INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**CONTROLE DA DOSE DE RADIAÇÃO IONIZANTE PARA
TRABALHADORES EM UMA INSTALAÇÃO RADIATIVA COM
FONTES NÃO-SELADAS**

Eduardo Gerulis

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

**Orientador:
Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi**

Exemplar revisado pelo autor

**São Paulo
2006**

Dedicatória

À minha esposa, que com amor iluminou minha vida;
Ao meu enteado, que espero incentivar com esta dedicatória;
Ao meu pai, meu reconhecimento e gratidão;
À minha mãe, minha homenageada eterna;
À minha avó, presente em minha memória;
Às minhas irmãs e familiares, pela paciência durante minha ausência.

Agradecimentos

Ao IPEN que proporcionou a realização deste trabalho;
Ao Dr. Alberto Todo pelo estímulo científico;
Ao M.Sc. Demerval Rodrigues pelo incentivo e cobrança;
Ao Dr. Dirceu Vizeu pela participação na banca examinadora da defesa;
Ao Dr. Gian-Maria Sordi pela paciência, confiança e orientação;
À Dra. Malvina Mitake pela participação na banca de exame de capacidade;
Aos professores da pós-graduação pelos ensinamentos;
Ao Bel. Feijó Vasques, M.Sc. Matias Sanches, Bel. Olavo Silva e em especial ao M.Sc. Fábio Suzuki pelas discussões, críticas e sugestões;
À Dra. Linda Caldas, Dra. Ana Maria Gordon, Dra. Adir Janete Santos, Dra. Janete Cristina Carneiro, M.Sc. Yasko Kodama e ao Bel. Eduardo Toyoda que se dispuseram a colaborar;
Aos colegas de trabalho do Serviço de Radioproteção, Oficina, Biblioteca, Pós-graduação e do Centro de Radiofarmácia do IPEN que colaboraram com fotografias, serviços ou indiretamente na realização deste trabalho.

CONTROLE DA DOSE DE RADIAÇÃO IONIZANTE PARA TRABALHADORES EM UMA INSTALAÇÃO RADIATIVA COM FONTES NÃO-SELADAS

Eduardo Gerulis

RESUMO

Com a liberação do uso da energia nuclear para aplicações pacíficas, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, fundada em 1928, criou em 1958 um sistema de proteção às doses de radiação ionizante indesejáveis causadas aos trabalhadores, indivíduos de público e meio-ambiente para viabilizar a introdução dessas aplicações. Esse sistema de proteção é adotado pelo Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA, que publica recomendações em séries de segurança, SS e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, que publica regulamentações em normas. Essas recomendações internacionais e regulamentações nacionais passaram por adaptações e necessitam ser aplicadas dessa forma. O presente trabalho utiliza recomendações da publicação 75 da CIPR, da publicação 115 da SS e regulamentações da norma NN 3.01 da CNEN para apresentar, através de medidas de radioproteção, o controle das doses de radiação ionizante para trabalhadores em uma instalação radiativa que trabalha com pesquisa, produção, fracionamento e embalagem de fontes não-seladas para uso clínico. Dessa forma, é possível prevenir adequadamente as doses indesejáveis e confirmar as doses recebidas.

IONIZING RADIATION DOSE CONTROL FOR WORKERS IN AN NUCLEAR PLANT WORKING WITH UNSEALED SOURCES

Eduardo Gerulis

ABSTRACT

With the liberation of the use of the nuclear energy for peaceful applications, International Commission Radiological Protection, ICRP, founded in 1928, created a system of protection of the undesirable doses of ionizing radiation in 1958. This has been received by workers, members of the public and environment and hence it became possible for the introduction of these applications. This protection system is adopted by the International Agency of Energy Atomic, IAEA, that publishes recommendations in safety series, SS and by the Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, which publishes these regulations. The international recommendations and national regulations were adapted and they need to be applied in this way. The present paper uses recommendations of the publication 75 from ICRP, of the publication 115 from SS and regulations of the regulation NN 3.01 from CNEN to present, through radiological protection measures, the ionizing radiation dose control for workers in a nuclear plant that works in the research, production, division and packing of unsealed sources to be used in clinical applications. In that way it is possible to prevent appropriately the undesirable doses and to confirm the received doses.

