INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**SISTEMA AMBIENTAL APLICADO À LIBERAÇÃO DE EFLUENTE
RADIOATIVO LÍQUIDO**

MARCELO BESSA NISTI

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

Orientadora:
Dra. Adir Janete Godoy dos Santos

SÃO PAULO

2009

**Dedico este trabalho ao meu
pai Walter Nisti (*in memoriam*) e
meu irmão Marcos Bessa Nisti**

AGRADECIMENTOS

À Dra. Adir Janete Godoy dos Santos, minha orientadora, professora, colega de trabalho e amiga, agradeço pela orientação, dedicação constante, ensinamentos, sabedoria, capacidade de negociação, confiança, correções sempre oportunas e sugestões. Todas as dificuldades e dúvidas enfrentadas neste trabalho sempre com maestria e brilhantismo soube resolvê-las. Meu muito obrigado.

À M.Sc. Sandra Regina Damatto, muito obrigado pelo auxílio, disponibilidade e solidariedade em todos os momentos que foram necessários.

À Dra. Marcia Pires de Campos, muito obrigado por ter acompanhado este trabalho desde o início e colaborado com muitas sugestões para o aprimoramento.

À Dra. Cátia Heloisa Rosignoli Saueia, obrigado pelas sugestões, incentivo e prontidão constante para ajudar na execução deste trabalho.

Ao M.Sc. Marcelo Francis Maduar, pelos ensinamentos, disponibilidade, colaboração e comentários sempre pertinentes.

Ao M.Sc. Lucio Leonardo, pela ajuda e esclarecimentos no cintilador em fase líquida.

Ao M.Sc. Marcos Medrado de Alencar, no preparo das amostras de intercomparações e pela ajuda na espectrometria alfa.

À Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequillo, agradeço seu apoio permanente e sempre acreditando na qualidade dos meus resultados.

À Dra. Bárbara Paci Mazzilli, agradeço a permissão da utilização da infraestrutura do LRA.

À Dra. Linda V. E. Caldas, agradeço o apoio e pela permissão da execução deste trabalho.

Aos amigos Dra. Ana Claudia Peres, M.Sc. Paulo René, Dr. Paulo Sérgio Cardoso da Silva, Donilda e Sandro, muito obrigado por toda ajuda.

À Dra. Maria Aparecida Faustino Pires e Dra. Marycel Elena Barboza Cotrim, pela permissão do uso da estação de coleta de efluente.

Ao Sr. Wagner Roberto Terazan, pela ajuda na utilização da estação de coleta de efluente.

Ao Dr. Jorge E. S. Sarkis, pelo apoio e permissão da utilização do Absorção Atômica do Laboratório de Caracterização Isotópica.

Ao M.Sc Marcos Antonio Hortellani, muito obrigado pelos ensinamentos, auxílio e pelo apoio na execução das análises dos elementos estáveis. E demonstrado sempre muita competência nos esclarecimentos das dúvidas.

À Dra. Andreza Portella Ribeiro, obrigado pelo apoio no Absorção Atômica.

Ao M.Sc Eduardo Gerulis, muito obrigado pela ajuda, por elucidar questões referentes a instalação do CR e confecção do croqui da instalação.

Ao Sr. Sidnei de Lima, pela ajuda na coleta das amostras no tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1.

Ao Supervisor Ricardo Nunes de Carvalho, pela colaboração e discussões sobre a instalação do Reator Nuclear IEA-R1.

Ao Sr. Tonicarlos, obrigado pela confecção das plantas do reator Nuclear IEA-R1 com a indicação do caminho do efluente radioativo líquido.

À Arquiteta Elizabete Brigagão F. Lainetti, pela ajuda e disponibilidade dos projetos dos tanques de retenção do CR e Reator Nuclear IEA-R1 e a planta geral do **ipen**.

Ao Dr. Ademar José Potiens Júnior, Dr. Júlio Takehiro Marumo e Sr. Marcos Maciel de Góes, pela permissão e apoio na utilização do cintilador em fase líquida.

Ao Sr. Gilberto Magalhães e Sr. Pedro Mariano do DOC, obrigado pela disponibilidade dos dados dos hidrômetros.

A minha Família

À Bia e Nan muito obrigado pelas alegrias, paciência, companheirismo, compreensão, dedicação diária, carinho e ajuda indispensável no desenvolvimento deste trabalho. BEIJOS e MUITO OBRIGADO.

À minha mãe Wilma, meu muito obrigado por todo carinho, compreensão e ajuda em todos os momentos.

À minha tia Landa, muito obrigado pelas preocupações e carinho.

À minha cunhada Ana Lucia, muito obrigado por todo apoio.

Ao meu irmão Marcos, muito obrigado por toda dedicação, apoio, ajudando sempre nos momentos mais difíceis da minha vida e principalmente por ser um grande irmão e amigo.

Ao meu pai Walter, um homem sempre à frente de sua época e um grande exemplo de bondade, caráter e sabedoria.

SISTEMA AMBIENTAL APLICADO À LIBERAÇÃO DE EFLUENTE RADIOATIVO LÍQUIDO

Marcelo Bessa Nisti

RESUMO

A gestão ambiental atual considera a atividade produtiva como um sistema ambiental, definido como o conjunto de processos, interações, parâmetros e fatores envolvidos na produção. Esta dissertação de mestrado avaliou a liberação dos efluentes radioativos líquidos no Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares (*ipen*), sob um estudo ambiental sistêmico. O estudo avaliou o termo fonte do *ipen* no período de 2004 a 2008, empregando a espectrometria gama, a espectrometria alfa, a análise por ativação, a cintilação em fase líquida e a espectrometria de absorção atômica. As metodologias empregadas foram verificadas utilizando amostras do Programa de Intercomparação de Resultados Analíticos e Ensaio de Materiais de Referência. As instalações que mais contribuíram nas liberações foram o Centro de Radiofarmácia (CR) e o Centro de Reator de Pesquisa (CRPq) com média de 11,4% e de 87,4% para a atividade radioativa presente. As liberações ao sistema de esgoto ocorreram de acordo com as normas de proteção radiológica, mostrando a efetividade do Programa de Monitoração de Efluentes Radioativos no *ipen*. No efluente líquido determinou-se a concentração dos elementos estáveis Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, em todas as amostras dos tanques TR1 e CR no período e parte das amostras das demais instalações do *ipen* entre 2004 a 2007. Dentre os analisados, dois efluentes ultrapassaram os padrões de descarga para os elementos estáveis estabelecidos no Estado de São Paulo, um ultrapassou o padrão para o elemento cádmio e outro ultrapassou o valor exigido para o zinco. Estimou-se a vazão de descarga do tanque TR1 que foi de $10,9 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Estimou-se o fator de diluição no ponto de descarga E1 empregando como radiotraçadores os isótopos liberados rotineiramente para a rede de esgoto ^3H , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn e ^{65}Zn , não gerando custo monetário ou ambiental associados à estimativa. Os resultados mostraram que o valor do fator de diluição variou por radioisótopo empregado, em ordem crescente do ^3H , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn , de acordo com as características de cada elemento, tendo variado significativamente entre hidrogênio, metal

alcalino e metais de transição. As médias dos fatores de diluição obtidas no primeiro e segundo dia de liberação respectivamente foram 4,3 e 7,4 para o ^3H , 12,0 e 16,1 para o ^{54}Mn , 12,6 e 14,2 para o ^{60}Co , 12,0 e 27,9 para o ^{65}Zn e 6,2 e 13,9 para o ^{137}Cs . Este é o primeiro estudo sobre a estimativa do fator de diluição intra-institucional, utilizando radiotraçadores antrópicos sem custos adicionais. Os resultados gerados contribuem com subsídios para a melhoria da conduta ambiental e para estabelecer procedimentos otimizados, sob a legislação vigente. Os fatores de diluição foram estimados em estudo operacional e laboratorial, numa única descarga controlada do tanque TR1. Este estudo dos traçadores radioativos deverá ser repetido, de modo a gerar um banco de dados institucional. O estudo sistêmico ambiental deve ser estabelecido caso a caso, dependendo das características do local, da instituição e dos efluentes liberados.

ENVIRONMENTAL SYSTEM APPLIED TO RADIOACTIVE LIQUID EFFLUENT RELEASE

Marcelo Bessa Nisti

ABSTRACT

The current environmental administration considers the productive activity as an environmental system, defined as a group of processes, interactions, parameters and factors involved in the production. This mastering dissertation evaluated the release of the liquid radioactive effluents at Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares (*ipen*), under a systemic environmental study. The study evaluated the source term at *ipen* in the period from 2004 to 2008, making use of gamma-ray and alpha spectrometry, instrumental neutron activation analysis, liquid phase scintillation and atomic absorption spectrometry. The employed methodologies were verified using samples from the Intercomparison National Program – PNI/IRD and Reference Materials. The facilities that contributed the most in these releases were the Radiopharmaceutical Center (CR) and the Research Reactor Center (CRPq) with an average of 11,4% and 87,4%, respectively, relative to the present radioactive activity. The sewer system releases were within the radioactive protection regulations, showing the effectiveness of *ipen*'s Radioactive Effluents Monitoring Program. The concentration of the stable elements Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn was determined in the liquid effluent in all the samples from the storage tanks TR1 and CR in the period from 2004 to 2008 and in some of the samples of other *ipen*'s facilities in the period from 2004 to 2007. Among the analyzed effluents, two samples were higher than the stable elements discharge standards established in the state of São Paulo, one sample was higher than the required value of the element cadmium and the other higher than required value of the element zinc. The storage tank TR1 discharge flow was estimated in $10,9 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. The dilution factor at discharge point E1 was estimated using a radiotracers the isotopes ^3H , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn e ^{65}Zn , which are commonly released into *ipen*'s sewer system. The executed radiotracer study was carried out without monetary and environmental costs. The results showed that the dilution factors values varied according to the employed radioisotope, in increasing order from ^3H , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co to ^{65}Zn , following to each chemical element

characteristics, significant variance among hydrogen, alkaline metal and transition metals was also showed. The dilution factor averages obtained in the first and second day of the releases were respectively 4,3 and 7,4 for ^3H , 12,0 and 16,1 for ^{54}Mn , 12,6 and 14,2 for ^{60}Co , 12,0 and 27,9 for ^{65}Zn , 6,2 and 13,9 for ^{137}Cs . This is the first study about intra-institutional dilution factor estimation using anthropic radiotracers, without any addition costs. The obtained results contribute with the subsidies to the improvement of the environmental conduct and to establish optimized procedures, under current legislation. The dilution factors were estimated in an operations and laboratorial study, in only one controlled discharge of the storage tank TR1. This radioactive tracers study will have to be repeated, in order to create an institutional database. The environmental systemic study must be established by each case, depending on the characteristics of the area, the institution and the released effluents.

SUMÁRIO

Página

1. Introdução.....	16
1.1 Objetivos do trabalho.....	25
1.2 Descrição da área de estudo.....	26
1.2.1 Subsistema antrópico do <i>ipen</i>	26
1.2.2 Descrição dos locais e tipos de estocagens dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do ipen.....	29
2. Metodologia.....	36
2.1 Espectrometria gama: princípios do método.....	36
2.2 Espectrometria alfa: princípios do método.....	38
2.3 Contagem por cintilação em fase líquida: princípios do método.....	39
2.4 Análise por ativação com nêutrons: princípios do método.....	40
2.5 Espectrometria de absorção atômica: princípios do método.....	42
3. Parte Experimental.....	44
3.1 Espectrometria gama.....	46
3.1.1 Preparo das amostras.....	46
3.1.2 Determinação dos radionuclídeos.....	46
3.2 Espectrometria de absorção atômica.....	50
3.2.1 Preparo das amostras	50
3.2.2 Determinação dos elementos estáveis.....	50
3.3 Cintilação em fase líquida.....	52
3.3.1 Preparo das amostras	52
3.3.2 Determinação de ^3H	53
3.4 Fator de diluição.....	54
3.4.1 Determinação da vazão do tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1.....	55
3.4.2 Coleta das amostras na rede de esgoto do <i>ipen</i>	56
3.4.3 Determinação do fator de diluição.....	58
4. Resultados e Discussão.....	61
4.1 Eficiência do sistema de espectrometria gama.....	61

4.2 Eficiência do sistema de cintilação em fase líquida para o ^3H	65
4.3 Termo fonte do efluente radioativo líquido gerado pelo <i>ipen</i>	67
4.4 Fator de diluição.....	74
4.4.1 Medida da vazão do tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1.....	74
4.4.2 Cálculo do fator de diluição do TR1.....	75
4.5 Determinação dos elementos estáveis utilizando espectrometria de absorção atômica.....	80
4.6 Sistema ambiental do <i>ipen</i>	91
4.6.1 Subsistema natural.....	91
4.6.1.1 Subsistema natural físico.....	91
4.6.1.2 Subsistema natural biológico.....	92
4.6.2 Subsistema antrópico.....	92
4.6.2.1 Subsistema antrópico territorial (de ocupação).....	92
4.6.2.2 Subsistema antrópico social (de consumo).....	93
4.6.2.3 Subsistema antrópico econômico (de produção).....	93
4.6.2.4 Subsistema antrópico institucional (de gestão).....	94
5. Conclusões.....	95
6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	99
Referências Bibliográficas.....	100
Anexo I.....	106
Anexo II.....	107
Anexo III.....	108

Lista de Figuras

Figura 1.1 Evolução da gestão ambiental na atividade antrópica nas últimas décadas.....	17
Figura 1.2 Organograma dos componentes no âmbito de sistemas ambientais..	18
Figura 1.3 Instalações radiativas e nucleares e a rede de efluentes e esgoto do <i>ipen</i>	28
Figura 1.4 Mapa das ligações da rede coletora existente com contribuição do <i>ipen</i>	30
Figura 1.5 Planta do terceiro andar do prédio do Reator Nuclear IEA-R1.....	32
Figura 1.6 Planta do primeiro andar do prédio do Reator Nuclear IEA-R1.....	33
Figura 1.7 Planta do subsolo do prédio do Reator Nuclear IEA-R1.....	34
Figura 1.8 Croqui da instalação radiativa do CR – Prédios 1 e 2.....	35
Figura 3.1 Etiqueta de identificação do efluente radioativo líquido do <i>ipen</i>	44
Figura 3.2 Solicitação de análise de efluente radioativo líquido do <i>ipen</i>	45
Figura 3.3 Detector germânio hiperpuro HPGe EGPC 25.....	47
Figura 3.4 Sistema eletrônico associado ao detector HPGe	47
Figura 3.5 Programa emulador de multicanal Maestro.....	48
Figura 3.6 Espectro analisado pelo programa InterWinner WinnerGamma 6.0....	48
Figura 3.7 Espectrômetro de absorção atômica Spectra AA-220 Fast Sequencial	51
Figura 3.8 Balança analítica MARTE AL500C.....	51
Figura 3.9 Sistema de destilação.....	52
Figura 3.10 Cintilador Líquido Tri-Carb.....	53
Figura 3.11 Frascos contendo seis padrões com diferentes agentes quenching e um padrão isento de quenching.....	54
Figura 3.12 Vista externa do tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1 (TR1).....	55
Figura 3.13 Acesso interno ao tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1 (TR1).....	56
Figura 3.14 Estação de coleta de efluente na portaria geral (ponto E1).....	57
Figura 3.15 Bomba peristáltica utilizada na coleta.....	57
Figura 3.16 Entrada do duto de esgoto no ponto E1.....	57

Figura 4.1 Curva de eficiência do detector HPGe EGPC 25.....	61
Figura 4.2 Curva de quenching para o elemento trício no cintilador em fase líquida.....	66
Figura 4.3 Curva de calibração do elemento cádmio.....	83
Figura 4.4 Curva de calibração do elemento chumbo.....	83
Figura 4.5 Curva de calibração do elemento cromo.....	83
Figura 4.6 Curva de calibração do elemento ferro.....	84
Figura 4.7 Curva de calibração do elemento manganês.....	84
Figura 4.8 Curva de calibração do elemento níquel.....	84
Figura 4.9 Curva de calibração do elemento prata.....	85
Figura 4.10 Curva de calibração do elemento zinco.....	85
Figura 5.1 Modelo prático de sistema ambiental aplicado à liberação de efluente radioativo líquido.....	98

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Instalações geradoras dos efluentes radioativos líquidos com seus respectivos tipos de estocagem e volume.....	29
Tabela 3.1 Radionuclídeos com suas respectivas energias e atividades.....	49
Tabela 4.1 Energias utilizadas, eficiências calculadas e ajustadas com suas respectivas incertezas.....	62
Tabela 4.2 Resultado da amostra de intercomparação de abril 2005.....	63
Tabela 4.3 Resultado da amostra de intercomparação de dezembro 2007.....	63
Tabela 4.4 Eficiências calculadas utilizando o método tSIE para cintilação em fase líquida.....	65
Tabela 4.5 Resultado da amostra de intercomparação de dezembro 2007.....	66
Tabela 4.6 Resultado da amostra de intercomparação de agosto 2008.....	66
Tabela 4.7 Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2004 (Bq).....	68
Tabela 4.8 Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2005 (Bq).....	69
Tabela 4.9 Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2006 (Bq).....	70
Tabela 4.10 Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2007 (Bq).....	71
Tabela 4.11 Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2008 (Bq).....	72
Tabela 4.12 Contribuição percentual do termo fonte (%Bq.ano ⁻¹).....	73
Tabela 4.13 Contribuição percentual do termo fonte em volume em m ³ por instalação geradora de efluente radioativo líquido.....	74
Tabela 4.14 Determinação da vazão do tanque de retenção TR1.....	75
Tabela 4.15 Concentrações e incertezas dos radiotraçadores ³ H, ⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co, ⁶⁵ Zn e ¹³⁷ Cs em amostras da rede de esgoto do <i>ipen</i> no ponto de coleta E1.....	76
Tabela 4.16 Fatores de diluição do tanque de retenção TR1 no ponto de coleta E1.....	77
Tabela 4.17 Concentração dos elementos utilizados na preparação dos padrões de calibração para absorção atômica.....	82

Tabela 4.18	Comparação do material de referência com o valor determinado no Absorção Atômica.....	86
Tabela 4.19	Resultados dos elementos estáveis nos efluentes radioativos líquidos das instalações do <i>ipen</i>	88

1. INTRODUÇÃO

Uma instalação nuclear ou radiativa em atividade, gera efluentes radioativos que são liberados ao meio ambiente e se tornam fonte potencial de exposição do homem à radiação. Dependendo dos seus hábitos alimentares e sociais, da forma como utiliza o meio ambiente para habitação, trabalho e lazer, o ser humano pode se expor aos radionuclídeos acumulados ou dispersos nos atributos do meio. As descargas de efluentes radioativos devem ser limitadas e controladas, a fim de minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente e ao homem.

