brasil Online* 03/01/05.

CANDEIRO, R.E.M., 2003, *Medida de Tempo de Residência em Tanques Industriais, Usando uma Unidade Estanque para Detector Cintilador Submerso*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARVALHO, M. R., SOARES, A. J., 1996, “Determinação do Fator Geométrico em Monitores de Gases Radioativos”, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, v. 11, n. 2 (Jun), pp. 65-70.

CHARTON, J.S, WELLMAN, E.F, 1990, “Quality improvement in industrial process plants – the role of radioisotopes”, *App. Radiat. Isot.*, v. 41, n.10/11 pp. 1067-1077.

CLAYTON, C.G., 1967, “The measurements of flow of liquids using radioactive isotopes”, *Isotopes and Rad. And Tech.*, v. 4 n.2.

CLAYTON, C.G., CLARK, W.E., BALL A.M., 1959.a, *The Accurate Measurement of Turbulent Flow in Pipes Using Radioactive Isotopes - The isotope dilution method*. In: Report Number(s) AERE-R-3028.

CLAYTON, C.G., CLARK, W.E., BALL, A.M., 1959.b, *The accurate measurement of turbulent flow in pipes using the isotope velocity method and the effect of some restrictions on option*. In: Report Number(s) AERE-R-3090.

DANCKWERTS, P.V., 1953, “Continuous Flow Systems – Distributions of Residence Times”, *Chem. Eng. Sc.* v.2, n.2 (Feb), pp. 1-18.

DARIANO, D., 2005, “Novo vazamento ameaça o Rio”, *Jornal do Brasil Online* 03/04/05.

DUARTE, U., 1973, *Métodos de Determinação de Vazão com o Emprego de Traçadores Radioativos*. Dissertação de M. Geociências, USP, São Paulo, SP, Brasil.

ESPECTRÔMETRO, 1997, *Manual de Serviço do Espectrômetro de Radiações Nucleares MS-4031 – Departamento de Instrumentação e Controle*, IEN/CNEN.

GARDNER, R.P., CARNESALE, A., 1969, “The Solid Angle Subtended at a Point by a Circular Disk”, *Nuclear Instruments and Methods*, v.73, pp. 228-230.

GASPAR, E., ONCESCU, M., 1972, “Flow Rate Measurement”. In: Gaspar, E., *Radioactive Tracers in Hidrology*, Ed. Academiei Bucurest.

GENIE-2000, 1999, *Manual de Instalação Técnica GENIE-2000*, Spectroscopy System Operations.

GODLEY, A., 2002, “Flow measurement in partially filled closed conduits”. *Flow Measurement and Instrumentation*, v.13, pp. 197-201.

GUIDEBOOK, 1990, “Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry”, In: Technical Reports Series- N316, IAEA , Viena.

HANDBOOK, 1960, *Handbook of chemistry and Physics*, Forty-Second Edition, The chemical Rubber publishing Co. Ed..

HIMMELBAU, D.M., BISCHOFF, K.B., 1968, *Process Analysis and Simulation – Deterministic Systems*, John Wiley & Sons.

HULL, D. E., 1958, “The Total-Count Technique: A New Principle in Flow Measurement”, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 4, pp. 1-15. Pergamon Press Ltd., London.

HULL, D. E., 1962, "Dispersion and Persistence of Tracer in River Flow Measurements", *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 13, pp. 63-73. Pergamon Press Ltd. Printed in Northern Ireland.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 1966, "Guide to the Safe Handling of Radioisotopes in Hydrology". In: Safety series, no. 6, IAEA, Viena.

JAFFEY, A. H., 1954, "Solid Angle Subtended by a Circular Aperture at Point and Spread Sources: Formulas and Some Tables", *The review of scientific instruments*, v. 25, n.4, pp. 349-354.

KNOLL, G.F., 1989, *Radiation Detection and Measurement*, 2 ed, John Wiley & Sons Ed..

KUOPPAMÄKI, R., 1977, "The Applicability of Tracer Techniques for Studies on Sewage Treatment Process Dynamics", *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 28, pp. 833-837.

LAFFERTY, Jr. R. H., 1971, "Flow Measurements with Radioisotopes", *Isotopes and Radiation Technology*, v. 8, n. 3.

LJUNGGRENT, K., 1967, "A Review of the Use of Radioisotope Tracers for Evaluating Parameters Pertaining to the Flow of Material in Plant and Natural Systems", *Isotopes and Radiations Technology*, v. 5, n. 1.