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Evolução do Controle de Doses	1
1.2 Controle de Doses no Centro de Radiofarmácia	5
1.3 Finalidade e Objetivos	6
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 Monitoramento Radiológico	7
2.2 Classificação de Áreas	8
2.3 Patamares de Referência	9
2.4 Limites Anuais	9
3 PARTE EXPERIMENTAL	11
3.1 Descrição Dos Métodos	11
3.2 Descrição da Instalação	12
3.3 Descrição das Tarefas Executadas	14
3.3.1 Trabalhos Relacionados com a Pesquisa	17
3.3.2 Trabalhos Relacionados com a Produção	17
3.3.3 Tarefas de Apoio	22
3.4 Descrição dos Grupos de Trabalho	25
3.5 Monitoramentos	26
3.5.1 Pontos de Monitoramento do Local de Trabalho	26
3.5.1.1 monitoramento relacionado com a tarefa	26
3.5.1.2 monitoramento de rotina	26
3.5.1.3 monitoramento interventor	27
3.5.2 Trabalhadores com Monitoramento Individual	27
3.5.2.1 monitoramento relacionado com a tarefa	27
3.5.2.2 monitoramento de rotina	27
3.6 Uso dos Patamares de Referência	29
3.7 Classificação das Áreas	30
4 RESULTADOS	31
4.1 Monitoramento do Local de Trabalho	31
4.1.1 Monitoramento relacionado com a tarefa	31
4.1.2 Monitoramento de rotina	32
4.1.2.1 região 1	32
4.1.2.2 região 2	38
4.1.2.3 região 3	52
4.1.3 Monitoramento interventor	62
4.2 Monitoramento Individual dos Trabalhadores	62
4.2.1 Monitoramento relacionado com a tarefa	62
4.2.2 Monitoramento de rotina	65
4.2.2.1 potencial de exposição externa	65
4.2.2.2 potencial de incorporação	72
4.2.3 Monitoramento interventor	73
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
5.1 Monitoramento do Local de Trabalho	74
5.2 Monitoramento Individual	76
5.2.1 Valores da dose obtidos com os dosímetros eletrônicos tipo cartão	76
5.2.2 Considerações	78
5.3 Introdução dos Patamares de Referência	80
5.3.1 Monitoramento do local de trabalho	80
5.3.2 Monitoramento individual	81
5.4 Classificação das Áreas	82
5.5 Otimização	85
6 CONCLUSÕES	88
7 FUTUROS TRABALHOS	89

Página

ANEXOS	90
GLOSSÁRIO	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Evolução do Controle de Doses

Nos primórdios das aplicações da radiação ionizante para fins médicos, os efeitos biológicos indesejáveis causados por suas doses¹ eram tratados por médicos radiologistas. Com o estudo desses tratamentos concluiu-se que o assunto devia ter um caráter preventivo para evitar *detrimentos*². Em razão disto, o estudo deixou de ser realizado apenas pela medicina radiológica e passou a ser realizado por ciências multidisciplinares. Em 1928, durante o 2º Congresso Internacional de Radiologia, em Estocolmo, Suécia, foi fundada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, para tratar deste assunto. A CIPR publica recomendações atualizadas de estudos com radiação ionizante. Essas recomendações são adotadas pelo Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA, que realiza publicações da série de segurança, “Safety Series”, SS, para serem utilizadas pelos seus países-membro. A Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, órgão oficial responsável por regular e fiscalizar o uso da radiação em nosso país, baseia-se nessas publicações para estabelecer as suas normas básicas de radioproteção.

Após a liberação da energia atômica para usos pacíficos, em 1955, a CIPR criou em 1958 um programa de proteção à raça humana e ao seu ambiente introduzindo recomendações para se obedecer a um sistema de limitação de doses de radiação [1;2]. O OIEA só apresentou suas primeiras normas sobre limites de dose em 1962 [3]. Estas primeiras recomendações eram conhecidas como LAMP, limites anuais máximos permissíveis de dose de radiação, pois era permitido trabalhar abaixo de seus valores numéricos e atingiram o seu apogeu em 1967 com

¹ Dose, dependendo do contexto, pode ser dose absorvida, $D \text{ (Gy)} = \frac{\partial \epsilon}{\partial m} \text{ (J/kg)}$, onde ϵ é a energia depositada na matéria m , dose equivalente, $H \text{ (Sv)} = D \times w_R \text{ (J/kg)}$, onde w_R é o fator de ponderação da radiação que depende da eficácia biológica relativa, ou dose efetiva, $E \text{ (Sv)} = \sum_T H_T \times w_T \text{ (J/kg)}$, onde w_T é o fator de ponderação do tecido que permite avaliar o efeito biológico no corpo inteiro.