Como consequência, a operação de instalações nucleares ou radiativas, que produzem efluentes líquidos liberados, apresenta potencial de contribuir para um acréscimo da radiação natural, no mínimo no seu ambiente fechado (Aguirre e Léon, 1996).

Em instalações radiativas, nucleares e convencionais, o gerenciamento dos efluentes líquidos integra a gestão ambiental do empreendimento. Nas últimas décadas, o âmbito do gerenciamento ambiental teve inúmeras modificações. Na década de 60, a preocupação essencial era o saneamento básico, com as redes de esgoto e abastecimento de água tratada, com isso as empresas foram obrigadas a executar o controle da poluição e o planejamento ambiental nas décadas de 70 e 80.

Na década de 90 e no início do século XXI surgiram os sistemas da qualidade e a gestão ambiental, com o objetivo de alcançar a gestão integrada. A gestão integrada requer o gerenciamento de todos os parâmetros que influenciam nos componentes econômicos e na imagem da empresa, incluindo na gestão a responsabilidade social e ambiental. Para se atingir tal finalidade no empreendimento, há a necessidade de gerenciar os parâmetros ambientais sob um âmbito sistêmico, ou seja, abrangendo todas e quaisquer variáveis que influenciam direta ou indiretamente a qualidade ambiental e a qualidade de vida da população e do trabalhador. Na FIG. 1.1 é apresentada a evolução do

gerenciamento ambiental, considerando-se o componente social e econômico, nas últimas décadas.

FIGURA 1.1. Evolução da gestão ambiental na atividade antrópica, nas últimas décadas.

Atualmente, na gestão ambiental, a tendência é analisar a atividade produtiva como um sistema ambiental, o qual é definido como os processos e interações do conjunto de elementos e fatores que o compõem, incluindo-se, além dos elementos físicos, bióticos e socioeconômicos, os fatores políticos e institucionais. O sistema ambiental, para efeito de estudos e gestão, pode ser subdividido sucessivamente em subsistemas, setores, subsetores, fatores, componentes ou elementos, existindo variações de nomenclatura e método de classificação, segundo cada situação e concepção. Alguns consideram dois subsistemas: o biogeofísico e o antrópico ou socioeconômico, separando, assim, o meio físico e o meio biológico do meio cultural e econômico. Há outros autores que adotam três subsistemas: o físico, o biótico e o antrópico, outros adotam o subsistema natural e o subsistema antrópico, como componentes do sistema ambiental (Hardt, 2000). Na FIG. 1.2 é apresentado o organograma dos componentes no âmbito de sistemas ambientais (Hardt, 2000)

FIGURA 1.2. Organograma dos componentes no âmbito de sistemas ambientais (Hardt, 2000)

No estudo de Hardt (2000) observa-se que as condições físico-ambientais unem os subsistema antrópico ao subsistema natural, na interface do ambiente construído, conforme FIG. 1.2.

A partir de princípios gerais, são propostas alternativas para a sustentabilidade da atividade econômica, considerando-se as vertentes física, biológica, territorial, social, econômica e institucional, com vistas à prevenção, correção, melhoria e/ou minimização de conseqüências deletérias ao meio ambiente, assim como à potencialização de seus efeitos positivos. Neste contexto, são consideradas duas formas básicas de integração:

- unidimensional, pela dependência das diversas etapas entre si e das mesmas com os objetivos pretendidos;
- multidimensional, pelo caráter de inter e transdisciplinaridade dos procedimentos, destacando-se a importância do conhecimento dos fatores ambientais nas diversas fases da atividade produtiva.

No presente trabalho a abordagem adotada foi a multidimensional, nas subdivisões propostas por Hardt (2000).

Por fim, é ressaltada a necessária viabilização de ações de prevenção e compensação ao invés da aplicação de tradicionais medidas de correção da degradação ambiental.

O meio ambiente apresenta características de um sistema aberto, que recebe e exporta energia e massa, tendo a economia, a ecologia e os demais entes correlacionados, como subsistemas. Um recurso natural mantém-se vivo, no seu estado altamente organizado, somente se importar energia de alta qualidade do ambiente externo e processá-la de modo a sustentar a sua estrutura orgânica. O sistema ambiental proporciona um quadro multidimensional, no qual as diferentes disciplinas interagem, implicando na sustentabilidade dos recursos naturais. Deve ser entendido como um modelo capaz de analisar as complexas interações (instituições organizacionais do meio ambiente, decisões públicas, regulamentos, normas, atribuição de valor) entre os subsistemas e o sistema ambiental (Clayton e Radcliffe, 1996). Esse enfoque se aproxima do modelo sistêmico tradicional.

Atualmente, na atividade humana o sistema ambiental requer o diagnóstico ambiental da área de influência do empreendimento, dos recursos naturais utilizados, da completa descrição e análise dos efluentes e resíduos

gerados e suas interações tal como existem, de modo a caracterizar a situação ambiental da área, considerando os fatores:

- meio físico: subsolo, águas, ar e clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos de água, o regime hidrológico, as correntes marinhas e as correntes atmosféricas.
- meio biológico: ecossistemas naturais bióticos, fauna e flora - destacando as espécies indicadoras da qualidade ambiental, de valor científico e econômico, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente.
- meio sócio-econômico: uso e ocupação do solo, usos da água, destacando os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e o potencial de utilização desses recursos.

No âmbito de um sistema ambiental, para o entendimento e otimização da liberação de efluentes líquidos contendo radioatividade ou compostos químicos para um ecossistema aquoso, seja a rede coletora de esgotos ou o corpo de água superficial, é essencial conhecer suas interações no meio água-sedimento e os fatores de diluição ou acumulação. Estas interações e fatores citados influenciam a mobilidade e transporte das espécies presentes e o “uptake” (incorporação) biológico(a) no compartimento ambiental em questão.

Neste trabalho foi estimado o fator de diluição intra-institucional, na liberação dos efluentes radioativos aquosos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (*ipen*).

A análise da dinâmica do lançamento de despejos líquidos deve também considerar as condições de mistura, de vazão e da qualidade da água de superfície receptora ou da rede coletora que vincula a uma estação de tratamento de efluentes. Além dos padrões de descarga, é a capacidade de autodepuração do meio ambiente receptor que indicará a quantidade de efluentes ou de matéria orgânica que poderá ser lançada no curso de água, a fim de que a uma determinada distância do ponto de lançamento existam condições de vida e de uso da água. Portanto, o grau de tratamento necessário para um despejo será sempre função do corpo receptor, das características do uso da água a jusante do ponto de lançamento, da capacidade de autodepuração e da diluição do corpo de água (DOE-SP, 1976; COPAM, 1986). Assim, um efluente, além de satisfazer os padrões de lançamento, deve proporcionar condições tais no corpo receptor, que

a qualidade do mesmo se enquadre dentro dos padrões de qualidade das águas superficiais que trata a Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esta, “Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes”. (CONAMA, 2005).

A Resolução 357 (CONAMA, 2005) prevê que nos estudos ambientais, relativos à liberação controlada de efluentes líquidos, a determinação da capacidade suporte ambiental do compartimento ambiental de interesse, deve considerar, no mínimo, a diferença entre os padrões estabelecidos pela classe de água superficial e as concentrações existentes no trecho desde a montante, estimando a concentração após a zona de mistura.

Esta norma estabelece também o parâmetro urânio total no valor 0,02 mg/L para águas doces, considerando sua toxicidade química. Dispõe, ainda, que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta resolução e em outras normas aplicáveis.

“No controle das condições de lançamento, é vedada para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação”
(CONAMA, 2005).

O Decreto do Estado de São Paulo N° 8.468 de 8 de setembro de 1976, no capítulo II Dos Padrões, seção II Dos Padrões de Emissão, artigo 19 e 19-A trata os efluentes lançados em sistema de rede de esgoto, definindo parâmetros e limites de liberação.

Os efluentes radioativos líquidos gerados nas instalações do *ipen* são estocados e amostrados rotineiramente sob responsabilidade do Serviço de Radioproteção da instituição. Este serviço, por intermédio da Supervisão de Radioproteção de cada instalação, estabelece um programa de amostragem dos efluentes radioativos para posterior análise qualitativa e quantitativa, sob o ponto de vista radiológico. Após esta avaliação os efluentes são então descartados, em dois pontos de liberação, na rede de esgoto da Cidade Universitária (Nisti e Santos, 2008).

Estudos já foram realizados, sobre a influência que os efluentes radioativos líquidos liberados pelo *ipen* exercem no meio aquático do Rio Pinheiros, além da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO) (Rocca, 1995; Jacomino et al., 1989, 1992; Jacomino e Maduar, 1992). Tais estudos identificaram as vias de exposição do indivíduo do público e os grupos populacionais potencialmente críticos e os radionuclídeos críticos. Cabe salientar que o *ipen* localizado dentro da CUASO é o local inicial do descarte do efluente líquido e a inclusão deste local inicial seria um acréscimo para os estudos já executados.

A limitação da descarga de efluentes radioativos líquidos deve ser realizada considerando os princípios básicos da proteção radiológica, de modo que as doses resultantes no homem sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, considerando-se os fatores econômicos e sociais, este conhecido como o Princípio de Otimização da Radioproteção. No Brasil, tal prática baseou-se, em qualquer situação de rotina, nos limites primários de dose para indivíduos do público estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) seguindo o Princípio da Limitação da Dose Individual, na norma Diretrizes Básicas de Radioproteção, Norma experimental CNEN-NE-3.01 (CNEN, 1988).

Na década de 80, a Comissão Nacional de Energia Nuclear estabeleceu uma Norma experimental para os limites de descarga para vários radionuclídeos, que devem ser obedecidos por qualquer instalação em todo o território nacional (CNEN, 1985). Estes limites foram considerados gerais, por não permitirem a distinção entre as várias situações possíveis dentre as aplicações intra e interinstitucional, sendo extremamente conservativos.

A Norma CNEN NN 3.01, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica foi publicada em 2004, com alterações estabelecidas em 2005 (CNEN, 2005) e prazo definido para o seu cumprimento (CNEN, 2006). O objetivo desta Norma foi estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante.

As posições regulatórias 3.01/008 (CNEN, 2005a) e 3.01/009 (CNEN, 2005b) desta Norma (CNEN, 2005), definem os requisitos e exigências ambientais, concernentes à execução do Programa de Monitoração Radiológica Ambiental (PMRA) pré-operacional e operacional. Tais posições regulatórias

estabelecem a correlação entre os fatores relativos ao descarte de efluentes, com os parâmetros determinados no PMRA. Segundo estas posições regulatórias a execução de um PMRA operacional deve considerar, dentre outros fatores, os seguintes:

- “características das descargas: identificação do termo fonte para cada via de liberação e das condições de dispersão do efluente no meio ambiente;
- características do local: localização e descrição dos grupos de população, localização cartográfica dos recursos hídricos, naturais, histórico-culturais e produtivos;
- estimativa de dose: definição das vias críticas de exposição, dos radionuclídeos críticos, dos grupos críticos, do modelo de avaliação e valores de parâmetros genéricos e específicos relativos ao local e às fontes;
- níveis operacionais: valores a serem utilizados ao estabelecer os níveis mínimos que devem ser detectados, para cada radionuclídeo e meios monitorados.”

A dissertação de mestrado aqui apresentada desenvolveu os seguintes parâmetros: características da descarga, características do local e os níveis operacionais, de modo a contribuir com a adequação operacional do *ipen* frente a Norma CNEN NN 3.01.

Na norma vigente o PMRA constitui-se de uma rede de medições de campo que incluem a radiação, a radioatividade e outros parâmetros ambientais importantes, estabelecidos com base nas características próprias da prática e da região (CNEN, 2005).

O PMRA é concebido para complementar os programas de controle da fonte e da descarga de efluentes radioativos de uma instalação. Neste caso, cabe salientar que foi estabelecido um período de transição de dois anos para as instalações já em operação, se adequarem a partir de 18 de janeiro de 2006 (CNEN, 2005).

As posições regulatórias (CNEN, 2005a; CNEN, 2005b) introduziram a execução de gestão ambiental, de modo a utilizar-se práticas novas no gerenciamento dos efluentes líquidos, sob o ponto de vista radiológico. Integrou dentre outros fatores, as características das descargas dos efluentes líquidos liberados, o estabelecimento das condições de dispersão do efluente no meio

ambiente, o conhecimento das características locais do meio ambiente receptor da descarga e a estimativa da dose.

Este enfoque complementou as outras regulamentações ambientais recentes (CONAMA, 2005; ABNT, 2004; MS, 2004), com vistas à gestão ambiental dos sistemas ambientais naturais e antrópicos, atribuindo responsabilidades de modo a se atingir a qualidade satisfatória. A caracterização completa dos efluentes líquidos, associada aos conhecimentos da dinâmica do compartimento ambiente receptor, da capacidade de diluição ou dispersão e das tecnologias dos processos de tratamento fornecem subsídios para a gestão ambiental de uma instalação convencional, nuclear ou radiativa.

O conceito de ambiente como um sistema complexo e organizado, constituído por elementos físico e biótico interdependentes, incluindo transformações introduzidas por fatores sócio-econômicos e culturais, orienta as pesquisas para a percepção da dinâmica interativa dos componentes e condicionantes (Odum, 1988).

Os estilos de modernização predominantes favorecem a internacionalização efetiva de várias dimensões do conceito de ambiente; como fornecedor de recursos naturais, receptor de dejetos oriundos das atividades de produção, consumo, e de outro lado, como espaço onde se dão as interações entre processos naturais e sócio-culturais; ou simplesmente como o habitat, no sentido mais amplo (Odum, 1988).

Essa concepção sobre o meio ambiente introduziu nos estudos ambientais a noção de sistema ambiental. Na avaliação sistêmica, o meio ambiente em questão é tomado como sistema natural e sistema antrópico integrados, ou seja, não dissociados. Portanto, fornece uma estrutura metodológica aos estudos, insistindo nas relações de causa e efeito dos ecossistemas com seus suportes abióticos e bióticos integrados às ações humanas. O sistema ambiental prevê uma combinação dinâmica, das relações entre diversos componentes, com sua variação temporal, espacial, econômica e social simultaneamente.

A visão sistêmica ambiental incorpora no estudo os fatores econômicos, sociais, culturais e territoriais, além dos parâmetros ambientais. Cabe salientar que os cinco fatores citados são aqueles previstos como base para o desenvolvimento sustentável (ONU, 1992), o qual é a meta estratégica prevista

pelos governantes em acordos internacionais e locais (ONU, 1992; ONU, 2002; DOM-SP, 1996), indispensáveis à gestão e à qualidade de vida neste século.

Frente ao exposto, observa-se que a regulamentação ambiental recente relaciona a liberação de efluentes líquidos à qualidade das águas superficiais e aos programas de monitoração radiológica ambiental, considerando os seus fatores de diluição. Estabeleceram-se, portanto, instrumentos legais e normativos que podem facilitar e contribuir para a gestão ambiental das práticas exercidas nas instalações radiativas e nucleares. Assim, se faz necessário o entendimento dos parâmetros envolvidos na dispersão dos efluentes liberados, nos locais internos à instalação e próximos ao ponto de liberação.

Este trabalho teve como objetivo principal determinar os parâmetros envolvidos na dispersão ambiental dos efluentes radioativos líquidos, que são liberados pelas instalações do *ipen* e estabelecer a sua ocorrência e dinâmica, sob o âmbito de sistema ambiental, contribuindo para a gestão integrada da instituição.

1.1 Objetivo do trabalho

Para a realização do estudo têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer os fatores de diluição dos efluentes radioativos líquidos na saída da rede de esgoto do *ipen* em interface com a rede coletora da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO).
- Avaliar as concentrações dos radionuclídeos liberados para o meio ambiente.
- Determinar as concentrações dos elementos estáveis presentes nos efluentes radioativos líquidos.
- Estabelecer as consequências desta diluição inicial, avaliando as liberações das instalações do *ipen* e a atualização dos sistemas de descarte do efluente na rede de esgoto.
- Atualizar e complementar os trabalhos executados anteriormente, considerando os fatores de diluições iniciais dos efluentes radioativos líquidos e o meio ambiente receptor local.
- Contribuir para adequações inerentes ao cumprimento da regulamentação ambiental vigente.

A pesquisa visando a adequação da liberação dos efluentes líquidos radioativos do *ipen* à nova regulamentação torna-se extremamente importante do ponto de vista operacional, econômico e ambiental, pois além de ser uma exigência com prazo estabelecido para ser cumprida, completa o enfoque no gerenciamento do efluente gerado nas instalações, previsto no mecanismo regulatório.

Naturalmente, o estabelecimento do fator de diluição inicial dos efluentes descartados constitui um parâmetro adicional na gestão ambiental da instituição, sob o ponto de vista radiológico e dos poluentes convencionais. Estabelecer o fator de diluição dos efluentes líquidos liberados é uma exigência regulamentada recentemente (CNRH, 2002; CONAMA, 2005, 2008; CNEN, 2005) para as diversas áreas da atividade humana. Poder-se-á alcançar, a partir daí, rotinas consideradas economicamente menos onerosas na análise qualitativa e quantitativa, avaliação e decisões inerentes ao estágio preliminar à liberação dos efluentes gerados.

Devem ser considerados, portanto, os benefícios sociais e econômicos advindos deste estudo e prática posterior, que implicam na redução dos custos totais e na informação ao público que frequenta a Cidade Universitária e as suas imediações, visto que tal núcleo acadêmico está inserido numa área densamente urbanizada e povoada. Este fator de diluição é importante também para a estimativa da exposição à radiação para membros do público e trabalhadores.