MAFRA, O.Y., 1973, *Técnicas e medidas Nucleares*, Editora Edgard Blücher.

MINC, C., 2004, "Rio Paraíba do Sul", *Jornal do Brasil Online* 20/09/04.

NAJERA, J.F., ESTRADA, P., FLORES, R., GUTIERREZ, C., ORTIZ, J.L., SEPULVEDA, A., 1976, "Medición de Gastos en Canales Abiertos Mediante Radiotrazadores", *Recursos hidraulicos*, v. V, n.1, pp. 74-82.

OBLOZINSKY, P., RIBANSKY, I., 1971, “The Solid Angle at a Disk Source by a Non-Parallel Disk Detector”, *Nucl. Instrum. And Meth.* n. 94, pp. 187-188.

PAPP, Z., 1995, “Use of Defined Solid Angle Absolute β Counting for Environmental Radioanalytical Purposes Part. I Method”, *Isotopes Environ. Health Stud.*, v. 31, pp. 131-141.

ROLDÃO, J., SOARES, J., 1989, “Determinação (In Situ) da Capacidade de Transporte e Dispersão do Rio Paraíba do Sul no Trecho Volta Redonda – Barra do Pirai” In: Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, Lisboa, v. 2 (Jun), 572-585.

ROLDÃO, J., PECLY, J., AMARAL, J., 2003, “Emprego de Traçadores Fluorescentes para Avaliar a Dispersão Transversal em um Trecho do Rio Paraíba do Sul”. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba-PR, (23/27) (Nov), pp. 1-15.

RUBY, L., RECHEN, J.B., “A simpler Approach to the Geometrical Efficiency of a Parallel-Disk Source and Detector System”, *Nucl. Instrum. And Meth.* n.8, pp. 345-346.

SILVA, G., 2001, *Impactos ambientais na bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns/Goiânia – Goiás*. Dissertação de M. em Geografia, IESA/UFG, Goiás, Goiânia.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD), 1991, *Manual Comunicação Interna – Departamento de Instrumentação e Controle*, IEN/CNEN.

SPIEGEL, M.R., 1970, *Estatística – Coleção Schaum*. Editora McGraw-Hill do Brasil.

SZPILOWSKI, S., STRZELCZAK, G., WINNICKI, R., 1976, “Radioactive tracer method as an instrument for testing effectiveness of effluent treatment installations and mixing patterns in natural streams”, *Nukleonika*, v. 21, n. 5.

REUS, U., WESTMEIER, W., 1983, "Atomic Data and Nuclear Data Tables", *Catalog of Gamma Rays form Radioactive Decay*, v. 29 (September), n.2.

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.

TAYLOR, A.R, MIDDLEMAN, S., 1974, "Turbulent dispersion in drag-reducing fluids". *AIChE J.* v.20, n.3, pp. 454-461.

THOMAS, F., 2002, "Open channel flow measurement using international standards: introducing a standards programme and selecting a standard", *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, pp. 303-307.

THÝN, J., HANSSON, L., 1975, "The Residence Time Distribution in Systems with Recirculation of the Outlet Flow", *Interationa Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v.26, pp. 748-752.

TIWARI, P.N, KONDAIAH, E., 1966, "Total and photopeak efficiencies for a well type NaI(Tl) crystal for cylindrical sources", *Nuclear Instruments and Methods*, n.42, pp. 118-124.

TSOLFANIDIS, N., 1983, *Measurement and Detection of Radiation*, Editora McGraw-Hill Int. Edit.

TUGRUL, B., KARA, N., 1994, "Detremination of flow parameters for pipe flows by the radiotracer techniques", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Articles, v. 180, n. 2, pp. 245-253.

TUGRUL, A. B., ALTINSOY, N., 2002, "A New Modification of the Radiotracer Balance Method for Open Channel Flow Measurement", *Flow Measurement and Isntrumentation*, v. 12, 341-344.

UOSIF, M.A.M, EI-TAHER, A., 2004, *Comparison of Total Experimental and Theoretical Absolute γ -ray Detection Efficiencies of a Cylindrical NaI (Tl) Crystal*. In: VII Radiation Physis & Protection Conference, 27-30 November, Ismailia-Egypt.

VALENTE, L., 2005, “Água do Rio pode afetar fertilidade”, *O Globo* online 16/07/05.