² As palavras em *itálico* estão definidas no GLOSSÁRIO

novas publicações tanto da CIPR [4] como do OIEA [5].

Em 1973, a CIPR apresentou nova diretriz face ao conhecimento que doses de radiação por menor que sejam podem causar detrimientos e recomendou diminuí-las tanto quanto racionalmente exeqüível, levando-se em consideração fatores econômicos e sociais [6;7;8]. Passou a denominar os LAMP de dose de radiação como LAMA, limites anuais máximos admissíveis, que para os trabalhadores era de 50 mSv para dose efetiva, E, [7] com a condição que não ultrapasse 1 Sv em 50 anos de trabalho. O máximo permissível foi mudado para máximo admissível exatamente para obrigar a diminuição das doses como será explicado a seguir.

Para atingir valores aceitáveis de dose de radiação, menores que 1/10 dos LAMA [7], representados na FIGURA 1, a CIPR recomendou um primeiro ciclo de otimizações para diminuir as doses individuais remanescentes dos trabalhadores para 3/10 dos LAMA.

FIGURA 1 - Faixas de trabalho com radiação ionizante

O controle das doses dos trabalhadores, nesse primeiro ciclo de otimizações, era realizado com o uso de quatro medidas de radioproteção:

- monitoramento (de local de trabalho e individual) [9];
- classificação de trabalhadores [7;9;10];
- classificação de áreas [7;9;10];
- patamares de referência [7;9;10].

O monitoramento nos locais de trabalho, que envolve as medidas realizadas no ambiente de trabalho, é realizado com caráter preventivo para radiação externa, para contaminação de superfície e para contaminação de ar. O monitoramento nos indivíduos, para os quais as medidas são realizadas por um equipamento portado pelo trabalhador ou pela determinação da quantidade de materiais radioativos incorporados ou presentes sobre seu corpo e a interpretação dessas medidas, é realizado com caráter confirmatório, para radiação externa, para contaminação de pele e roupas e para contaminação interna. Os princípios que os programas de monitoramento devem satisfazer encontravam-se na publicação nº 12 da CIPR [11] e na série de segurança nº 14 do OIEA quando se encontravam em vigência os LAMP [12]. Com o advento dos LAMA, estas publicações foram substituídas respectivamente pela publicação nº 35 da CIPR [9] e pela série de segurança nº 14 edição 1980 do OIEA [13].

A classificação dos trabalhadores era realizada para identificar dois grupos. Um grupo que recebia doses toleráveis maiores que 3/10 dos LAMA e outro grupo que recebia doses toleráveis menores que 3/10 dos LAMA. O primeiro grupo era denominado de trabalhadores nas condições de trabalho A e o segundo grupo era denominado de trabalhadores nas condições de trabalho B. Para os trabalhadores que recebiam doses acima dos 3/10 dos LAMA, foram realizadas otimizações individuais aplicando técnicas de ajuda para a tomada de decisões [14;15]. Deste modo, as doses foram reduzidas para valores menores que 3/10 dos LAMA e o uso da classificação de trabalhadores passou a ser desnecessário.

A classificação das áreas era realizada para limitar o acesso e simplificar a classificação dos trabalhadores [7], pois as condições de trabalho A eram exigidas apenas em áreas controladas. As áreas restritas eram subdivididas em áreas controladas, quando nelas havia a possibilidade do trabalhador exceder 3/10 dos seus LAMA e em áreas supervisionadas, quando nelas não havia a possibilidade do

trabalhador exceder os 3/10 dos seus LAMA, considerando em ambas a possibilidade de permanência máxima de 2000 h/ano.

Os patamares de referência eram valores recomendados pela CIPR [7] utilizados nos monitoramentos para serem comparados com os valores das grandezas medidas acima dos quais eram tomadas ações para evitar doses de radiação e orientar o curso das ações de radioproteção, porém não eram utilizados como valores de limites rígidos. Eram subdivididos em:

- patamares de registro: 1/10 dos LAMA, na fração de tempo de medida, acima do qual os valores são registrados;
- patamares de investigação: 3/10 dos LAMA, na fração de tempo de medida, acima do qual as atividades são investigadas;
- patamares de intervenção: acima dos valores dos LAMA.