1.2 Descrição da área de estudo

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares foi fundado em 1956, com a finalidade de realizar pesquisas e formar especialistas na área nuclear, o instituto foi crescendo em torno de seu Reator Nuclear de pesquisa IEA-R1. O *ipen* está localizado na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO) em São Paulo, e ocupa uma área aproximada de 500.000 m².

1.2.1 Subsistema antrópico do *ipen*

O *ipen* conta com cerca de 2.000 funcionários e colaboradores e importantes instalações (IPEN, 2006), descritas a seguir.

- Centro de Aceleradores Ciclotron - CAC;
- Centro de Biologia Molecular - CBM;
- Centro do Combustível Nuclear - CCN;
- Centro de Ciência de Tecnologia de Materiais – CCTM;
- Centro de Engenharia Nuclear – CEN;
- Centro de Lasers e Aplicações – CLA;
- Centro de Metrologia das Radiações – CMR;
- Centro de Química e Meio Ambiente – CQMA;
- Centro de Radiofarmácia – CR;
- Centro do Reator de Pesquisas – CRPq;
- Centro de Tecnologia das Radiações – CTR;
- Laboratório de Rejeitos Radiativos – LRR;
- Serviço de Radioproteção - SRP.
- Administração
- Restaurante

A rede coletora de esgoto do *ipen* é constituída de tubulações de diâmetros de 150 mm e 200 mm, sendo de 200 mm na saída da rede de esgoto nos pontos E1 próximo a guarita na Rua Prof Marcello Damy de Souza Santos e no ponto E2 na Rua Prof. Fausto Walter de Lima atrás do CQMA (IPEN, 2003).

Na FIG. 1.3 são apresentadas as instalações radiativas, nucleares e administrativas, a rede de efluentes e rede de esgoto no campus do *ipen*.(IPEN, 2003).

FIGURA 1.3: Instalações radiativas, nucleares e administrativas, a rede de efluentes e rede de esgoto do **ipen** (IPEN, 2003).

O ponto E1 conecta-se à rede da CUASO, atravessa a Rua do Matão, segue pela Rua Professor Almeida Prado. A partir da rotatória da Praça Ramos de Azevedo, o esgoto segue por uma tubulação de diâmetro igual a 500 mm, na Rua Professor Almeida Prado até a Avenida Mello de Moraes. Depois a tubulação muda para o diâmetro de 600 mm, passa por uma estação de recalque no cruzamento com a Avenida Professor Lucio Martins Rodrigues, e aumenta para 700 mm. Próximo ao término da Raia Olímpica, o esgoto aumenta para uma tubulação de diâmetro final igual a 1500 mm, que contorna a Raia e o conduz até próximo ao Museu de Tecnologia de São Paulo.

Todo o esgoto produzido no **ipen**, assim como em toda a CUASO, segue para a Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri (ETE-Barueri), da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) (IPEN, 2006c).

Na FIG. 1.4 são apresentadas as ligações da rede coletora existente com contribuição do **ipen** em verde, a rede coletora em vermelho, em azul o

coletor tronco e na cor vinho sentido emissário Pinheiros para E.T.E. Barueri (IPEN, 2008).

1.2.2 Descrição dos locais e tipos de estocagens dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen*

Os efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen*, são de responsabilidade de cada instalação geradora, pelo armazenamento e gerenciamento destes efluentes. Na TAB. 1.1 são apresentadas as instalações geradoras, tipo de estocagem e volume de armazenamento dos efluentes radioativos líquidos.

TABELA 1.1: Instalações geradoras dos efluentes radioativos líquidos com seus respectivos tipos de estocagens e volume.

Instalações	Tipo de estocagem	Volume (L)
CBM	Bombonas	10 a 20
CCN	2 Tanques de retenção	1.000 e 7000
CCTM	Bombonas	10 a 20
CEN	Tanque de retenção do Reator Nuclear MB-01	5.000
CLA	Bombonas	10 a 20
CMR	Bombonas	10 a 50
CQMA	Bombonas	10 a 80
	Tanque de retenção Salvaguarda	1.000
	Tanque de retenção Salvaguarda	2.000
CR	Bombonas	10 a 50
	2 Tanques de retenção	9.000 cada
CRPq	Bombonas	10 a 40
	2 Tanques de retenção Radioquímica	1.000 cada
	2 Tanques de retenção Descontaminação	10.000 cada
	Tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1	300.000
LRR	Bombonas	10 a 20
	Tanque de retenção	3.000

FIGURA 1.4: Mapa das ligações da rede coletora existente com contribuição do *ipen* (IPEN, 2008).

Os efluentes radioativos líquidos gerados no Reator Nuclear IEA-R1 são provenientes das atividades como "sipping" (verificação da estrutura do elemento combustível), regeneração, limpeza e descontaminação do porão, manutenção das bombas d'água e transbordo da água da piscina (Carvalho, 2008). As tubulações em vermelho da instalação do Reator Nuclear IEA-R1 que encaminham o efluente radiativo líquido ao local de estocagem (tanque de retenção) são apresentados nas FIG. 1.5, 1.6 e 1.7, respectivamente.

Os efluentes gerados pela instalação radiativa CR são provenientes de soluções de lavagem e de sobras de processamentos de pesquisas, produções e controles de qualidade de radiofármacos (Gerulis et al., 2005). Na FIG. 1.8 são apresentadas as instalações e os locais de acondicionamento dos efluentes radioativos líquidos (Gerulis, 2008).

FIGURA 1.5: Planta do terceiro andar do prédio do Reator Nuclear IEA-R1 (IPEN, 2008a).

FIGURA 1.6: Planta do primeiro andar do prédio do Reator Nuclear IEA-R1 (IPEN, 2008b).

FIGURA 1.7: Planta do subsolo do prédio do Reator Nuclear IEA-R1 (IPEN, 2008c).

FIGURA 1.8: Croqui da instalação radiativa do CR – Prédios 1 e 2 (Gerulis, 2008).

2. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com a descrição e determinação dos radionuclídeos liberados nos efluentes radioativos líquidos para o meio receptor por todas as instalações do *ipen*, contabilizando todos os radionuclídeos liberados formando um banco de dados denominado “termo fonte” entre 2004 a 2008 e foram definidos cada radionuclídeo e o volume liberado por instalação.

Os radionuclídeos foram determinados empregando os métodos de espectrometria gama, espectrometria alfa, cintilação em fase líquida e análise por ativação com nêutrons, tendo sido analisadas 120 amostras por espectrometria gama, 14 por espectrometria alfa, 29 por cintilação em fase líquida e 12 análises por ativação.

Os elementos estáveis presentes nos efluentes radioativos líquidos foram determinados utilizando o método de espectrometria de absorção atômica, analisando as amostras de efluente radioativo líquido das instalações do *ipen*, no período de 2004 a 2007, totalizando 38 amostras.

Para o cálculo do fator de diluição, foram feitas amostragens no ponto de saída de esgoto do *ipen* E1 localizado na portaria geral. As amostras foram coletadas antes e durante a liberação controlada do tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1 - TR1.

2.1 Espectrometria gama: princípios do método

A espectrometria gama pode ser entendida como um processo baseado na interação da radiação gama emitida pela amostra com o detector semicondutor de alta resolução, possibilitando a discriminação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos presentes em diversos tipos de amostras. Uma grande vantagem desta técnica é a facilidade de medir diretamente a amostra e de forma não destrutiva.

A concentração de cada radionuclídeo de interesse na amostra, foi calculada a partir da área líquida do pico presente no espectro da transição gama

associada ao radionuclídeo de interesse, conforme apresentado na equação 1 (Interwinner, 2004).

$$C = \frac{\text{Área} - \text{BG}}{V \cdot t \cdot \text{Ef} \cdot I_\gamma} \quad (1)$$

Onde:

C: concentração do radionuclídeo na amostra (Bq L^{-1}).

Área: área líquida do pico da transição gama considerada (contagens).

BG: área líquida da radiação de fundo para a transição gama considerada (contagens).

V: volume da amostra (L).

t: tempo de contagem (s).

Ef: eficiência de contagem para a energia da transição gama considerada (cps dps^{-1}).

I_γ : intensidade absoluta da transição gama considerada (%).

A sensibilidade da técnica de espectrometria gama, para uma determinada transição gama, foi representada pela concentração mínima detectável (CMD), e o modelo utilizado para o cálculo foi Currie (1968), conforme apresentado na equação 2.

$$\text{CMD} = 4,66 \frac{\sqrt{\text{BG}}}{\text{Ef} \cdot V \cdot t \cdot I_\gamma} \quad (2)$$

Onde:

CMD: concentração mínima detectável (Bq L^{-1}).

BG: área líquida da radiação de fundo para a transição gama considerada (contagens).

V: volume da amostra (L).

t: tempo de contagem (s).

Ef: eficiência de contagem para a energia da transição gama considerada (cps dps^{-1}).

I_γ : intensidade absoluta da transição gama considerada (%).

4,66: número que expressa o nível de confiança associado de 95%.

2.2 Espectrometria alfa: princípios do método

Esta técnica baseia-se na interação da partícula alfa emitida de uma determinada amostra com o detector, permitindo a determinação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos presentes na amostra (Holm, 1984).

O sistema utilizado para detecção de partículas alfa foi constituído por um detector de barreira de superfície, bomba de vácuo, fonte de alta tensão, amplificador, analisador multicanal e um computador. A partícula alfa interage com o detector formando pulsos elétricos que são amplificados e separados pelo analisador multicanal que fornece o espectro da amostra. A partícula alfa possui massa e carga e pode interagir com a matéria perdendo alcance, e com isso possui baixo poder de penetração. O vácuo no sistema torna-se necessário para que a partícula alfa percorra o caminho da amostra ao detector sem perda de energia (Knoll, 1989).

A espectrometria alfa pode apresentar desvantagens em relação a outras técnicas, devido à necessidade de submeter à amostra a uma separação radioquímica para purificar os radionuclídeos, separar os interferentes presentes na amostra e confecção de uma fonte de eletrodeposição delgada para evitar problemas com auto-absorção. Porém, esta técnica é amplamente utilizada por discriminar os isótopos emissores alfa, em virtude da alta resolução do detector para as energias emitidas e por possuir baixa radiação de fundo.

A concentração do radionuclídeo de interesse na amostra foi determinada a partir da área líquida do pico do radionuclídeo de sua emissão alfa, presente no espectro alfa. O cálculo de concentração do radionuclídeo foi determinado conforme a equação 3 (Alencar, 2008).

$$C = \frac{R_n - R_b}{E_f \cdot R_q \cdot V} \quad (3)$$

Onde:

C: concentração do radionuclídeo na amostra (Bq L⁻¹)

R_n: taxa de contagem na região do isótopo (cps)

R_b: taxa de contagem do branco na região considerada (cps)

E_f: eficiência de contagem do detector (cps dps⁻¹)

R_q: rendimento químico %

V: volume da amostra (L)

O branco do processo analítico foi determinado em paralelo ao procedimento experimental, preparando-se uma alíquota de água deionizada em substituição à amostra juntamente com padrões, que é submetida ao mesmo processo de separação radioquímica adotado para as amostras.

O rendimento químico foi determinado pela adição de uma quantidade conhecida de radiotraçador no início do processo da análise.

Para a determinação da eficiência de contagem do sistema alfa, fez-se a medida de uma fonte calibrada de ^{241}Am com atividade nominal conhecida. A eficiência foi dada pela equação 4.

$$Ef = \frac{C_f}{A_f} \quad (4)$$

Onde:

Ef: eficiência de contagem (cps dps⁻¹)

C_f: contagem da fonte (cps)

A_f: atividade da fonte (Bq)

2.3 Contagem por cintilação em fase líquida: princípios do método

A contagem por cintilação em fase líquida é uma técnica na qual a amostra é misturada a um líquido cintilador, formando uma solução cintiladora, capaz de converter a energia cinética das emissões do radionuclídeo presente na amostra em fótons. A interação das energias beta pelo meio líquido se processa por excitação, emitem fótons de radiação ultravioleta, retornando ao seu estado fundamental. Os fótons incidem em um tubo fotomultiplicador, onde os elétrons são multiplicados gerando um sinal elétrico proporcional ao número de fótons incidentes.

O cálculo da concentração da amostra foi determinado pela equação 5 (Leonardo, 2004).

$$C = \left(\frac{Ca}{Ef_a.V} - \frac{Bg}{Ef_{bg}.V} \right) \quad (5)$$

Onde:

C: concentração do radionuclídeo na amostra (Bq L^{-1})

C_a : contagem da amostra (cps)

B_g : radiação de fundo (cps)

E_{f_a} : eficiência na contagem da amostra (cps dps^{-1})

$E_{f_{bg}}$: eficiência na contagem da radiação de fundo (cps dps^{-1})

V: volume da amostra (L)

Para o cálculo da CMD utilizou-se a equação 2, substituindo a probabilidade de emissão por desintegração gama por rendimento químico.

A eficiência foi determinada pela metodologia “transformed Spectral Index of the External standard” (tSIE) utilizando uma fonte ^{133}Ba gerando o parâmetro de indicação de Quench (Leonardo, 2004). O efeito Quench da amostra significa absorção dos fótons na própria amostra, que resulta na diminuição das contagens, com isso há uma redução da eficiência na transferência de fótons para a fotomultiplicadora.

2.4 Análise por ativação com nêutrons: princípios do método

A análise por ativação com nêutrons é um método de análise multielementar não destrutivo e baseia-se em uma reação nuclear resultante da interação de um nêutron com um núcleo alvo, produzindo um núcleo radioativo. A reação (n,γ) é a mais empregada em análise por ativação, devido a utilização de detector semicondutor com alta resolução para discriminar as energias dos raios gama emitidos pelos núclídeos excitados. A irradiação pode ser feita com nêutrons térmicos e epitérmicos e a radioatividade resultante é medida por meio da espectrometria gama, para cada radioisótopo formado na reação.

Esta técnica tem sido amplamente utilizada na determinação de elementos traço em quantidades da ordem de mg kg^{-1} , em matrizes variadas. Uma vez que a intensidade da radiação emitida é proporcional à concentração do radionuclídeo na amostra, é possível determinar as concentrações de U, Th e de outros elementos nas amostras por meio de comparações com concentrações em padrões certificados.

A concentração foi obtida pela comparação entre as áreas dos picos obtidos no espectro gama da amostra e do padrão, que são irradiados juntos, conforme equação 6 (Santos, 2002).

$$C_a = \frac{(A_a \cdot m_p \cdot C_p) \cdot e^{\lambda(t_a - t_p)}}{A_p \cdot m_a} \quad (6)$$

Onde:

C_a : concentração do radionuclídeo na amostra ($\mu\text{g g}^{-1}$)

C_p : concentração do radionuclídeo no padrão ($\mu\text{g g}^{-1}$)

A_a : área líquida do pico de transição gama considerada na amostra (cps)

A_p : área líquida do pico de transição gama considerada no padrão (cps)

m_a e m_p : massas da amostra e do padrão (g)

λ : constante de decaimento do radioisótopo (s^{-1})

t_a e t_p : diferença de tempo entre as contagens da amostra e do padrão (s)

A determinação da concentração mínima detectável para a análise por ativação com nêutrons, foi realizada utilizando-se materiais de referência. (Keith et al., 1983):

$$\text{CMD} = \frac{3 \cdot C_{pR} \cdot \sqrt{Bg}}{T \cdot C} \quad (7)$$

Onde:

CMD: concentração mínima detectável ($\mu\text{g g}^{-1}$)

C_{pR} : concentração do radionuclídeo na amostra com valor certificado ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Bg: contagem da radiação de fundo no fotopico do elemento de interesse (contagens)

T: tempo de contagem (s)

C: contagens no fotopico do elemento de interesse (cps)

3: nível de confiança entre o valor certificado e o valor determinado

2.5 Espectrometria de absorção atômica: princípios do método

Basicamente um espectrômetro de absorção atômica é composto por um sistema nebulizador, que converte a amostra injetada em uma névoa gasosa, esta névoa é encaminhada para o queimador, onde a espécie avaliada é atomizada pela ação de uma chama de elevada temperatura. Uma lâmpada de cátodo oco ou lâmpada de descarga emite um feixe de luz monocromática que passa pelo queimador e promove a excitação dos átomos. Uma parte da energia luminosa não absorvida é direcionada para uma fotomultiplicadora, cujos sinais são convertidos em medidas de transmitância (Skoog et al., 2002).

Esta técnica apresenta alta seletividade, pois a radiação monocromática produzida por uma espécie é absorvida apenas pela mesma espécie contida na amostra.

Durante a absorção de energia luminosa, um átomo passa do seu estado fundamental para um estado excitado que o obriga rapidamente a decair novamente para o seu estado fundamental. Neste processo, a quantidade de energia monocromática absorvida pode ser determinada através da relação entre a intensidade da potência luminosa “ I_0 ” que incide sobre uma amostra contendo a espécie de interesse e a intensidade da potência luminosa “ I ” que emerge da amostra e direcionada para a fotomultiplicadora. Define-se transmitância “ T ” para a seguinte razão:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (8)$$

A transmitância indica a fração ou porcentagem de potência luminosa devolvida após passar pela amostra.

A determinação da absorvância, que é a fração de potência luminosa absorvida pela amostra, é dada pela equação 9.

$$A = 1 - T \quad (9)$$

Logo a absorvância vem a ser:

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (10)$$

Para a determinação da concentração, relaciona-se a absorvância, conforme a lei de Beer-Lambert, demonstrado na equação 11 (Skoog et al., 2002).

$$A = a \cdot b \cdot C \quad (11)$$

Onde:

A: absorvância (ppm)

C: concentração do elemento estável presente na amostra (ppm)

a : coeficiente de absorção característico da espécie (cm^{-1})

b: caminho óptico percorrido pela luz dentro da amostra (cm)

O limite de quantificação do espectrômetro de absorção atômica foi determinado utilizando a equação 12 (INMETRO, 2007).

$$LD = \bar{X} + 6s \quad (12)$$

Onde:

$\bar{X}$: média dos valores do branco da amostra.

s: desvio padrão dos brancos

3. PARTE EXPERIMENTAL

As amostras de efluentes radioativos líquidos foram coletadas sob responsabilidade do Supervisor de Radioproteção da instalação geradora, em frascos de 1 L, com etiquetas de identificação, conforme FIG. 3.1, com acompanhamento de uma solicitação de análise de efluente radioativo líquido do *ipen* FM-IPN-0301-15 v1, em duas vias.