Atualmente, no segundo ciclo de otimizações, para alcançar os valores aceitáveis de dose, a CIPR [16] restringe o controle dos seus limites em intervalos quinquenais, não permitindo que nesse período as doses efetivas dos trabalhadores ultrapassem 100 mSv. Com essa restrição o valor utilizado para o controle anual das doses passa a ser a média anual do limite anual máximo admissível da dose efetiva em cinco anos (20 mSv/ano) e diminui as doses com um sistema que utiliza as três medidas de radioproteção com seus conceitos atualizados:

- monitoramento (de local de trabalho e individual) [17;18];
- classificação de áreas [16 a 19];
- uso dos patamares de referência [16 a 19].

O OIEA também adotou estas recomendações em sua publicação [19].

O presente trabalho utiliza essas medidas para realizar o controle das doses e utiliza também as recomendações da CIPR [16;17] com a finalidade de ter um caráter científico. As recomendações da CIPR, para atingir os valores aceitáveis de dose efetiva anual individual (5 mSv), foram adotadas pelas publicações das SS que orientam o uso do patamar de investigação de 3/10 da média anual do limite anual máximo admissível (6mSv), estabelecido também pela CNEN [20]. Foram

analisadas dissertações que abordaram assuntos similares [21;22], estudos e opiniões de autores sobre o tema apresentados em trabalhos científicos [23] e notas de aula de disciplina de pós-graduação [24].

1.2 Controle de Doses no Centro de Radiofarmácia

Mundialmente tem ocorrido um crescimento do uso da tecnologia nuclear para a melhora da qualidade de vida da humanidade. Desse modo, a produção de fontes de radiação para aplicações dessas tecnologias e o número de trabalhadores submetidos a doses de radiação ionizante, tem aumentado.

Particularmente o Centro de Radiofarmácia, CR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, processa *radiofármacos* e *radioisótopos primários* para pesquisas e, em escala industrial, para a medicina nuclear proporcionar diagnósticos e terapias. Nas duas últimas décadas, até o ano 2000, esse processamento aumentou mais de 30 vezes em *atividade* produzida [23] e atualmente apresenta um crescimento anual de cerca de 10%, em conjunto com um crescimento do número de trabalhadores envolvidos nessa aplicação.

Os *radiofármacos* e os *radioisótopos primários* utilizados durante os processamentos são fontes não-seladas de radiação ionizante, cujas meias-vidas físicas em sua maioria são curtas (menores do que 60 dias), ANEXO A.

Para que as atividades sejam conduzidas de forma segura é necessário obedecer a alguns preceitos de radioproteção [16;19] que são:

- princípio da justificação, que julga e admite a aplicação que apresenta mais benefícios do que detrimientos;
- princípio da otimização, que diminui as doses de radiação tanto quanto racionalmente exeqüível, levando em consideração fatores econômicos e sociais;
- princípio da limitação de dose, que admite o trabalho com radiação desde que se obedecem a valores limites de dose de radiação.

Estes princípios estão contemplados nas normas de radioproteção nacionais [25;26;27] que orientam a elaboração de programas de radioproteção. Esses programas, entre outras finalidades, controlam a dose de radiação ionizante

recebida pelos trabalhadores por meio das três medidas de radioproteção atuais citadas.

A norma experimental de radioproteção nacional utilizada até dezembro de 2004 [25] foi substituída pela norma nuclear [27] para se adequar às regulamentações internacionais [16;19]. Motivado por esse cenário de atualização das normas e baseado em estudos de informações de trabalhos de outros pesquisadores [21;22], pretende-se adequar o controle da dose de radiação ionizante para trabalhadores no CR.

1.3 Finalidade e Objetivos

Neste contexto, o programa de controle com suas adequações que será aplicado no CR contribui para o desenvolvimento das atividades no campo de segurança nuclear para que as tarefas relativas às aplicações de tecnologias nucleares sejam efetuadas de forma segura.

A finalidade do presente trabalho é mostrar como é realizado o controle das doses de radiação seguindo estes novos conceitos para trabalhadores, em uma instalação radiativa que processa fontes não-seladas, aplicando as medidas de radioproteção citadas.

Os objetivos para atingir essa finalidade são:

- Implementar a técnica de monitoramento da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR [17];
- Apresentar os valores das doses de radiação nos locais de trabalho do CR com essa técnica;
- Apresentar os valores das doses efetivas individuais recebidas pelos trabalhadores em 2003, 2004 e 2005;
- Comparar as doses efetivas anuais individuais recebidas pelos trabalhadores com os valores regulamentados pelas normas atuais [27];
- Verificar os trabalhadores que necessitam ter as suas doses diminuídas para alcançarem os 3/10 dos LAMA, média anual sobre cinco anos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Monitoramento Radiológico [16 a 19]

O monitoramento é um acompanhamento realizado através de observações de parâmetros. Ele é uma técnica de radioproteção que avalia o controle das exposições às radiações ionizantes e que deve ser obtido de modo eficaz e econômico. No campo da radioproteção esse termo exprime a medição de grandezas e de parâmetros para fins de controle ou de avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados [27]. As funções de um programa de monitoramento são divididas em:

- a) Monitoramento relacionado com a tarefa, aplicado a uma tarefa específica. Fornece dados para auxiliar na tomada de decisão imediata para dar prosseguimento à tarefa em execução. Também pode auxiliar na otimização da proteção;
- b) Monitoramento de rotina, associado com as operações contínuas, é idealizado para demonstrar que as condições de trabalho, incluindo os valores de doses individuais, permanecem satisfatórias, e para atender às exigências regulatórias. Portanto, ele é em grande parte de natureza confirmatória, pois confirma se o programa de monitoramento relacionado com a tarefa, em sua totalidade, é satisfatório.
- c) Monitoramento especial, de natureza investigatória, tipicamente envolve uma situação, no local de trabalho, onde as informações são insuficientes para demonstrar um controle adequado. É idealizado para fornecer informações detalhadas de modo que possa elucidar qualquer problema e definir procedimentos futuros.

O nome monitoramento especial é o sugerido pela CIPR [17] e pelo OIEA [18], mas a nosso ver o termo “especial” não tem nenhum significado relacionado com a função. Neste caso o nome preferível seria monitoramento interventor, pois intervém para elucidar problemas como consta da própria definição e após resolvidos os problemas ele é eliminado.

A cada tipo de monitoramento, tanto do local de trabalho como individual aplicam-se estas três funções.

2.2 Classificação de Áreas

A classificação das áreas é um dos itens exigidos pela norma nacional [26], entre a avaliação, o controle de acesso, o balizamento, a sinalização, o monitoramento e a descontaminação de áreas, que em conjunto as controlam.

Para fins de gerenciamento da radioproteção, os *titulares* devem classificar as áreas de trabalho com exposição à radiação ou material radioativo em áreas controladas; áreas supervisionadas ou *áreas livres*, conforme as normas em vigência [27].

Uma área deve ser classificada como área controlada quando for necessária a adoção de medidas específicas de *proteção* e *segurança* para garantir que as exposições laborais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das *exposições potenciais*. As áreas controladas devem estar sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, acompanham um texto que descreve o tipo de material, equipamento ou uso relacionado à radiação ionizante. Uma área controlada, portanto, é aquela na qual, em condições normais de trabalho, incluindo a possível ocorrência de percalços menores, se exige dos trabalhadores que sigam procedimentos muito bem estabelecidos, elaborados especificamente com o propósito de controlar as exposições à radiação.

Uma área deve ser classificada como área supervisionada quando, ainda que não requeira a adoção de medidas específicas de *proteção* e *segurança*, as reavaliações regulares das condições de exposições laborais devem ser feitas, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada. As áreas supervisionadas devem ser indicadas como tal, em seus acessos [17;19]. Uma área supervisionada, portanto, é aquela em que as condições de trabalho são mantidas sob supervisão, porém, normalmente não são necessários procedimentos especiais de radioproteção. As definições das áreas estão baseadas na experiência e em julgamentos operacionais [16].