A solicitação especificou origem, descrição, data e hora da coleta, volume, pH, diluição da amostra (se necessário), forma físico-química, volume total do lote de origem do efluente, radionuclídeos solicitados para análise (discriminado isotopicamente), responsáveis pela coleta, solicitante da análise, informações complementares e assinatura do Supervisor de Radioproteção (IPEN, 2008), conforme FIG. 3.2. No campo de radionuclídeos solicitados para análise (discriminado isotopicamente) faz-se uma análise crítica de qual metodologia será utilizada na análise do efluente radioativo líquido. Das metodologias empregadas neste trabalho, a espectrometria alfa e a análise por ativação com nêutrons foram realizadas rotineiramente pelo Laboratório de Radiometria Ambiental (LRA) como parte das análises dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen* utilizados no termo fonte.

Identificação do Efluente (Instalação/Setor): _____
 Forma Físico-Química: _____
 pH: _____
 Volume Total do Efluente: _____
 Fator de Diluição: _____
 Taxa de Dose: _____
 Data da Coleta: _____
 Amostra coletada por: _____
 Identificação da Amostra (opcional): _____
 Radionuclídeos Solicitados (Discriminados Isotopicamente): _____
 Observações: _____

 Laboratório de Radiometria Ambiental – LRA-CMR

FIGURA 3.1 - Etiqueta de identificação do efluente radioativo líquido do *ipen*.

SI - _____ / _____

1ª VIA

SOLICITAÇÃO DE ANÁLISE DE EFLUENTE RADIOATIVO LÍQUIDO DO IPEN

Origem: _____

Descrição: _____

Data de coleta: ____/____/____ Hora da coleta: ____:____

Volume da amostra: _____ pH: _____

Diluição da amostra (se necessário): _____

Forma Físico-Química: _____

Volume total do lote de origem do efluente: _____

Radionuclídeos solicitados para análise (Discriminados Isotopicamente): _____

Responsável pela coleta (nome/ramal): _____

Solicitante da análise (nome/ramal): _____

Informações complementares: _____

OBSERVAÇÕES:

1. A coleta e representatividade da amostra são de responsabilidade do solicitante.
2. Esta análise determina única e exclusivamente a concentração dos radionuclídeos no efluente radioativo líquido e, portanto, não se aplica as substâncias poluentes convencionais que porventura estejam presentes no mesmo.

Nome e Assinatura do Supervisor de Proteção Radiológica _____

data

Laboratório de Radiometria Ambiental
 Fone: (0XX11) 3133-9642 Fone/Fax: (0XX11) 3133-9645

NOME E ASSINATURA DO RECEBEDOR _____

 DATA DO RECEBIMENTO: ____/____/____ HORA: ____:____

1ª VIA - SOLICITADO
 2ª VIA - SOLICITANTE

PRAZO DE ENTREGA DO RESULTADO _____ DIAS UTEIS
 FM-IPN-0301-15 V1

FIGURA 3.2: Solicitação de análise de efluente radioativo líquido do *ipen*.

3.1 Espectrometria gama

3.1.1 Preparo das amostras

As amostras de efluentes radioativos líquidos foram agitadas no frasco original de coleta, em seguida transferiu-se uma alíquota de 0,85 L com proveta para um frasco de polietileno denominado F850, para posterior análise.

3.1.2 Determinação dos radionuclídeos

O método mais empregado e que quantificou as maiores concentrações dos radionuclídeos nos efluentes radioativos líquidos foi a espectrometria gama. Utilizou-se um detector germânio hiperpuro (HPGe) modelo EGPC 25 com 25% de eficiência relativa e resolução 2,1 keV relativo ao ^{60}Co da marca INTERTECHNIQUE (FIG. 3.3), associado a um sistema eletrônico constituído de BIN 7122 CANBERRA, fonte de alta tensão 659 ORTEC, Amplificador 572 ORTEC, Multicanal 919E ETHERNIM com 4096 canais ORTEC (FIG. 3.4), um computador com programa emulador de multicanal Maestro (Maestro, 2001) da ORTEC (FIG. 3.5) e programa de análise de espectros InterWinner-WinnerGamma 6.0 da ORTEC (FIG. 3.6) (Interwinner, 2004).

O tempo de contagem de cada amostra variou dependendo do radionuclídeo de interesse e do volume total de estocagem do efluente. O programa emulador de multicanal Maestro foi utilizado para efetuar a aquisição e gravação dos dados obtidos na medida de amostras por espectrometria gama. Os espectros obtidos foram analisados empregando o programa de computador WinnerGamma, da plataforma InterWinner de Eurisys Mesures.

Para a determinação da curva de eficiência de contagem utilizou-se padrões de referência da Amershan, ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{134}Cs e ^{88}Y , com atividades na ordem de kBq. Os radionuclídeos contidos nos padrões com suas respectivas atividades e energias (Browne e Firestone, 1986) estão apresentados na TAB. 3.1.

A verificação da curva de eficiência foi realizada utilizando amostras de intercomparações do Programa Nacional de Intercomparação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (PNI-IRD), e as eficiências calculadas foram

ajustadas para elaboração de uma curva de eficiência utilizando o programa InterWinner (Interwinner, 2004).

A radiação de fundo do detector foi determinada utilizando-se a mesma geometria empregada para a amostra, contendo 0,85 L de água super pura, para o tempo de contagem de 150.000 segundos.

FIGURA 3.3 - Detector germânio hiperpuro HPGe EGPC 25.

FIGURA 3.4 - Sistema eletrônico associado ao detector HPGe.

FIGURA 3.5 - Programa emulador de multicanal Maestro.

FIGURA 3.6 - Espectro analisado pelo programa InterWinner-WinnerGamma 6.0.

TABELA 3.1: Radionuclídeos com suas respectivas energias e atividades.

Radionuclídeos	Energias (keV)	Atividade (kBq)
²⁴¹ Am	59,54	1,17 ± 2,9%
¹³³ Ba	80,99	1,38 ± 3,9%
	276,39	
	302,85	
	355,99	
	383,84	
¹⁰⁹ Cd	88,03	3,70 ± 3,1%
¹³⁹ Ce	165,86	0,20 ± 3,0%
⁵⁷ Co	122,06	0,71 ± 3,0%
	136,47	
⁶⁰ Co	1173,24	0,66 ± 2,9%
	1332,50	
¹³⁴ Cs	604,71	0,45 ± 3,0%
	795,87	
⁸⁸ Y	898,07	0,66 ± 3,9%
	1836,08	

Para determinação da CMD “a priori” para cada radionuclídeo utilizou-se o modelo Currie (1968). Para verificar a confiabilidade dos resultados obtidos, utilizaram-se amostras PNI, pois esta verificação é importante para investigar o nível de confiança da CMD do equipamento, como também para a confirmação de que a metodologia de espectrometria gama para os radionuclídeos analisados produz resultados confiáveis (Nisti et al., 2008a). A determinação da CMD foi realizada para cada espectro analisado, com isso obtendo a CMD “a posteriori”, condição necessária para o eventual descarte do efluente com a segurança esperada.

3.2 Espectrometria de absorção atômica

3.2.1 Preparo das amostras

As amostras foram coletadas em frascos contendo 1L do efluente radioativo líquido, foram agitadas por 30 minutos e medido o pH com papel indicador universal (pH 0 – 14, marca colorpHast EMD). Em seguida tomou-se uma alíquota de 50 mL com pipeta volumétrica, transferiu-se para um béquer e levou-se a chapa aquecedora em temperatura controlada entre 80 a 90°C. Após 30 minutos de aquecimento, adicionou-se 10 vezes 0,5 mL de HNO₃ concentrado da marca Merck, com auxílio de uma micropipeta Gilson P1000 sob agitação até dissolução total do material em suspensão. A solução final obtida foi transferida para frasco de polietileno denominado F-200 para na sequência ser analisada no espectrômetro de absorção atômica para a determinação dos metais de interesse.

3.2.2 Determinação dos elementos estáveis

Determinou-se as concentrações dos elementos estáveis presentes nos efluentes radioativos líquidos, utilizando um espectrômetro de absorção atômica Spectra AA-220- Fast Sequencial da marca Varian pelo modo de chama apresentado na FIG. 3.7, associado ao programa SpectrAA versão 5.01 PRO (Hortellani, 2008).

A calibração foi realizada com material certificado contendo Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, e Zn, das marcas Merck e Spex Plasma, nas concentrações de 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,25, 1,6, e 2 ppm, no mesmo meio das amostras analisadas. Foram preparados três padrões diferentes, sendo um multi-elementar contendo os metais Cd, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, e em separado Cr e Ag, respectivamente. A separação do cromo e da prata dos demais elementos da solução padrão de calibração tornou-se necessária, pois a mistura desses dois elementos com os demais deixava a solução turva.

As soluções padrões foram preparadas por gravimetria em balança analítica MARTE AL500C, utilizando-se micropipeta RBC 7993/07 LABMATE P100 regulável calibrada pela Masterlab apresentado na FIG. 3.8.

Para a determinação de bário o sistema utilizou NO₂ e acetileno com fluxo de 11 e 6,35 L min⁻¹, respectivamente; para o cromo, ar comprimido e acetileno com fluxo de 13,5 e 2,9 L min⁻¹, respectivamente e para os demais

elementos ar comprimido e acetileno com fluxo de 13,5 e 2 L min⁻¹, respectivamente.

Para a determinação do limite de quantificação foi utilizada água super pura na mesma concentração das amostras analisadas, sendo este ensaio repetido 7 vezes, obtendo-se a média e desvio padrão. As medidas foram executadas no Laboratório de Caracterização Isotópico (LCI) do Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA).

FIGURA 3.7: Espectrômetro de absorção atômica Spectra AA-220- Fast Sequencial

FIGURA 3.8: Balança analítica MARTE AL500C

3.3 Cintilação em Fase Líquida

3.3.1 Preparo das amostras para determinação de ^3H

As amostras de efluentes radioativos líquidos foram agitadas e retiradas do frasco polietileno F850 utilizado para a espectrometria gama.

Transferiu-se uma alíquota de 50 mL com pipeta volumétrica para um sistema de destilação (FIG. 3.9), submetendo a uma destilação lenta. O sistema de destilação foi constituído por um balão de fundo redondo acoplado a um condensador reto, mantendo-se a temperatura controlada de 96 a 97° C com manta aquecedora elétrica. O primeiro volume de 10 mL do destilado foi desprezado, esperou-se obter um segundo volume de 10 mL do destilado, este foi homogeneizado e transferiu-se 1,2 mL do mesmo, com auxílio de uma micropipeta Gilson P1000, para um recipiente de 20 mL próprio para cintilação. Acrescentou-se 18 mL da solução cintiladora Instagel-XF da Parcked, agitou-se a mistura por aproximadamente 1 minuto até a homogeneização da solução cintiladora em fase líquida.

Após a homogeneização o coquetel foi refrigerado e guardado em local escuro por um período mínimo de duas horas antes da contagem no sistema de detecção de cintilação líquida.

FIGURA 3.9: Sistema de destilação

3.3.2 Determinação de ^3H

O sistema de detecção utilizado foi o Cintilador Líquido Tri-Carb, modelo 2100TR da marca Packard, o qual é apresentado na FIG. 3.10. O sistema de detecção é composto de duas fotomultiplicadoras acopladas a um discriminador e a um microcomputador (TRI-CARB, 1995).

Neste trabalho, para a determinação de eficiência utilizou-se o método tSIE, que consiste em relacionar a eficiência em cintilação para cada amostra com base na indução externa do espectro Compton de uma fonte de ^{133}Ba , fornecendo o parâmetro de indicação de quench-QIP (TRI-CARB, 1995). Utilizou para construção da curva de quench 6 padrões com diferentes agentes de quenching com atividade de $327 \pm 18 \text{ Bq}$ e um padrão isento de quench com atividade $4630 \pm 68 \text{ Bq}$. A verificação da confiabilidade da eficiência foi realizada através da análise de amostras do PNI, seguindo a mesma metodologia das amostras de efluentes. O tempo de contagem adotado foi de 120 minutos. Para determinação da radiação de fundo do sistema de detecção utilizou-se o mesmo frasco com água super pura na mesma quantidade da amostra e de solução cintiladora.

FIGURA 3.10: Cintilador Líquido Tri-Carb .

Na FIG. 3.11 são apresentados os frascos com seis padrões de quenching e um padrão isento de quenching que foram utilizados na construção

da curva de eficiência. Esta curva de eficiência foi elaborada para as medidas do presente trabalho, devido às características das amostras.

FIGURA 3.11: Frascos contendo seis padrões com diferentes agentes quenching e um padrão isento de quenching.

3.4 Fator de Diluição

Para a determinação do fator de diluição associado à liberação do efluente radioativo líquido do tanque TR1 do *ipen* foi necessário calcular a vazão do tanque de retenção TR1 e as concentrações dos radionuclídeos presentes no tanque TR1 e nas amostras coletadas no ponto de descarga E1 do *ipen*.

O fator de diluição foi estimado no ponto E1, pois a literatura recente (Nisti e Santos, 2008) demonstra que este é o ponto de saída de esgoto mais importante para a liberação do efluente radioativo líquido no *ipen*. Por intermédio dos dados no período de 2004 a 2008, do histórico recente da liberação dos efluentes radioativos líquidos e do conhecimento das instalações com seus pontos de junção da rede coletora, confirmou-se que o ponto E1 é representativo para os efluentes radioativos líquidos, conforme apresentado nos resultados deste trabalho.

3.4.1 Determinação da vazão do tanque de retenção TR1 do Reator Nuclear IEA-R1

Na liberação do efluente radioativo líquido do tanque TR1 (FIG. 3.12 e FIG. 3.13) para a rede de esgoto interna ao *ipen*, utilizou-se uma bomba mecânica localizada na parte seca interna do tanque TR1 (IPEN, 1974).

Durante os dias 13 e 14 de maio de 2008, período da liberação controlada do efluente radioativo líquido contido no tanque, foram realizadas 5 medidas para determinação do volume de efluente presente no tanque TR1. A primeira medida foi realizada antes de iniciar a liberação controlada do efluente radioativo líquido e no primeiro dia da liberação foram realizadas mais duas medidas. No segundo dia foram realizadas outras duas medidas. Todas as medidas do volume do efluente radioativo líquido presente no tanque TR1 foram realizadas em intervalos de aproximadamente 3 horas.

FIGURA 3.12: Vista externa do tanque de retenção TR1 do Reator Nuclear IEA-R1.

FIGURA 3.13: Acesso interno ao tanque de retenção TR1 do Reator Nuclear IEA-R1.

3.4.2 Coleta das amostras na rede de esgoto do *ipen*

A amostragem foi realizada na estação de coleta de efluentes localizada na portaria geral do *ipen* no ponto E1 (FIG. 3.14) com uma bomba peristáltica modelo Small Sampler da marca PoliControl (FIG. 3.15) acoplada a um tubo de inox inserido dentro do duto de esgoto (FIG. 3.16).

Foram realizadas 13 coletas fracionadas neste ponto, sendo que 9 amostras foram coletadas juntamente com a liberação controlada do tanque TR1. O protocolo de amostragem iniciou-se com uma pré-purga de 15 segundos, seguida de 10 minutos de amostragem sendo acondicionadas em bombonas de 5 L, terminando após o tempo de coleta com uma pós-purga de 15 segundos. As amostras foram aciduladas e armazenadas em geladeira.

Antes da liberação controlada do tanque de retenção TR1 foram coletadas três amostras de 1 L, para a determinação das concentrações dos radiotraçadores encontrados no TR1.

FIGURA 3.14: Estação de coleta de efluente na portaria geral (ponto E1).

FIGURA 3.15: Bomba peristáltica utilizada na coleta.

FIGURA 3.16: Entrada do duto de esgoto no ponto E1.

3.4.3 Determinação do fator de diluição

Para estimar o fator de diluição existente na liberação dos efluentes radioativos líquidos das instalações do *ipen* no ponto de descarga E1, empregou-se como traçadores os radionuclídeos de meias-vidas longas, que são gerados no Reator Nuclear IEA-R1 e armazenados no tanque de retenção TR1 de efluentes radioativos líquidos do CRPq. Para uso como traçador radioativo adotaram-se os radioisótopos ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs , presentes no tanque de retenção TR1, em concentrações conhecidas, pois são integrantes do termo fonte institucional.

Na literatura, o uso de radioisótopos inerentes à atividade antrópica como traçadores é justificado nos estudos de radioecologia, para entender e monitorar vários processos naturais (Whicker, 2000). A grande contribuição antrópica dos radionuclídeos provenientes de testes nucleares, reprocessamento e acidente de Chernobyl possibilitaram muitos estudos atmosféricos, aquáticos e processos biológicos em ecotoxicologia.

A literatura menciona a aplicação de ^{99}Tc e ^{129}I , no estudo do transporte e diluição dos poluentes no Atlântico norte, incluindo as águas do pólo Ártico (Woodhead, 2001).

Outro exemplo é o uso do ^{137}Cs do “fallout” global como traçador, para estimar o ritmo nutricional de organismos aquáticos, sob condições naturais (Rowan e Rasmussen, 1996). Ao se estabelecer a fração de assimilação, depuração e perda metabólica pode-se calcular o ritmo alimentar do organismo (Whicker, 2000).

Cabe salientar que neste trabalho foi executada a estimativa do fator de diluição do efluente radioativo líquido, empregando-se como radiotraçadores os radionuclídeos descartados em escala de rotina. Os fatores de diluição estimados para os diferentes radioisótopos presentes não gerou custos monetários adicionais, além de impedir a adição de radiotraçadores que seriam liberados ao meio ambiente.

O tanque de retenção TR1 possui a capacidade de 300 m³ (IPEN, 1973), recebendo efluente radioativo líquido descartado no centro por períodos contínuos de diversos meses, sendo o efluente monitorado para quantificação dos radionuclídeos presentes antes do descarte na rede receptora.