2.3 Patamares de Referência [16 a 19]

Patamar de referência¹ é um valor pré-determinado para qualquer grandeza física usada nos programas de radioproteção que, se for ultrapassado ou existir o potencial de ser, deverão iniciar tomadas de ações previamente definidas. São utilizados três patamares:

- patamar de registro: quando o valor é excedido, o resultado é registrado, enquanto que valores inferiores a este patamar são considerados nulos;
- patamar de investigação: quando o valor é excedido, a causa ou as implicações dos resultados são examinadas e a proteção deve ser melhorada;
- patamar de intervenção: quando o valor é excedido, a tarefa é interrompida até que a causa ou as implicações da anormalidade sejam corrigidas, para o retorno à normalidade.

No local de trabalho, o patamar de registro é utilizado para registrar a medida de pontos que podem resultar em doses efetivas anuais a partir de 2 mSv nos trabalhadores. Os patamares de investigação podem ser fixados em valores convenientes para a ação da proteção radiológica e os patamares de intervenção geralmente utilizam os valores dos LAMA.

No monitoramento individual o patamar de investigação é utilizado para a investigação dos trabalhadores que recebem doses efetivas anuais acima de 6 mSv para o OIEA e a CIPR fixa o patamar de registro em 5 mSv ao ano para a dose efetiva. O patamar de intervenção continua fixo nos valores dos LAMA.

2.4 Limites Anuais [16;19;27]

Os limites anuais de dose de radiação atuais recomendados pela ICRP [16], TABELA 2.1, pelo OIEA [19] e pela CNEN [27] se aplicam à soma das doses efetivas pertinentes, causadas por exposição externa no período

¹ O termo “nível de referência” é utilizado nas normas nacionais em lugar do termo “patamar de referência”.

especificado e das *doses comprometidas* efetivas pertinentes causadas por incorporações no mesmo período. O período para calcular a *dose comprometida* deverá ser normalmente de 50 anos, se tratar de incorporações por adultos e de até 70 anos se tratar de incorporações por crianças.

TABELA 2.1 - Limites de dose recomendados

Aplicação	Limite de Dose	
	Trabalhadores	Indivíduos do público (refere-se ao grupo crítico)
Dose Efetiva	20 mSv por ano, com a média definida em um período de 5 anos ⁽¹⁾	1 mSv por ano ⁽²⁾
Dose equivalente anual em		
Cristalino dos olhos	150 mSv	15 mSv
Pele ⁽³⁾	500 mSv	50 mSv
Mãos e pés	500 mSv	-

(1) A dose efetiva não deve exceder 50 mSv em um único ano com restrição à exposição laboral de mulheres grávidas, que a partir de constatada a gravidez não devem receber mais do que 1 mSv na região do abdômen.

(2) Em circunstâncias especiais, um valor mais alto da dose efetiva de até 5 mSv [19] em um único ano poderá ser permitido, desde que a média em 5 anos sucessivos não exceda 1 mSv por ano.

(3) A limitação da dose efetiva providencia proteção suficiente para os efeitos estocásticos. Um limite adicional é necessário para exposições localizadas da pele e para o cristalino dos olhos para prevenir efeitos determinísticos.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Descrição dos Métodos

A metodologia utilizada para a realização do presente trabalho será a aplicação na instalação do CR, durante o período de 2003 a 2005, dos conceitos de controle de dose apresentados pela CIPR em suas publicações [16;17]. A experiência profissional em radioproteção e a convivência na instalação durante esse período contribuíram para essa aplicação.

A seguir são apresentados os itens para a realização deste trabalho:

- descrição da instalação, das tarefas executadas e dos grupos de trabalho;
- apresentação dos pontos de monitoramento dos locais de trabalho nesse período, com seus valores respectivos;
- apresentação dos trabalhadores com monitoramento individual nesse período, com seus valores respectivos;
- uso dos valores de monitoramento do local de trabalho medidos para comparar com os novos conceitos a fim de classificar as áreas e identificar necessidade de otimizações;
- uso dos valores do monitoramento individual medidos para comparar com os atuais patamares de referência e identificar necessidade de otimizações.

Levando a bom termo estes itens, serão atingidos os objetivos, o controle de radioproteção estará demonstrado e a aplicação das medidas estará realizada, conforme a finalidade pretendida. Cada uma das medidas será analisada e, se necessário, modificada para que haja uma adequação do controle da dose às atuais recomendações previstas em norma nacional [27].