Devido ao tempo de armazenagem, composição química e características do meio, os radionuclídeos presentes no tanque de retenção por

períodos relativamente longos, possuem massa desprezível, mas podem sofrer diversas interações químicas e físicas, podendo estar presentes na forma de íons, moléculas, íons complexos, espécies mono ou poli nucleares ou pseudo-colóides. Podem variar no tamanho (massa molar nominal), estrutura, morfologia, densidade, valência e propriedades de carga elétrica. Além das diferenças citadas, os radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs (radiotraçadores i) compõem grupos químicos diferenciados e tais características exercem influência no transporte dos diferentes radiotraçadores em meio aquoso (Lurie, 1978).

O fator de diluição ponto E1 foi obtido pela equação 13:

$$Fd_{E1,i} = \frac{C_{tr1,i}}{C_{E1,i}} \quad (13)$$

Onde:

$Fd_{E1,i}$ = Fator de diluição no ponto E1, para o radiotraçador i.

$C_{tr1,i}$ = concentração inicial (Bq L^{-1}), do radiotraçador i, no tanque TR1.

$C_{E1,i}$ = concentração determinada no ponto E1 (Bq L^{-1}), para o radiotraçador i.

Na determinação do fator de diluição no ponto E1, executou-se os procedimentos a seguir.

Foram coletadas três amostras de 1 L cada do tanque de retenção TR1 antes de liberação, para a determinação das concentrações iniciais dos radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs , obtendo-se as concentrações médias e seus respectivos desvios padrões em Bq L^{-1} .

No ponto E1 foram executadas duas amostragens antes da liberação controlada do tanque TR1 e a partir da terceira amostragem procedeu-se à liberação do efluente radioativo líquido do tanque TR1 para a rede coletora de esgoto.

No ponto de descarga E1 foram coletadas sucessivas amostras, num intervalo de 60 minutos, com duração de amostragem de 10 minutos cada. Nestas amostras do ponto E1, foram quantificados os radionuclídeos empregados como traçador radioativo. A liberação do efluente radioativo líquido do tanque TR1 para a rede coletora de esgoto iniciou-se às 9h09 do dia 13 de maio de 2008,

sendo desligado as 15h00, e iniciado dia 14 de maio de 2008 às 9h05 e desligado as 11h40.

Os radiotraçadores ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs foram determinados por espectrometria gama conforme descrito no item 3.1.2, com o tempo de contagem variando entre 10.000 a 50.000 segundos. O preparo das amostras está descrito no item 3.1.1. Para o radiotraçador ^3H o método utilizado foi cintilação em fase líquida descrito no item 3.3.2 e o preparo das amostras está descrito no item 3.3.1, com o tempo de contagem de 120 minutos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Eficiência do sistema de espectrometria gama

Para a determinação da curva de eficiência de contagem conforme descrito no item 3.1.2 utilizou-se padrões de referência na obtenção dos valores em eficiência, esses valores foram ajustados utilizando a equação 14. Na FIG. 4.1 está apresentada a curva de eficiência do detector HPGe EGPC 25.

$$\begin{aligned} \text{Eficiência\%}_{(\text{ajustada})} = & \exp(2,68165789152 \cdot 10^{-2} \ln(\text{keV})^5 - 9,20408081474 \cdot 10^{-1} \ln(\text{keV})^4 \\ & + 12,5568764738 \ln(\text{keV})^3 - 85,0837708963 \ln(\text{keV})^2 + 285,391201667 \ln(\text{keV})^1 \\ & - 377,728555604) \end{aligned} \quad (14)$$

FIGURA 4.1: Curva de eficiência do detector HPGe EGPC 25.

Na TAB. 4.1 são apresentados os dados das energias e as respectivas eficiências calculadas e ajustadas pela equação 14. (Interwinner, 2004).

Tabela 4.1: Energias utilizadas, eficiências calculadas e ajustadas com as suas respectivas incertezas.

Energias (keV)	Eficiência (medida) (cps dps⁻¹)	Eficiência (ajustada) (cps dps⁻¹)
59,54	0,00216 ± 0,00008	0,00215 ± 0,00007
80,99	0,00649 ± 0,00019	0,00704 ± 0,00022
88,03	0,00981 ± 0,00032	0,00856 ± 0,00026
122,06	0,01259 ± 0,00028	0,01285 ± 0,00037
136,47	0,01322 ± 0,00042	0,01332 ± 0,00037
165,86	0,01310 ± 0,00031	0,01304 ± 0,00037
276,39	0,00908 ± 0,00031	0,00919 ± 0,00025
302,85	0,00848 ± 0,00024	0,00847 ± 0,00023
355,99	0,00735 ± 0,00020	0,00728 ± 0,00020
383,84	0,00692 ± 0,00021	0,00678 ± 0,00018
604,71	0,00444 ± 0,00010	0,00450 ± 0,00012
795,87	0,00356 ± 0,00009	0,00358 ± 0,00009
898,07	0,00329 ± 0,00009	0,00326 ± 0,00008
1173,24	0,00264 ± 0,00006	0,00264 ± 0,00007
1332,50	0,00239 ± 0,00006	0,00238 ± 0,00006
1836,08	0,00183 ± 0,00005	0,00183 ± 0,00005

Para verificação da curva de eficiência, funcionamento do sistema eletrônico e do analista, foram utilizadas amostras de PNI, nas mesmas condições das amostras analisadas e para a avaliação dos resultados obtidos utilizou-se o mesmo modelo do PNI. As amostras de intercomparação utilizadas foram das rodadas de abril de 2005 e dezembro de 2007. Nas TAB. 4.2 e 4.3 são apresentados os resultados obtidos para a rodada de abril 2005 e dezembro 2007, respectivamente.

TABELA 4.2: Resultado da amostra de intercomparação de abril 2005.

ANÁLISE	Xi	X	S	U	su	D	CV	NA	LC
⁶⁰ Co	1,780								
	1,830	1,820	0,036	1,701	0,255	0,81	2	DENTRO	DENTRO
	1,850								
⁶⁵ Zn	3,130								
	3,150	3,133	0,015	2,691	0,404	1,90	0	DENTRO	DENTRO
	3,120								
¹⁰⁶ Ru	5,060								
	6,040	5,357	0,593	5,505	0,826	-0,31	11	DENTRO	DENTRO
	4,970								
¹³³ Ba	2,710								
	2,720	2,770	0,095	2,740	0,411	0,13	3	DENTRO	DENTRO
	2,880								
¹³⁴ Cs	1,400								
	1,300	1,303	0,095	1,175	0,176	1,26	7	DENTRO	DENTRO
	1,210								
¹³⁷ Cs	1,270								
	1,220	1,230	0,036	1,079	0,162	1,61	3	DENTRO	DENTRO
	1,200								

TABELA 4.3: Resultado da amostra de intercomparação de dezembro 2007.

ANÁLISE	Xi	X	S	U	su	D	CV	NA	LC
⁶⁰ Co	1,643								
	1,613	1,636	0,021	1,545	0,232	0,68	1	DENTRO	DENTRO
	1,653								
⁶⁵ Zn	2,715								
	2,576	2,687	0,099	2,517	0,378	0,78	4	DENTRO	DENTRO
	2,769								
¹⁰⁶ Ru	5,648								
	5,114	5,695	0,606	5,541	0,831	0,32	11	DENTRO	DENTRO
	6,323								
¹³³ Ba	2,975								
	3,034	2,977	0,056	2,798	0,42	0,74	2	DENTRO	DENTRO
	2,923								
¹³⁴ Cs	1,235								
	1,220	1,219	0,017	1,180	0,177	0,38	1	DENTRO	DENTRO
	1,201								
¹³⁷ Cs	1,012								
	0,975	0,988	0,021	0,857	0,129	1,75	2	DENTRO	DENTRO
	0,976								

Definições (PNI-IRD, 2005 e 2007):

U – Valor de referência, considerado como o valor “Verdadeiro” para a grandeza analisada nas amostras.

su – Desvio padrão do valor de referência.

sm – Desvio padrão da média do valor de referência onde, $\mathbf{sm} = \mathbf{su} / \sqrt{n}$.

n – Número de repetições realizadas pelo laboratório participante.

X_i – Valor obtido em uma análise, pelo laboratório participante.

X – Valor médio obtido das “n” análises realizadas pelo laboratório participante.

s – Desvio padrão em relação à **X**.

CV – Coeficiente de variação, definido por: $\mathbf{CV} = (\mathbf{s}/\mathbf{X}).100\%$. Quanto menor o valor de **CV**, melhor a repetibilidade da análise.

LC – Intervalo de valores **aceitáveis**, entre os Limites de Controle. (Valores $U < \pm 3sm$). Limite de controle inferior, $\mathbf{LCI} = \mathbf{U} - 3 \mathbf{sm}$ e limite de controle superior, $\mathbf{LCS} = \mathbf{U} + 3 \mathbf{sm}$.

NA – Intervalo de valores **bons** entre os Níveis de Advertência. (Valores $U < \pm 2sm$). Nível de advertência inferior, $\mathbf{NAI} = \mathbf{U} - 2 \mathbf{sm}$ e nível de advertência superior, $\mathbf{NAS} = \mathbf{U} + 2 \mathbf{sm}$.

D – Desvio normalizado, utilizado como parâmetro de avaliação e calculado pela expressão 15:

$$D = \frac{(X - U)}{\frac{su}{\sqrt{n}}} \quad (15)$$

O valor de D mais próximo de zero, significa que o valor alcançado pelo laboratório participante encontra-se mais próximo do valor de referência, o que corresponde um melhor desempenho do laboratório participante. Os critérios de D em valor absoluto em relação NA e LC, são:

$0 < D < 2$ DENTRO/DENTRO (BOM)

$2 < D < 3$ FORA/DENTRO (ACEITÁVEL)

$D > 3$ FORA/ FORA (FORA DE CONTROLE)

4.2 Eficiência do sistema de cintilação em fase líquida para o ^3H

Na determinação da eficiência de contagem para o radionuclídeo ^3H utilizou-se o método tSIE descrito no item 3.3.2, que relaciona a eficiência de cintilação para cada amostra. As atividades dos padrões utilizados, os parâmetros de indicação de quenching (QIP) e os resultados de eficiência com as incertezas propagadas estão apresentados na TAB. 4.4. Na FIG. 4.2 é apresentada a curva com os parâmetros de quenching para o ^3H executada para as medidas do presente trabalho, onde os pontos foram ajustados por um polinômio de grau 4 apresentada na equação 16.

TABELA 4.4: Eficiências calculadas utilizando o método tSIE para cintilação em fase líquida

ATIVIDADE (Bq)	QIP	Eficiência (cps dps ⁻¹)
4630	976	0,621 ± 0,023
327	614	0,500 ± 0,033
327	499	0,447 ± 0,029
327	396	0,382 ± 0,025
327	320	0,328 ± 0,022
327	238	0,250 ± 0,016
327	114	0,095 ± 0,006

$$\begin{aligned} \text{Eficiência}_{(\text{ajustada})} = & -0,10426 + 0,00204 \cdot \text{QIP} - 2,7679 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{QIP})^2 + 2,1239 \cdot 10^{-9} \cdot (\text{QIP})^3 \\ & - 6,6185 \cdot 10^{-13} \cdot (\text{QIP})^4 \end{aligned} \quad (16)$$

FIGURA 4.2: Curva de quenching para o elemento trício no cintilador em fase líquida.

A verificação do sistema de cintilação em fase líquida foi realizada utilizando-se amostras do PNI das rodadas de dezembro 2007 e agosto 2008 e os resultados obtidos estão apresentados nas TAB. 4.5 e TAB. 4.6.

TABELA 4.5: Resultado da amostra de intercomparação de dezembro 2007.

ANÁLISE	Xi	X	s	U	su	D	CV	NA	LC
³ H	452,630								
	424,880	438,757	13,880	397,103	79,421	0,91	3	DENTRO	DENTRO
	438,760								

TABELA 4.6: Resultado da amostra de intercomparação de agosto 2008.

ANÁLISE	Xi	X	s	U	su	D	CV	NA	LC
³ H	196,000								
	242,000	229,667	29,501	228,855	45,771	0,03	13	DENTRO	DENTRO
	251,000								

4.3 Termo fonte do efluente radioativo líquido gerado pelo *ipen*

O termo fonte é a contabilidade de todos os radionuclídeos liberados de forma controlada no meio ambiente.

A determinação da concentração dos radionuclídeos utilizando a técnica de espectrometria gama se faz quando o radionuclídeo solicitado é emissor gama de energia superior a 59 keV e com intensidade gama suficiente para se obter um valor adequado de CMD. Utilizou-se uma geometria de frasco de polietileno F850, em um detector de germânio hiperpuro HPGe EGPC 25 de eficiência relativa de 25% e resolução 2,1 keV relativo ao ^{60}Co . O tempo de contagem das amostras é dependente do radionuclídeo solicitado para análise e do volume total do efluente. A análise dos espectros gama é realizada com o auxílio do programa WinnerGamma.

A determinação da concentração dos radionuclídeos ^{238}U e ^{232}Th foi feita por meio de espectrometria alfa e análise por ativação com nêutrons.

A determinação da concentração de ^3H e ^{14}C foi determinada por cintilação em fase líquida.

Nas TAB. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 são apresentados os resultados do termo fonte dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen* nos anos de 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008, respectivamente.

TABELA 4.7: Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2004 (Bq).

Radionuclídeo	CQMA	LRR	CRPq	CMR	CR	CCN
²²⁸ Ac	1,52.10 ³					
^{110m} Ag			8,65.10 ⁵	8,59.10 ⁴		
²⁴¹ Am		8,13.10 ³		1,24.10 ³		
¹³³ Ba				1,11.10 ³		
²¹² Bi	1,94.10 ³					
⁵⁷ Co					1,47.10 ³	
⁵⁸ Co			6,22.10 ⁵			
⁶⁰ Co		2,04.10 ²	6,53.10 ⁸	8,38.10 ⁴	2,54.10 ⁵	
⁵¹ Cr			1,04.10 ⁶		8,67.10 ⁶	
¹³⁷ Cs		2,17.10 ⁵	7,10.10 ⁷	4,86.10 ²	1,78.10 ³	3,89.10 ⁴
¹³⁴ Cs		4,56.10 ³	6,78.10 ⁵	6,63.10 ²	7,88.10 ²	6,94.10 ²
¹⁵² Eu		4,60.10 ²				
⁶⁷ Ga					5,01.10 ⁷	
¹³¹ I			1,04.10 ⁶		1,57.10 ⁷	
⁹⁹ Mo					2,17.10 ⁵	
²¹² Pb	1,63.10 ³					
²²⁴ Ra	1,83.10 ³					
¹⁰³ Ru					3,12.10 ⁶	
¹²⁴ Sb			6,19.10 ⁶			
²⁰¹ Tl					4,48.10 ⁶	
²⁰² Tl					1,13.10 ⁶	
²⁰⁸ Tl	6,00.10 ²					
²²⁸ Th	3,42.10 ³					
²³² Th	6,76.10 ²	1,30.10 ³				
²³⁸ U		8,10.10 ²				
⁶⁵ Zn			3,70.10 ⁷			
Total	1,16.10⁴	2,32.10⁵	7,70.10⁸	2,50.10⁵	8,37.10⁷	3,96.10⁴

Radionuclídeo	CBM	LRR	CMR
³ H	3,02.10 ⁶	9,87.10 ⁷	3,11.10 ⁵
¹⁴ C	2,80.10 ⁶		
Total	5,80.10⁶	9,87.10⁷	3,11.10⁵

TABELA 4.8: Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2005 (Bq).

Radionuclídeo	CRPq	LRR	CR	CMR	CLA	CCN
²²⁸ Ac					1,85.10 ⁴	
^{108m} Ag		2,90.10 ²				
^{110m} Ag	2,34.10 ⁴					
²⁴¹ Am		1,18.10 ⁶				
¹³³ Ba				1,02.10 ⁴		
²¹² Bi					2,07.10 ⁵	
⁵⁸ Co	7,24.10 ⁶					
⁶⁰ Co	4,14.10 ⁸	1,17.10 ³				
⁵¹ Cr			1,79.10 ⁶			
¹³⁷ Cs	1,29.10 ⁷	1,05.10 ⁷		1,46.10 ⁴	4,96.10 ²	
¹³⁴ Cs		5,87.10 ³				
⁶⁷ Ga			8,16.10 ⁷			
¹³¹ I			4,04.10 ⁶			
⁵⁴ Mn	6,26.10 ⁶					
⁹⁹ Mo			3,31.10 ⁵			
²¹² Pb					1,95.10 ⁴	
²²⁴ Ra					2,03.10 ⁴	
²²⁸ Ra					1,85.10 ⁴	
¹⁰³ Ru			2,15.10 ⁶			
¹²⁴ Sb	2,30.10 ⁶					
²⁰² Tl			1,54.10 ⁶			
²⁰⁸ Tl					7,64.10 ³	
²³² Th				4,40.10	6,03.10 ³	7,15.10 ⁵
²³⁴ Th					5,04.10 ⁵	
²³⁵ U					3,67.10 ⁴	5,06.10 ⁴
²³⁸ U					1,90.10 ⁵	2,37.10 ⁵
⁶⁵ Zn	2,23.10 ⁷		4,15.10 ⁵			
Total	4,65.10⁸	1,17.10⁷	9,19.10⁷	2,48.10⁴	1,03.10⁶	1,00.10⁶

Radionuclídeo	LRR
³ H	2,36.10 ⁷

TABELA 4.9: Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2006 (Bq).

Radionuclídeo	CRPq	LRR	CR	CQMA
^{110m}Ag	$5,60.10^5$			
^{241}Am		$1,38.10^4$		
^{58}Co	$1,53.10^6$			
^{60}Co	$1,35.10^8$		$1,90.10^5$	
^{51}Cr			$4,86.10^5$	
^{137}Cs	$1,79.10^7$			$2,73.10^3$
^{67}Ga			$2,28.10^7$	
^{131}I			$4,21.10^6$	
^{54}Mn	$6,45.10^6$			
^{228}Ra				$1,32.10^5$
^{103}Ru			$5,60.10^5$	
^{124}Sb	$5,98.10^6$			
^{202}Tl			$4,68.10^5$	
^{228}Th				$1,61.10^5$
^{230}Th				$3,86.10^4$
^{232}Th				$8,27.10^4$
^{234}U				$2,46.10^5$
^{235}U				$1,03.10^4$
^{238}U				$2,50.10^5$
^{65}Zn	$5,55.10^7$		$1,22.10^7$	
Total	$2,23.10^8$	$1,38.10^4$	$4,09.10^7$	$9,23.10^5$

Radionuclídeo	CRPq	LRR	CR
^3H	$9,12.10^9$	$1,72.10^6$	$9,17.10^6$

TABELA 4.10: Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2007 (Bq).