Para o controle das doses, é necessário ser realizado um estudo prévio da instalação, das tarefas executadas e dos trabalhadores, além de se conhecer as fontes de radiação existentes, identificadas nos ANEXOS A e B.

3.2 Descrição da Instalação

A instalação do CR abrange dois prédios de trabalho com *radiofármacos* e três construções de apoio, todos com proteção física e uma portaria de acesso, conforme apresentado na FIGURA 3.1.

FIGURA 3.1 - Planta em nível apresentando a disposição dos prédios e das construções de apoio do CR

No interior dos prédios 1 e 2, existem regiões com possibilidade de exposição externa dos trabalhadores, bem como possibilidade de incorporação causada pelos materiais manuseados. Estas regiões estão equipadas com estruturas adequadas às propriedades dos *radiofármacos* manuseados e às suas atividades, descritas no ANEXO B. A necessidade de estruturas, tais como bancadas, *celas*, *capelas* ou *caixa-de-luvas* com sistema de exaustão para gases, depende das quantidades utilizadas. Resumidamente classificam-se em três regiões, a saber:

Região 1: nessa região, existente nos prédios 1 e 2, ilustrada na FIGURA 3.2 e FIGURA 3.3, trabalha-se com *radiofármacos* e *radioisótopos primários* na forma

líquida em volumes pequenos e com *atividades pequenas*, porém existe a possibilidade de exposição externa dos trabalhadores e a possibilidade de incorporação. A região é composta por laboratórios de pesquisas, laboratório químico, laboratório de espectrometria de *radionuclídeos* e laboratório de preparação de insumos para as produções com as estruturas adequadas citadas. Desse modo, o uso de avental e de luvas é suficiente para evitar a possibilidade de contaminação de pele e o uso das estruturas aliadas à obediência às quantidades admitidas são suficientes para evitar a possibilidade de incorporação;

Região 2: nessa região, existente apenas no prédio 1, FIGURA 3.2, trabalha-se com *radiofármacos e radioisótopos primários* na forma líquida com *atividades grandes*, porém contidas dentro das *celas* de processamento ou *embaladas* para transporte. A possibilidade de exposição é exclusivamente externa. A região é composta pelos laboratórios de operação das *celas* de processamento e pelo setor de embalagem. As *celas* são compostas por uma gaiola de lucite estanque para contenção das fontes, envoltas por uma parede de chumbo para minimizar a exposição e operadas com garras para manuseio à distância;

Região 3: nessa região, existente apenas no prédio 1, FIGURA 3.2, trabalha-se com *atividades grandes de radiofármacos e radioisótopos primários* na forma líquida dentro das *celas, capelas e caixas-com-luvas*, porém existe a possibilidade de exposição externa dos trabalhadores e a possibilidade de incorporação por ser uma região contaminada. Conhecida por ala-quente, é subdividida em ala-quente 1, ala-quente 2 e ala-semiquente. Na ala-semiquente, existem o laboratório de recuperação de *alvos* irradiados, o laboratório de descontaminação e as salas para decaimento de rejeitos, insumos, equipamentos e ferramentas contaminadas. As alas-quentes 1 e 2 são de acesso para abastecimento, descarregamento e manutenção das *celas*, onde existe um sistema de trocas de ar que causa depressão em relação ao ambiente externo. As *celas* possuem, além disso, um sistema de trocas de ar análogo ao das alas-quentes que causa uma pressão negativa maior que a pressão negativa existente nas alas-quentes. Com o uso dessas estruturas, o uso de roupas exclusivas, toucas, botas e luvas são suficientes para evitar a possibilidade de exposição externa dos trabalhadores por contaminação de pele e a possibilidade de incorporação. Além disso, exige-se o uso de máscaras com filtros e óculos de proteção nas manutenções internas

das *celas* que exigem estes EPIs, para evitar as possibilidades de exposição citadas.

A instalação possui um sistema de som para comunicação entre os trabalhadores e câmeras de vídeo, instalados na portaria de acesso com repetição das imagens na sala de controle da radioproteção.

O pavimento de interesse do prédio 1 está ilustrado na FIGURA 3.2.

O pavimento de interesse do prédio 2 está ilustrado na FIGURA 3.3.