Radionuclídeo	CRPq	LRR	CR	CTR	CCN
^{241}Am		$1,56.10^5$			
^{58}Co	$7,65.10^6$				
^{60}Co	$5,66.10^8$			$1,53.10^2$	
^{137}Cs	$1,09.10^7$				
^{131}I			$9,90.10^7$		
^{192}Ir				$1,85.10^3$	
^{54}Mn	$8,54.10^6$				
^{103}Ru			$4,77.10^5$		
^{238}U					$1,80.10^4$
^{65}Zn	$8,69.10^7$			$9,60.10$	
Total	$6,80.10^8$	$1,56.10^5$	$9,95.10^7$	$2,10.10^3$	$1,80.10^4$

Radionuclídeo	CRPq
^3H	$9,55.10^9$

TABELA 4.11: Termo fonte dos efluentes radioativos líquidos no ano de 2008 (Bq).

Radionuclídeo	CRPq	LRR	CR
²⁴¹ Am		1,01.10 ⁴	
⁵⁸ Co	4,71.10 ⁶		
⁶⁰ Co	3,74.10 ⁸		
⁵¹ Cr			1,06.10 ⁷
¹³⁷ Cs	7,57.10 ⁷		
⁶⁷ Ga			3,45.10 ⁵
¹³¹ I			2,11.10 ⁷
⁵⁴ Mn	1,26.10 ⁷		
¹⁰³ Ru			8,91.10 ⁵
¹²⁴ Sb	2,39.10 ⁶		
²³⁴ U	2,58.10 ³		
²³⁵ U	8,10.10 ¹		
²³⁸ U	1,83.10 ³		
⁶⁵ Zn	1,20.10 ⁸		
Total	5,89.10⁸	1,01.10⁴	3,29.10⁷

Radionuclídeo	CRPq
³ H	1,08.10 ¹⁰

Na TAB. 4.12 são apresentados os cálculos da contribuição percentual dos radionuclídeos do termo fonte de 2004 a 2008 liberados de forma controlada do tanque de retenção TR1 e do tanque da instalação radiativa CR na rede de esgoto através do ponto E1.

TABELA 4.12: Contribuição percentual do termo fonte (% Bq ano⁻¹).

Contribuição (% Bq.ano⁻¹)						
Radionuclídeos	2004	2005	2006	2007	2008	Instalação
⁶⁰ Co	76,5	72,5	50,9	72,6	60,0	Reator
⁵⁸ Co	0,1	1,3	0,6	1,0	0,8	Reator
¹³⁷ Cs	8,3	2,3	6,8	1,4	12,2	Reator
⁵⁴ Mn	nd	1,1	2,4	1,1	2,0	Reator
¹²⁴ Sb	0,7	0,4	2,3	nd	0,4	Reator
⁶⁵ Zn	4,3	3,9	20,9	11,1	19,3	Reator
Contribuição(%)	89,9	81,5	83,9	87,2	94,7	
⁵¹ Cr	1,0	0,3	0,2	nd	1,7	CR
⁶⁷ Ga	5,9	14,3	8,6	nd	0,1	CR
¹³¹ I	1,8	0,7	1,6	12,7	3,4	CR
⁶⁵ Zn	Nd	0,1	4,6	nd	nd	CR
Contribuição(%)	8,7	15,4	15,0	12,7	5,2	
TOTAL (%)	98,6	96,9	98,9	99,9	99,9	Reator + CR
nd= não determinado						

Os resultados apresentados na TAB. 4.12 mostram que as instalações Reator Nuclear IEA-R1 e CR apresentam contribuição média anual de aproximadamente 98,8% do total da atividade liberada de forma controlada do efluente radioativo líquido no período de 2004 a 2008.

Na TAB. 4.13 são apresentados os resultados consolidados por ano do termo-fonte da atividade total anual, o volume total liberado de efluente radioativo líquido, a porcentagem do volume de efluente radioativo líquido liberado pelas instalações Reator Nuclear IEA-R1, CRPq, CR e das demais instalações.

TABELA 4.13: Contribuição percentual do termo fonte em volume (m^3) por instalação geradora de efluente radioativo líquido.

Ano	Termo Fonte (Bq)	Volume Total (m^3)	Reator	(% m^3)		
				CRPq	CR	demais instalações
2004	$8,5 \cdot 10^8$	550	70,7	22,3	4,9	2,1
2005	$5,7 \cdot 10^8$	293	61,5	26,0	9,2	3,3
2006	$2,7 \cdot 10^8$	406	86,2	2,0	8,9	2,9
2007	$7,8 \cdot 10^8$	280	93,0	0,2	3,2	3,6
2008	$6,2 \cdot 10^8$	259	88,8	3,5	3,5	4,2

Os volumes dos efluentes radioativos líquidos liberados na rede de esgoto que apresentaram concentrações acima da CMD dos sistemas de detecção em 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008 foram respectivamente 78%, 74%, 96%, 98% e 96% do total em m^3 gerados por todas as instalações do *ipen*.

4.4 Fator de diluição

4.4.1 Medida da vazão do Tanque de Retenção TR1 do Reator Nuclear IEA-R1

As medidas do volume de efluente radioativo líquido presente no tanque TR1, iniciaram-se no dia 13/05/08 às 9h09, antes da primeira liberação controlada do efluente na rede de esgoto (volume A). A seguir foram feitas mais duas medidas do volume de efluente presente no tanque TR1, sendo às 12h00 (volume B) e após a bomba mecânica de descarga ser desligada às 15h00 (volume C). No dia 14/05/08 foram feitas mais duas medidas do volume do efluente presente no tanque TR1, a primeira antes de ligar a bomba mecânica de descarga, às 9h00 (volume D), e a última medida após a bomba mecânica de descarga ser desligada, às 11h40 (volume E). Com as cinco medidas dos volumes de efluente no tanque de retenção TR1, calculou-se a vazão da bomba mecânica de descarga.

Para medir os volumes no tanque de retenção TR1, executou-se a medida manual da altura, com uma régua de madeira graduada onde a graduação representa o volume de efluente presente no tanque TR1, em m^3 .

No cálculo da vazão considerou-se os volumes medidos (A,B,C,D,E) presentes no tanque de retenção TR1, o total de horas que a bomba mecânica de descarga ficou liberando o efluente do tanque TR1 e o volume residual do tanque de retenção TR1 que foi de 27,5 m³.

A vazão média calculada foi de $10,9 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Aplicando a vazão calculada pelo intervalo de horas utilizadas na liberação e somada com o volume residual do tanque de retenção TR1, obteve-se o volume inicial no tanque de retenção TR1 de 120,2 m³. O volume inicial medido de efluente no tanque de retenção TR1 foi de 120 m³, isto demonstra que a vazão média calculada expressa a situação real do descarte para o tempo avaliado.

Na TAB. 4.14 são apresentados a data, a hora, o volume, o intervalo da medida e as respectivas vazões calculadas por período de operação da bomba mecânica de descarga no tanque de retenção TR1.

TABELA 4.14: Determinação da vazão do tanque de retenção TR1.

data	medida	hora	volume presente no tanque (m ³)	volume liberado ao meio ambiente	tempo de descarte (h)	vazão calculada (m ³ h ⁻¹)
13/5/2008	A	9h09	120			
	B	12h00	92,5	(A-B)	02:51	9,7
	C	15h00	57,5	(B-C)	03:00	11,7
				(A-C)	05:51	10,7
14/5/2008	D	9h00	57,5			
	E	11h40	27,5	(D-E)	02:40	11,3
vazão média:						$10,9 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

4.4.2 Cálculo do fator de diluição do TR1

Na estimativa do fator de diluição no ponto E1, para as três amostras de 1 L coletadas no tanque de retenção TR1 antes da liberação, foram determinados os radiotraçadores ³H, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn e ¹³⁷Cs. Calculou-se a médias das concentrações obtidas e seus respectivos desvios padrões. Os valores encontrados foram $56881 \pm 3255 \text{ Bq L}^{-1}$ para o ³H, $41,5 \pm 2,9 \text{ Bq L}^{-1}$ para o

^{54}Mn , $1322 \pm 11 \text{ Bq L}^{-1}$ para o ^{60}Co , $401 \pm 8 \text{ Bq L}^{-1}$ para o ^{65}Zn e $291 \pm 7 \text{ Bq L}^{-1}$ para o ^{137}Cs .

Os resultados das concentrações e incertezas dos radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs nas amostras coletadas na rede de esgoto do *ipen* no ponto E1 durante a liberação controlada do tanque de retenção TR1 são apresentados na TAB. 4.15.

TABELA 4.15: Concentrações e incertezas dos radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs em amostras da rede de esgoto do *ipen* no ponto de coleta E1.

Data	Hora	Concentração (Bq L^{-1})				
		^3H	^{54}Mn	^{60}Co	^{65}Zn	^{137}Cs
12/05/08	11h15	$24,1 \pm 1,4$	$< 1,3$	$< 1,5$	$< 2,8$	$< 1,4$
13/05/08	8h30	$67,0 \pm 3,8$	$< 1,3$	$< 1,5$	$< 2,9$	$< 1,5$
13/05/08	9h37	10361 ± 518	$2,1 \pm 0,8$	$60,4 \pm 2,4$	$18,4 \pm 2,2$	$72,2 \pm 3,0$
13/05/08	10h35	14881 ± 748	$3,0 \pm 1,2$	$84,3 \pm 3,2$	$39,6 \pm 3,1$	$43,4 \pm 2,1$
13/05/08	11h31	21963 ± 1098	$5,6 \pm 1,2$	130 ± 5	$48,6 \pm 4,3$	$65,9 \pm 2,9$
13/05/08	12h37	14629 ± 732	$4,9 \pm 1,0$	146 ± 5	$46,2 \pm 3,5$	$55,8 \pm 2,6$
13/05/08	13h33	11247 ± 563	$3,6 \pm 1,2$	142 ± 5	$35,5 \pm 3,1$	$39,4 \pm 2,1$
13/05/08	14h30	11913 ± 596	$3,8 \pm 1,2$	139 ± 5	$33,9 \pm 3,3$	$30,8 \pm 1,8$
13/05/08	15h30	3855 ± 193	$< 1,6$	$52,1 \pm 1,8$	$9,0 \pm 0,9$	$11,2 \pm 0,6$
14/05/08	9h35	9727 ± 486	$2,7 \pm 1,0$	110 ± 4	$15,8 \pm 2,5$	$34,8 \pm 1,9$
14/05/08	10h30	9849 ± 493	$3,7 \pm 1,1$	113 ± 4	$15,8 \pm 2,2$	$24,7 \pm 1,7$
14/05/08	11h20	5367 ± 269	$1,8 \pm 1,0$	$69,6 \pm 2,7$	$12,2 \pm 2,0$	$13,5 \pm 1,3$
14/05/08	14h15	419 ± 21	$< 1,4$	$11,8 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,4$

Considerando a concentração dos radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs (Bq L^{-1}) presentes no tanque TR1 e após o início da liberação controlada do efluente radioativo líquido, estimou-se o fator de diluição no ponto E1 utilizando a equação 13.

Na TAB. 4.16 são apresentados os resultados dos fatores de diluição dos radiotraçadores ^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn e ^{137}Cs calculados para o ponto de

coleta E1, durante o período da liberação controlada do efluente radioativo líquido do tanque de retenção TR1.

TABELA 4.16: Fatores de diluição do tanque de retenção TR1 no ponto de coleta E1.

Data	Hora	^3H	^{54}Mn	^{60}Co	^{65}Zn	^{137}Cs
13/05/08	9h37	5,5	19,8	21,9	21,7	4,0
13/05/08	10h35	3,8	13,8	15,7	10,1	6,7
13/05/08	11h31	2,6	7,6	10,2	8,3	4,4
13/05/08	12h37	3,9	8,5	9,1	8,7	5,2
13/05/08	13h33	5,1	11,4	9,3	11,3	7,4
13/05/08	14h30	4,8	10,9	9,5	11,8	9,4
13/05/08	média	4,3	12,0	12,6	12,0	6,2
13/05/08	15h30	14,8	-----	25,4	44,6	26,2
14/05/08	9h35	5,8	15,4	12,0	25,5	8,4
14/05/08	10h30	5,8	11,0	11,7	25,4	11,8
14/05/08	11h20	10,6	21,9	19,0	32,9	21,5
14/05/08	média	7,4	16,1	14,2	27,9	13,9
14/05/08	14h15	136	-----	112	191	138

As médias dos fatores de diluição obtidas no primeiro dia de liberação foram 4,3 para o ^3H , 12,0 para o ^{54}Mn , 12,6 para o ^{60}Co , 12,0 para o ^{65}Zn e 6,2 para o ^{137}Cs .

No segundo dia os fatores de diluição foram 7,4 para o ^3H , 16,1 para o ^{54}Mn , 14,2 para o ^{60}Co , 27,9 para o ^{65}Zn e 13,9 para ^{137}Cs . As médias foram calculadas no período de funcionamento da bomba mecânica de descarga do tanque de retenção TR1.

As razões das médias da estimativa dos fatores de diluições entre os dias das coletas para o ^3H foi de 1,7, para o metal alcalino ^{137}Cs foi de 2,2, para os metais de transição foi de 1,3 para o ^{54}Mn , 1,1 para ^{60}Co e 2,3 para o ^{65}Zn .

As razões dos fatores de diluição do ^3H e ^{137}Cs calculados estão coerentes com a razão verificada nos doze hidrômetros distribuídos pelo campus do *ipen* nos dias das amostragens; a razão dos hidrômetros foi da ordem de 1,9.

Observou-se pelos dados obtidos na tabela 4.16, que o valor do fator de diluição variou por radiotraçador empregado, em ordem crescente do ^3H , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn .

Seguindo as altas temperaturas dos eventos nucleares, os radioisótopos refratários gerados na operação normal de um reator nuclear, presentes em um efluente líquido, se apresentam principalmente como partículas, embora estejam presentes com massa desprezível.

O trício apresenta comportamento similar ao seu isótopo estável, o hidrogênio, apresentando assim alta mobilidade na água (Lurie, 1978; Leonardo, 2004). Em meio aquoso, participa do equilíbrio de ionização da água, podendo estar presente na forma molecular ou de íons. Na reação abaixo é apresentada a ionização das moléculas de água.

De forma simplificada essa reação pode ser escrita como:

O íon hidrônio (H^+) presente pode ser formado a partir dos átomos do hidrogênio (^1_1H) ou trício (^3_1H), que apresentam as mesmas propriedades e comportamento físico, químico e energético, além de todas as características do elemento hidrogênio ($Z=1$).

O fator de diluição estimado para o trício corresponde ao fator de diluição aplicável à água, que é o solvente ou macroconstituente dos efluentes radioativos líquidos liberados pelo *ipen*.

Verificou-se que a razão do fator de diluição estimado para o trício nos dias 13 e 14 de maio de 2008 resultou muito próximo ao valor da razão do consumo de água, possibilitando obter uma estimativa significativa no comportamento das moléculas de água na rede de esgoto durante a liberação.

O Césio, metal alcalino, é altamente solúvel em água, sendo fortemente transportado neste meio e apresenta analogia química com o nutriente potássio, e pode ser encontrado em organismos biológicos em concentrações detectáveis, mostrando sua grande mobilidade ambiental (Rocca, 1995). Por ser fortemente iônico (eletrovalência 1+) e possuir solubilidade e mobilidade elevada em meio polar como a água, apresentou fator de diluição próximo ao do trício.

Os metais de transição, chamados rotineiramente de metais, são elementos não biodegradáveis e apresentam geralmente mais de um estado de oxidação. Esses diferentes estados de oxidação determinam sua eletrovalência, afinidades químicas, mobilidade no meio aquoso, biodisponibilidade e toxicidade.

Esses metais quando presentes em efluente aquoso, tendem a permanecer na fase insolúvel e no fundo do compartimento, dependendo das condições de estocagem. O efluente radioativo líquido foi armazenado por vários meses antes do estudo como traçador radioativo e sua saída do tanque se dá por um tubo na parte inferior do tanque (IPEN, 1974).

O metal de transição Co, quando distribuídos em ambientes aquáticos, o seu principal compartimento é o sedimento (Rocca, 1995).

No presente trabalho estudou-se ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn na forma isotópica e com massa desprezível, porém cabe salientar que tais isótopos apresentam todas as propriedades físicas e químicas dos seus elementos químicos correspondentes. Os três metais possuem mais de um estado de oxidação, no meio aquoso o estado de valência mais estável é o 2+. A ordem decrescente e estabilidade da eletrovalência em meio aquoso na literatura é $\text{Co} > \text{Zn} > \text{Mn}$ (Lurie, 1978; Vogel, 1981).

Uma espécie química presente em efluente aquoso, mesmo com massa desprezível, poderá passar por uma série de reações químicas, bioquímicas, fotoquímicas e inter-relações com os constituintes do meio antes de sua liberação; no presente trabalho esta ocorrência foi facilitada pelo período de estocagem. Estas reações poderão neutralizar, modificar ou retardar a ação química da espécie.

A diferença entre os resultados obtidos dos radiotraçadores presentes no efluente líquido radioativo liberado indicou que existe diferença na mobilidade desses radiotraçadores no compartimento estudado. A mobilidade dos metais de transição no meio aquoso depende de diversas condições químicas e físicas, tais como: pH, força iônica, substâncias orgânicas, dentre outras (Lurie, 1978; Manahan, 1999).

Os processos que agem sobre os componentes químicos, estocados por meses em um tanque de retenção do tipo IEA-R1 são adsorção-desorção, reação ácido-base, dissolução, precipitação e co-precipitação, oxidação-redução química, associação iônica e síntese celular microbiana.

A dinâmica de liberação do tanque TR1 inicia-se na parte inferior, local onde se encontra a fração mais rica dos metais devido a sua solubilidade e densidade. No primeiro dia, iniciou-se a liberação do volume do efluente radioativo líquido do fundo do tanque e no segundo dia foi descartada a parte superior do volume inicialmente presente, com menor quantidade de material insolúvel, fato que pode ter favorecido um valor menor para a estimativa do fator de diluição médio.

Os metais de transição com as suas características físicas e químicas, comportamento complexo, baixa mobilidade no meio aquático, possíveis transformações entre as espécies presentes no tanque TR1, além das características do tanque TR1, da dinâmica de homogeneização e da liberação podem explicar os valores estimados para os fatores de diluição relativo aos radiotraçadores ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn .

Outro fator que influenciou significativamente na diluição do efluente, foi o consumo de água, que varia por dia e horário.

4.5 Determinação dos elementos estáveis utilizando espectrometria de absorção atômica

Para a determinação dos elementos estáveis nos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen* foram considerados dois parâmetros; primeiro os elementos descritos na Norma e Resolução (CONAMA, 2005, 2008; DOE-SP, 1976) para liberação no meio receptor e o segundo parâmetro, a disponibilidade das lâmpadas do espectrômetro de absorção atômica. Foram determinados os elementos estáveis Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, em todas

as amostras dos tanques TR1 e CR, e em parte das amostras das demais instalações do **ipen** entre 2004 a 2007.

A calibração foi realizada como descrito no item 3.2.2, foram determinadas três medidas de absorvância por ponto de calibração. As concentrações dos elementos Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, utilizados na preparação dos padrões e as curvas de calibração e seus respectivos ajustes dos elementos estáveis estudados são apresentadas nas TAB. 4.17 e FIG. 4.3 a 4.10, respectivamente.

TABELA 4.17: Concentração dos elementos utilizados na preparação dos padrões de calibração para absorção atômica.

ELEMENTOS	0,1 $\mu\text{g g}^{-1}$	0,2 $\mu\text{g g}^{-1}$	0,5 $\mu\text{g g}^{-1}$	1 $\mu\text{g g}^{-1}$	1,25 $\mu\text{g g}^{-1}$	1,6 $\mu\text{g g}^{-1}$	2 $\mu\text{g g}^{-1}$
Cádmio	0,1017	0,2020	0,5124	1,0078	1,2619	1,6100	2,0208
Chumbo	0,0999	0,1984	0,5032	0,9896	1,2391	1,5809	1,9843
Cromo	0,0972	0,1938	0,5167	0,9698	nd	1,5153	1,9372
Ferro	0,0988	0,1963	0,4978	0,9790	1,2259	1,5641	1,9632
Manganês	0,0992	0,1970	0,4998	0,9828	1,2307	1,5702	1,9709
Níquel	0,0999	0,1984	0,5032	0,9896	1,2391	1,5809	1,9843
Prata	0,1019	0,1981	0,5167	0,9927	nd	1,6269	1,9803
Zinco	0,0997	0,1980	0,5022	0,9876	1,2367	1,5778	1,9805

nd: não determinado

FIGURA 4.3: Curva de calibração do elemento cádmio.

FIGURA 4.4: Curva de calibração do elemento chumbo.

FIGURA 4.5: Curva de calibração do elemento cromo.

FIGURA 4.6: Curva de calibração do elemento ferro.

FIGURA 4.7: Curva de calibração do elemento manganês.

FIGURA 4.8: Curva de calibração do elemento níquel.

FIGURA 4.9: Curva de calibração do elemento prata.

FIGURA 4.10: Curva de calibração do elemento zinco.

A verificação das curvas de absorção atômica foi realizada utilizando materiais de referência da Merck HC617908 e 90376147. Foram calculadas as médias de três medidas dos elementos estáveis com suas respectivas incertezas. Os valores de referência encontram-se no intervalo intermediário das curvas de calibração, com isso houve a necessidade de se fazer diluições no material original para obter valores dos elementos calibrados próximos de 1 ppm e o manganês na ordem de 0,5 ppm; os resultados obtidos são apresentados na TAB. 4.18.

TABELA 4.18: Comparação do material de referência com o valor determinado na Absorção Atômica.

ELEMENTOS	Material de referência Lote	Material de referência(*) ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Valor médio determinado ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Exatidão do método (%)	Índice Z
Cádmio	HC617908	$1,0008 \pm 0,2002$	$0,8944 \pm 0,0287$	-10,6	-0,53
Chumbo	HC617908	$1,0305 \pm 0,2061$	$0,9937 \pm 0,0127$	-3,6	-0,18
Cromo	HC617908	$1,0008 \pm 0,2002$	$1,0606 \pm 0,0838$	6,0	0,30
Ferro	HC617908	$1,0008 \pm 0,2002$	$0,9464 \pm 0,0065$	-5,4	-0,27
Manganês	HC617908	$0,5004 \pm 0,1001$	$0,4601 \pm 0,0132$	-8,1	-0,40
Níquel	HC617908	$0,9996 \pm 0,1999$	$0,9649 \pm 0,0111$	-3,5	-0,17
Prata	90376147	$1,0740 \pm 0,0215$	$1,0322 \pm 0,0073$	-3,9	-1,95
Zinco	HC617908	$1,0008 \pm 0,2002$	$0,9449 \pm 0,0462$	-5,6	-0,28

(*) valores diluídos.

Na TAB. 4.18 o Índice Z apresentado avalia o desempenho do resultado do laboratório utilizando material de referência certificado, utilizando a equação 21 (INMETRO, 2007).

$$Z = \frac{(X_{\text{lab}} - X_{\text{ref}})}{S_{\text{ref}}} \quad (21)$$

Onde:

X – Valor da concentração.

s – desvio padrão.

ref e lab – índices que representam resultados do material de referência e laboratório.

Os critérios de avaliação do Índice Z:

$Z \leq 2$ – resultado satisfatório;

$2 < Z \leq 3$ – resultado questionável;

$Z > 3$ – resultado insatisfatório.

Na TAB. 4.19 são apresentados os resultados das concentrações e suas respectivas incertezas dos elementos estáveis Ag, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn encontrados nos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do *ipen*, nos anos de 2004 a março 2008.

As amostras são identificadas pelo código SI que significa Solicitação Interna, os três primeiros algarismos representam a ordem de recebimento e os dois últimos o ano.

TABELA 4.19: Resultados dos elementos estáveis nos efluentes radioativos líquidos das instalações do *ipen*.

Código	Instalação	Fe mg L ⁻¹	Mn mg L ⁻¹	Pb mg L ⁻¹	Ni mg L ⁻¹	Cd mg L ⁻¹	Zn mg L ⁻¹	Ag mg L ⁻¹	Cr mg L ⁻¹
SI-092-04	CCN	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-093-04	CCN	0,69±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-045-05	CCN	4,42±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,25±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-028-07	CCN	0,55±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-029-07	CCN	0,72±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-026-06	CMR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	205±3	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-027-06	CMR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-131-06	CQMA	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,67±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-132-06	CQMA	0,43±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,95±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-081-04	CR	1,61±0,01	< 0,1	0,29	< 0,1	< 0,1	0,46±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-098-04	CR	0,29±0,01	< 0,1	0,21	< 0,1	< 0,1	0,33±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-110-04	CR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,22±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-182-04	CR	0,56±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,28±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-100-05	CR	0,20±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,31±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-154-05	CR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-221-05	CR	0,70±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,20±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-005-06	CR	0,53±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,17±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-049-06	CR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,31±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-069-06	CR	0,14±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,30±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-070-06	CR	0,18±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,23±0,05	< 0,1	< 0,1

TABELA 4.19: Resultados dos elementos estáveis nos efluentes radioativos líquidos das instalações do *ipen*.(continuação)

Código	Instalação	Fe mg L ⁻¹	Mn mg L ⁻¹	Pb mg L ⁻¹	Ni mg L ⁻¹	Cd mg L ⁻¹	Zn mg L ⁻¹	Ag mg L ⁻¹	Cr mg L ⁻¹
SI-150-06	CR	0,44±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,11±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-094-07	CR	0,85±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,17±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-001-07	CRPq	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,15±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-033-08	CRPq	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-034-08	CRPq	0,12±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-127-06	LRR	< 0,1	0,18±0,01	< 0,2	1,95±0,01	< 0,1	13,1±0,3	< 0,1	< 0,1
SI-058-07	LRR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	0,30±0,01	< 0,1	0,80±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-004-08	LRR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	0,12±0,01	< 0,1	0,52±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-039-06	MB-01	2,83±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-057-07	MB-01	0,42±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-160-04	REATOR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,15±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-203-04	REATOR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SI-068-05	REATOR	0,35±0,01	0,32±0,01	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,26±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-006-06	REATOR	0,47±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,21±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-126-06	REATOR	0,18±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,17±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-176-06	REATOR	< 0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,12±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-050-07	REATOR	0,60±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,42±0,05	< 0,1	< 0,1
SI-121-07	REATOR	0,15±0,01	< 0,1	< 0,2	< 0,1	< 0,1	0,13±0,05	< 0,1	< 0,1

Os resultados dos elementos estáveis da TAB. 4.18 que apresentaram valores superiores ao valor máximo do Decreto Lei 8.468 (DOE-SP, 1976), foram o SI-026/06 da instalação CMR que ultrapassou o valor máximo do elemento cádmio em aproximadamente 140 vezes, o SI-127/06 que ultrapassou o valor do elemento zinco em aproximadamente 2,5 vezes e o valor do elemento níquel muito próximo ao valor máximo. Isto demonstra a necessidade da determinação da estimativa do fator de diluição para que o efluente seja liberado obedecendo às normas vigentes.

A amostra SI-026/06 estava estocada em uma bombona com volume total de 50 litros do Laboratório de Monitoração in Vivo do CMR, e a amostra SI-127/06 estava armazenada no tanque de retenção do LRR com volume total de 3.000 litros; os dois efluentes foram liberados no ponto de descarte E1. Os efluentes liberados com elementos estáveis acima do Decreto Lei 8.468 (DOE-SP, 1976) representaram 0,75%, sendo que a amostra da bombona SI-026/06 representou 0,01% e a amostra do tanque de retenção SI-127/06 representou 0,74%, do volume total liberado de efluente radioativo líquido no ano de 2006.

Cabe salientar que os padrões de lançamento de efluentes que trata o artigo 19-A do Decreto Lei 8.468 (DOE-SP, 1976), diz respeito aos valores máximos de liberação na rede de esgoto receptora.

Utilizando o cenário com o radiotraçador ^3H no dia 13/05/2008 para os efluentes da bombona SI-026/06 e do tanque de retenção SI-127/06, para o elemento cádmio seria necessário aproximadamente 12 minutos de tempo de diluição e para o elemento zinco aproximadamente 13 minutos, para que os valores ficassem abaixo dos valores máximos do Decreto Lei 8.468 (DOE-SP, 1976) no ponto de saída E1.

No dia 14/05/2008, para o elemento cádmio e o zinco aproximadamente 6 minutos de tempo de diluição. O radiotraçador ^3H foi utilizado no cenário para os cálculos das diluições, pois a água foi o macroconstituente dos efluentes radioativos líquidos liberados.

Este estudo está sendo restritivo no âmbito de uma liberação de efluente, apenas levando em consideração as concentrações dos elementos estáveis e não considerando o tempo de liberação, o percurso do efluente na rede de esgoto e as diluições dos efluentes após as instalações do *ipen*, pois a rede de esgoto do *ipen* conecta-se com a rede de esgoto da CUASO, e por sua vez

conecta-se a uma parte da cidade de São Paulo, em seguida o esgoto é tratado pela ETE-Barueri com uma vazão média de $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (SABESP, 2008), para depois ser lançado ao corpo de água receptor, rio Tietê.

4.6 Sistema ambiental do *ipen*.

O modelo de sistema ambiental adotado neste trabalho foi proposto por Hardt (Hardt, 2000). A seguir serão apresentados os componentes dos subsistemas ambientais do *ipen*.

4.6.1. Subsistema Natural.

O subsistema natural ao qual o *ipen* está inserido foi amplamente alterado por atividades humanas, desde 1956, data da sua fundação. Atualmente é uma área densamente povoada, com finalidade de produção, serviço, pesquisa científica e ensino.

4.6.1.1 Subsistema Natural Físico.

Clima/Ar (IPEN, 2006A; Moreira et al., 2005; Höfling e Camargo, 2002):

- Clima tropical temperado.
- Temperatura média – média dos meses mais quentes, $24,9^\circ \text{C}$.
 - média dos meses mais frios, $15,3^\circ \text{C}$.
 - médias anuais aproximadamente de $19,1^\circ \text{C}$.
 - máxima absoluta próxima de 34°C .
 - mínima próxima de 0°C .
- Direção predominante de vento - SSE.
- Precipitação - janeiro maior precipitação, com média do índice pluviométrico de 275 mm.
 - julho menor precipitação, com média de 30 mm.
 - maiores índices pluviométricos, primavera e verão.
 - menores índices pluviométricos, outono e inverno.
 - índice de precipitação total média anual de 1300 mm.
- Umidade relativa - média de 80%.
- Pressão – junho a agosto, médias mais altas.

- dezembro a março, médias mais baixas

Água (IPEN, 2006c e IPEN, 2006d):

- Sub-Bacia Penha-Pinheiros do Alto Tietê.
- Principal ocorrência de água superficial corresponde ao canal do rio Pinheiros, principal afluente do rio Tietê.
- Direção do escoamento para o Ribeirão Jaguaré.
- Lençol freático fluxo predominante N-NW.

Solo/subsolo (IPEN, 2006b):

- Bacia sedimentar formada durante o período Terciário

4.6.1.2 Subsistema Natural Biológico (Höfling e Camargo, 2002).

Flora: - pequena reserva florestal natural, estrutura complexa com cerca de 90 espécies, floresta estacional semidecídua.

Fauna: - pequena fauna, basicamente pássaros, insetos, roedores e animais domésticos.

4.6.2 Subsistema Antrópico.

O subsistema antrópico compreende a infra-estrutura instalada no meio ambiente a partir das atividades humanas.

4.6.2.1 Subsistema Antrópico Territorial (de ocupação).

Uso/ocupação do solo (IPEN, 2006d e IPEN, 2006):

- Localização - Campus da Cidade Universitária “Armando de Salles Oliveira”, situada na porção Centro-Oeste do Município de São Paulo. Delimitada pelas coordenadas, latitude 23° 32'S e longitude 46° 37'W, e altitude média de 760 m do nível do mar. Aproximadamente 10 km do centro da cidade de São Paulo.
- Ocupação estritamente urbana, utilizada para produção, serviço e pesquisa científica.
- Ocupando uma área cerca de 500.000 m².

Infra-estrutura/serviços urbanos:

- edificações.
- instalações radiativas.
- instalações nucleares.

- tanques de retenção.
- rede de esgoto.
- rede de abastecimento de água.
- energia elétrica.
- central telefônica.
- galerias de rede pluvial.
- ruas pavimentadas.
- cerca de proteção física.

4.6.2.2 Subsistema Antrópico Social (de consumo).

População: cerca de 2000 funcionários e colaboradores.

Serviços sociais: - Assistente social.

- Serviço médico-odontológico.

4.6.2.3 Subsistema Antrópico Econômico (de produção).

Setores produtivos:

- Centro de Aceleradores Ciclotron – CAC.
- Centro de Biologia Molecular – CBM.
- Centro do Combustível Nuclear – CCN.
- Centro de Ciência de Tecnologia de Materiais – CCTM.
- Centro de Engenharia Nuclear – CEN.
- Centro de Lasers e Aplicações – CLA.
- Centro de Metrologia das Radiações –CMR.
- Centro de Química e Meio Ambiente – CQMA.
- Centro de Radiofarmácia – CR.
- Centro do Reator de Pesquisas – CRPq.
- Centro de Tecnologia das Radiações – CTR.
- Laboratório de Rejeitos Radiativos – LRR.
- Serviço de Radioproteção - SRP.

Renda/ocupação (IPEN, 2006):

- Produção e comercialização de radiofármacos para terapia e diagnóstico.

- Calibração de equipamentos de radioproteção usados em hospitais, clínicas, indústrias, etc.
- Serviços de irradiação em aceleradores de elétrons e ciclotron, reatores nucleares de pesquisa e irradiadores de grande porte para fins diversos.
- Serviços de análise química, física e radiométrica, utilizando técnicas diversas.
- Produção e calibração de fontes radioativas para uso em hospitais, clínicas, indústrias, etc.
- Tratamento e acondicionamento de rejeitos radioativos.
- Controle de exposição e contaminação de trabalhadores.
- Pesquisa e ensino.

4.6.2.4 Subsistema Antrópico Institucional (de gestão).

Estrutura política-administrativa (IPEN, 2006):

- constituída pela Superintendência e pelo Conselho Técnico Administrativo (CTA).
- Diretorias do **ipen**: - Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino (DPDE),
 - Projetos Especiais (DPE),
 - Segurança Radiológica (DSR),
 - Administração (DAD),
 - Prefeitura do Campus do **ipen** (PCI).
- comitê, coordenação, assessoria e serviço:
 - Comitê de Avaliação de Segurança da Instituição (CASI).
 - Coordenação da Qualidade, Meio Ambiente e Segurança (CQAS).
 - Serviço de Radioproteção (SRP).
 - Comitê de Segurança Interno - equipe de radioproteção.
 - representantes da Direção

Estrutura jurídica-institucional (IPEN, 2006):

- autarquia estadual vinculada à Secretaria de Desenvolvimento do Governo do Estado de São Paulo e associada à Universidade de São Paulo - USP na sua finalidade de ensino. Desde novembro de 1982 é gerido técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no termo fonte de 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008 não ultrapassaram os limites de liberação da norma da CNEN, demonstrando que os valores estão de acordo com as condições de descarte, com respeito aos isótopos radioativos presentes nos efluentes.

As metodologias para a determinação dos radionuclídeos e elementos estáveis foram validadas utilizando-se amostras de intercomparações e materiais de referências, obtendo-se resultados dentro dos valores aceitáveis.

Em relação à contribuição percentual em atividade liberada para o meio ambiente através da rede coletora de esgoto no período 2004 à 2008, o tanque de retenção TR1 contribuiu em média com 87,4%, o tanque do CR em média com 11,4%, e o restante das instalações do *ipen* 1,2%. Quanto ao volume liberado por instalação, os mais representativos foram TR1, CRPq e CR, que representaram na média do período 80%, 10,8% e 5,9% respectivamente e o restante das instalações 3,2%. Os tanques de retenção TR1, CRPq e CR estão conectados na rede coletora de esgoto do *ipen* na saída E1. Os efluentes gerados pelo CRPq são provenientes dos laboratórios da Radioquímica, Física Nuclear e Laboratório de Descontaminação do SRP.

O ponto E1 é a saída da rede coletora de esgoto mais importante atualmente para a liberação do efluente radioativo líquido no *ipen*.

O cálculo da vazão do tanque de retenção TR1 foi necessário para conhecer o tempo de duração da liberação e determinar a quantidade de esgoto no ponto de descarte E1, sendo estimado a vazão em $10,9 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Os fatores de diluição estimados variaram em ordem crescente para o ^3H , metal alcalino ^{137}Cs e para os metais pesados ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn , seguindo a densidade e comportamento químico de cada elemento. As médias dos fatores de diluição obtidas no primeiro dia de liberação foram 4,3 para o ^3H , 12,0 para o ^{54}Mn , 12,6 para o ^{60}Co , 12,0 para o ^{65}Zn e 6,2 para ^{137}Cs . No segundo dia os fatores de diluição foram 7,4 para o ^3H , 16,1 para o ^{54}Mn , 14,2 para o ^{60}Co , 27,9 para o ^{65}Zn e 13,9 para ^{137}Cs . As razões das médias das estimativas dos fatores

de diluições entre os dias das coletas para o ^3H foi de 1,7, para o metal alcalino ^{137}Cs foi de 2,2 e para os metais foi de 1,3 para o ^{54}Mn , de 1,1 para ^{60}Co e de 2,3 para o ^{65}Zn .

No nível operacional, verificou-se que o fator de diluição é diferenciado por grupo químico. Para as estimativas dos fatores de diluição do ^3H e o metal alcalino ^{137}Cs , obteve-se valores coerentes entre eles e com a razão dos doze hidrômetros instalados no *ipen*. Em relação aos metais, devido às suas características físicas e químicas, comportamento complexo, baixa mobilidade no meio estudado, as possíveis transformações e reações entre as espécies presentes no tanque TR1, as características do tanque TR1, a dinâmica de homogeneização e da liberação, pode-se explicar os valores estimados para os fatores de diluição para os radiotraçadores ^{54}Mn , ^{60}Co e ^{65}Zn .

Foi verificado pelos resultados obtidos que os fatores de diluição variaram durante o período de amostragem, tendo sido estimado para uma liberação controlada do tanque TR1 (operacional). Os fatores de diluição deverão ser estimados para outras liberações.

A estimativa dos fatores de diluição não gerou custos monetários adicionais, além de impedir a adição de radionuclídeos que seriam liberados ao meio ambiente.

A determinação dos elementos estáveis foi muito importante neste trabalho, pois demonstrou sob o âmbito de sistema ambiental, que uma amostra de efluente descartada está sujeita a exigência legal diferenciada, que deve ser cumprida, na gestão ambiental institucional.

Os dois efluentes que ultrapassaram os limites do Decreto Lei 8.468 para os elementos estáveis, ficaram abaixo da CMD do sistema de detecção para os radionuclídeos, mostrando que para uma liberação de efluente radioativo líquido, o que pode ser restritivo são os elementos estáveis presentes no efluente. Isto demonstra a necessidade da determinação da estimativa do fator de diluição para que o efluente seja liberado obedecendo as normas vigentes.

O estudo foi restritivo no âmbito de uma liberação de efluente na rede de esgoto, apenas levando em consideração as concentrações dos elementos nos efluentes e não considerando o tempo de liberação, percurso do efluente na rede de esgoto e as diluições dos efluentes após as instalações do *ipen*, pois a rede de esgoto do *ipen* se conecta com a rede de esgoto da CUASO, e que por

sua vez se conecta a uma parte da cidade de São Paulo. Em seguida, o esgoto é tratado pela ETE-Barueri com uma vazão de $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para depois ser lançado ao corpo de água receptor, rio Tietê.

As determinações das concentrações dos radionuclídeos e elementos estáveis presentes no efluente, determinação da vazão do tanque TR1 e estimativa do fator de diluição, demonstraram a visão sistêmica prática para uma liberação de efluente, conforme apresentada na FIG. 5.1.

O estabelecimento dos subsistemas natural e antrópico neste estudo os quais se interligam no ambiente construído, possibilitou definir as estruturas necessárias para a estimativa do fator de diluição intra-institucional, além de contribuir no registro ordenado dos diversos parâmetros que são indispensáveis à gestão ambiental e à gestão institucional.

Até o presente momento este é o primeiro estudo sobre a estimativa dos fatores de diluição utilizando uma liberação controlada de efluente radiativo líquido no ponto de saída do *ipen*, a determinação dos elementos estáveis nos efluentes radioativos líquidos e a determinação da vazão do tanque TR1.

Os resultados gerados contribuem e fornecem subsídios para o ajuste de conduta institucional, sob os mecanismos regulatórios vigentes e para estabelecer procedimentos otimizados.

Os parâmetros envolvidos neste estudo são válidos para o *ipen* durante o período estudado. Outros cenários devem ser avaliados caso a caso. O estudo apresentado poderá ser aplicado para instalações radiativas, nucleares ou convencionais de diversos portes.

FIGURA 5.1 Modelo prático de Sistema Ambiental Aplicado à Liberação de Efluente Radioativo Líquido.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudo dos fatores de diluição para o tanque de retenção do CR.

Reavaliação do grupo crítico para a liberação de efluente radioativo líquido do *ipen*.

Implementação de metodologia para determinação dos elementos estáveis no efluente radioativo líquido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, A.M.; LÉON, M.G. ^{210}Pb distribution in river waters and sediments near phosphate fertilizer factories. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 47(576), p. 599-602, 1996.

ALENCAR, M.M. **Determinação de isótopos de urânio e tório em amostras de líquens canoparmelia texana**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos. Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (NBR 10004).

BROWNE, E.; FIRESTONE, R.B. **Table of Radioactive Isotopes**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y., 1986.

CLAYTON, Antony M.H.; RADCLIFFE, Nicolas J. **Sustainability: A System Approach**. Cambridge, MA: Westview, 1996.

CARVALHO, R. N. Supervisão de Radioproteção do CRPq, Comunicação pessoal. IPEN, 2008.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Radioproteção**. Norma experimental CNEN-NE-3.01. Brasília, 1988.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Norma CNEN-NN-3.01. Brasília, 2005.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas**. Norma experimental CNEN-NE-6.05, Brasília, 1985.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Posição Regulatória 3.01 / 008**. Norma CNEN-NN-3.01. Brasília, 2005a.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Posição Regulatória 3.01 / 009**. Norma CNEN-NN-3.01. Brasília, 2005b.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **“Novo prazo para adequação à Norma CNEN NN 3.01 (Publicado em 02/05/2006)”**. CNEN. Brasília, 2006.

CNRH. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Define o valor de cobrança pelo uso de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Resolução número 19. Brasília, 2002.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água superficiais e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos**. Resolução 357. Brasília, 2005.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Altera o inciso II do 4º e a Tabela X do 5º da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA nº 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água superficiais e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos.** Resolução 397. Brasília, 2008.

COPAM. CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Padrões de Lançamentos de Efluentes Líquidos.** Deliberação Normativa número 010. Minas Gerais, 1986.

CURRIE, L.A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. **Anal. Chem.** v.40, p. 586-593, 1968.

DOE-SP. **Decreto lei nº 8.468. Aprova o Regulamento da lei n. 997, que dispõe sobre a Prevenção e Controle do Meio Ambiente. DIÁRIO OFICIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO**, SÃO PAULO, 8 de setembro de 1976.

DOM-SP. **AGENDA 21 DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO.** Diário Oficial do Município de São Paulo, São Paulo, 1996.

GERULIS, E.; SORDI, G.M.A.A.; SILVA, O.P. Gerenciamento de rejeitos no centro de radiofarmácia do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. **International Nuclear Atlantic Conference** (Brasil), 28 de agosto a 2 de setembro, 2005.

GERULIS, E. Croqui da instalação do CR (prédio 1 e 2) com seus respectivas vias de efluentes líquidos para os tanques de retenção. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

HARDT, L. P. A. **Subsídios à gestão da qualidade da paisagem urbana:** aplicação a Curitiba – PR. Curitiba : 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HÖFLING, E.; CAMARGO, H.F.A. **Aves no campus.** Ed. Edusp, 3ª edição revisada e ampliada, 2002.

HOLM, E. Review of alpha-particle spectrometric measurements of actinides. **J. Appl. Radiat. Isot.**, 35(4):285-290, 1984.

HORTELLANI, M.A; SARKIS, J.E.S.; ABESSA, D. M.S.; SOUSA, E.C.P.M. Avaliação da contaminação por elementos metálicos dos sedimentos do estuário de Santos-São Vicente. **Quim. Nova.** V.31(1), p. 10-19, 2008.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Orientação sobre validação de métodos de ensaios químicos.** DOQ-CGCRE-008, Revisão 02 – Brasília, 2007.

INTERWINNER. **InterWinner (WinnerGamma) Spectroscopy Program Family Version 6.0**, 2004.

IPEN. **Planta IEA – Tanque de retenção de efluentes radioativos líquidos do Reator Nuclear IEA-R1 – número 493 01 - desenho Dario em 29/08/73**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1973.

IPEN. **Planta detalhe geral das ligações para o tanque de retenção de efluentes radioativos líquidos do Reator Nuclear IEA-R1 -desenho Carlos em 17/05/74**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1974.

IPEN. **Planta geral do *ipen* - desenho Gilberto em 12/07/94 e alterado por Elizabeth em 12/07/03**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2003.

IPEN. **Planta do tanque de retenção de efluentes radioativos líquidos da instalação radiativa CR – cortes e detalhes das inst. hidráulicas – número 02 em 06/03/04**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2004.

IPEN. **Mapa de efluente do *ipen*.**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://intranet.ipen.br/Sistema de Gestão Integrada/Relatórios/Mapa de efluente do ipen>>. Acesso 05 dez 2008.

IPEN. **Planta do terceiro andar do prédio do Reator IEA- desenho Tonicarlos em 09/09/08**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008a.

IPEN. **Planta do primeiro andar do prédio do Reator IEA- desenho Tonicarlos em 09/09/08**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008b.

IPEN. **Planta do subsolo do prédio do Reator IEA- desenho Tonicarlos em 09/09/08**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008c.

IPEN. FM-IPN-0301-15 v1. **Formulário de solicitação de análise de efluente radioativo líquido ou gasoso do *ipen*.**, documento interno, Sistema da Qualidade, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

IPEN. RGI-IPN-2.00-00. **Relatório geral do *ipen*. Perfil do *ipen*, documento interno, Sistema Gestão Integrada**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

IPEN. RGI-IPN-3.01-00. **Relatório geral do *ipen*. Meteorologia, documento interno, Sistema Gestão Integrada**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006a.

IPEN. RGI-IPN-3.02-00. **Relatório geral do *ipen*. Geologia e Sismologia, documento interno, Sistema Gestão Integrada**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006b.

IPEN. RGI-IPN-3.04-00. **Relatório geral do ipen. Hidrologia, documento interno, Sistema Gestão Integrada**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006c.

IPEN. RGI-IPN-4.03-00. **Relatório geral do ipen. Utilização das Cercanias, documento interno, Sistema Gestão Integrada**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006d.

JACOMINO, V.M.F; GORDON, A.M.P.L.; VENTURINI L. Avaliação radiossanitária do sistema aquático sob influência do IPEN-CNEN/SP. **Publicação ipen 282**, 1989.

JACOMINO, V.M.F; MADUAR, M.F. Monitoração ambiental nas imediações de instalações nuclear. **Publicação ipen 363**, 1992.

JACOMINO, V.M.F; MADUAR, M.F; HIROMOTO,G; GORDON,A.M.P.L.; VENTURINI,L.; SANTOS,A.J.G. . Monitoring of radioactive liquid effluents generated at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares and environmental behaviour of radionuclides in the ecosystem of pinheiros river. In: The 8th International Radiation Protection Association, 1992, Montreal. **Proceedings...**Montreal, 1992. p. 1302-1304.

KEITH, L.H.; CRUMMET,W.; DEEGAR,J.P.; LIBBY,R.A.; TAYLOR,J.K.; WENTER,G. Principles of environmental analysis. Anal. Chem., v. 55 p.2210-2218, 1983.

KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley e Sons Inc, New York,1989.

LEONARDO, L. **Determinação de trício e estrôncio-90 no controle radiológico do IPEN-CNEN/SP**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

LURIE, J. **Handbook of Analytical Chemistry**. MIR Publishers, Moscow, 1978.

MAESTRO. **Maestro for Windows Model A65-B32 version 5.30**, 2001

MANAHAN, S.E., **Environmental Chemistry**. Ed. Lewis Publishers, 7ª edição, 1999

MOREIRA, S. R. DAMATTO ; MADUAR, M. F. ; NISTI, M. B. ; NOGUEIRA, P. R. ; PECEQUILLO, B. R. S. . Preliminary results of ⁷Be concentrations in ground level air at São Paulo, Brazil.. In: The 2nd International Conference on Radioactivity in the Environment , 2005, Nice. **Proceedings...** Nice, 2005. p. 516-519.

MS. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Qualidade da água para consumo humano**. Portaria 518. Brasília, 2004.

NISTI, MB; SANTOS, A.J.G. **Assessment of radioactive liquid effluents realeas at IPEN-CNEN/SP**. Ed. American Institute of Physics - The Natural Radiation Environment, 2008.

NISTI, MB; SANTOS, A.J.G.; PECEQUILO, B.R.S.; MADUAR, M.F., ALENCAR, M.M.; MOREIRA, S.R.D.; SAUEIA, C.H.R. Fast methodology for time counting optimization in gamma-ray spectrometry based on preset minimum detectable amounts. **Apresentado no 9th International Conference on Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences - NAMLS-9**, 2008a.

ODUM, E..P. **Ecologia**. Ed. Guanabara Koogan S.A., 1988.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **CONFERÊNCIA MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (ECO 92)**. 3-14 jun., 1992. Rio de Janeiro.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **CÚPULA MUNDIAL SOBRE O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (RIO+10)**. 2-11 set., 2002. África do Sul.

PNI-IRD. **Programa Nacional de Intercomparação de Resultados de Análises de Radionuclídeos em Amostras Ambientais**, Rodada abr/2005.

PNI-IRD. **Programa Nacional de Intercomparação de Resultados de Análises de Radionuclídeos em Amostras Ambientais**, Rodada dez/2007.

PNI-IRD. **Programa Nacional de Intercomparação de Resultados de Análises de Radionuclídeos em Amostras Ambientais**, Rodada ago/2008.

ROCCA, F.F.D. **Estimativa da dose nos indivíduos do público decorrente da liberação de efluente líquido pelo ipen**.1995. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

ROWAN, D. J.; RASMUSSEN, J. B. Measuring the bioenergetic cost of fish activity in situ using a globally dispersed radiotracer ^{137}Cs . **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, 53, 734-745, 1996.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em:
<http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=4&proj=sabesp&pub=T&db=&docid=75C9D810780EE913832571B500705B41>>. Acesso em: 04 nov 2008.

SANTOS, A.J.G. **Avaliação do impacto ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb** . 2002. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A.. **Princípios de Análise Instrumental**. Ed. Bookman, 5ª edição, 2002.

TRI-CARB LIQUID SCINTILLATION ANALYZERS MODELS 2100TR/2300TR,
Operation Manual, Publication No.169-4140 Rev.C, Parckard Instruments Co.,
1995.

Vogel, A. **Química Analítica Qualitativa**. Ed. Mestre Jou, São Paulo, 1981.

WHICKER, F. W. Radioecology: relevance to problems of the new millenium. **J. Environ. Radioactivity, Millennial Editorial Series**, 50, 173-178, 2000.

WOODHEAD, D. S. Whither marine radioactivity studies?. **J. Environ. Radioactivity, Millennial Editorial Series** 52, 1-3, 2001.

CORTE **AA**
S/escola

CORTE **BB**
S/escola

Anexo I: Planta detalhe geral das ligações para o tanque de retenção do Reator Nuclear IEA-R1 (IPEN, 1974).

081: TUBULAÇÃO CONCENTRICA ASSENTADA EM LASTRO DE CONCRETO SÔBRE FUNDO SEM APILADO
 A - MANILHA - PROTEÇÃO MECÂNICA DA TUBULAÇÃO DE PVC
 B - TUBO DE PVC #2 1/2" - TUBULAÇÃO PARA CONTENÇÃO E CONTROLE DE VAZAMENTOS
 C - TUBO DE PVC #1" - TUBULAÇÃO PARA ESCOAMENTO DO EFLUENTE

DETALHE 2
 CAIXA DE PASSAGEM

R1: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R2: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R3: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R4: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R5: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R6: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R7: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R8: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R9: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R10: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R11: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R12: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R13: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R14: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R15: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R16: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R17: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R18: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R19: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R20: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R21: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R22: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R23: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R24: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R25: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R26: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R27: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R28: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R29: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R30: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R31: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R32: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R33: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R34: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R35: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R36: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R37: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R38: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R39: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R40: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R41: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R42: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R43: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R44: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R45: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R46: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R47: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R48: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R49: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R50: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R51: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R52: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R53: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R54: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R55: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R56: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R57: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R58: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R59: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R60: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R61: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R62: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R63: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R64: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R65: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R66: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R67: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R68: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R69: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R70: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R71: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R72: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R73: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R74: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R75: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R76: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R77: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R78: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R79: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R80: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R81: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R82: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R83: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R84: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R85: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R86: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R87: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R88: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R89: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R90: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R91: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R92: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R93: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R94: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R95: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R96: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R97: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R98: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R99: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL
 R100: REGISTRO #1" - ADOÇÃO MANUAL

081: TUBULAÇÃO DE MANOBRAS INDICIZADA (DO PONTO A ao B)
 NO ISOMÉTRICO SERÁ TODA EM ADIÇÃO ÀS 101

DETALHE DO RESERVATÓRIO DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS DA REDE (a ser instalado futuramente - 20-41000)

Anexo III: Planta do tanque de retenção de efluentes radioativos líquidos da instalação radiativa CR (IPEN, 2004).