3.3 Descrição das Tarefas Executadas

Os *radiofármacos* manuseados no CR são resultantes de materiais importados e também da cadeia de produção de *radioisótopos* que se inicia no ciclotron Cyclone 30 e no reator de pesquisas IEA-R1, ambos localizados dentro da área do IPEN. Depois de processados, esses *radiofármacos* poderão ser aplicados aos pacientes, nas clínicas e nos hospitais, respeitando sua posologia. Por possuírem especificidade biológica e se acumularem na região do corpo humano em estudo, poderão ser utilizados como contrastes nos diagnósticos, pois propiciam a detecção da radiação gama pelos tomógrafos e estes fornecem imagens específicas dos exames morfológicos e funcionais. Pela mesma razão poderão ser utilizados em maiores quantidades como medicamentos nas terapias, pois irradiam os locais de tratamento, neste caso os emissores de partículas como radiação beta são mais eficazes.

Os trabalhos são relacionados à pesquisa e à produção dos *radiofármacos*, que por sua vez necessitam de tarefas de apoio como as de radioproteção, as administrativas, as de proteção física, as de limpeza e as de serviços gerais. Todas estas tarefas são realizadas por trabalhadores autorizados e com treinamento específico.

LEGENDAS

Regiões com Possibilidade de Exposição

- Sem Possibilidade
- Região 1: Interna e Externa (Atividades Pequenas)
- Região 2: Externa (Atividades Grandes)
- Região 3: Interna e Externa (Atividades Grandes)

Letras e Símbolos

- A Secretaria
- B Sala de Trabalhadores
- C Sala de Seminários
- D Copa
- E Banheiro Masculino
- F Banheiro Feminino
- G Porta de Acesso aos Laboratórios
- H Laboratório de Preparação de Colunas
- I Laboratório de Preparação de Alvos
- J Laboratório de Espectrometria
- K Laboratório Químico
- L Laboratório de Pesquisas
- L1 Laboratório 1 de Operação de Celas
- L2 Laboratório 2 de Operação de Celas
- L3 Laboratório 3 de Operação de Celas
- L4 Laboratório 4 de Operação de Celas
- L5 Laboratório 5 de Operação de Celas
- L6 Laboratório 6 de Operação de Celas
- L7 Laboratório 7 de Operação de Celas
- L8 Laboratório 8 de Operação de Celas
- M Corredor de Acesso aos Laboratórios
- N Sala de Equipamentos
- O Vestiário Masculino
- P Vestiário Feminino
- Q Almocharifado
- R Ala-semiquente
- S Ala-quente 1
- T Ala-quente 2
- U Laboratório de Descontaminação
- V Laboratório de Recuperação de Alvos Irradiados
- W Sala de Decaimento
- X Sala de Rejeitos
- Y Setor de Embalagem
- Z Sala de Controle da Radioproteção
- Circulação
- Entrada
- Saída

Números

- 1 a 15 : Celas de Processamento
- 16 a 23 : Caixa-com-luvas
- 24 a 30 : Capelas

Nota: Os pontos numerados e suas atividades trabalhadas estão descritos no ANEXO B - APÊNDICE 1

FIGURA 3.2 - Regiões com possibilidade de exposição, no prédio 1 do CR, pavimento térreo

3.3.1 Trabalhos Relacionados com a Pesquisa

Os trabalhos relacionados com a pesquisa são realizados diariamente nos laboratórios de pesquisa da região 1. Eles são constituídos de experimentos com *radiofármacos* inéditos e *radiofármacos* já produzidos na instalação, ambos em pequenas quantidades. Esses trabalhos atendem o desenvolvimento e a demanda da medicina nuclear e propulsionam a realização das produções.

3.3.2 Trabalhos Relacionados com a Produção

Os trabalhos relacionados com a produção necessitam das 3 regiões para serem realizados por completo e são constituídos de atividades em série com frequência diária, semanal ou quinzenal, conforme sua programação. Em geral, cada produção é composta de três fases, a saber: inicial, intermediária e final.

1. Inicial: consiste em receber o *radionuclídeo* em solução ou o *alvo* irradiado a ser processado, desembalá-lo e inseri-lo nas *celas* para processamento, conforme ilustra a FIGURA 3.4.

FIGURA 3.4 - Fase inicial: (a) recebimento; (b) desembalagem; (c) inserção na cela de processamento

2. Intermediária: consiste em processar quimicamente o *radionuclídeo* em solução ou o *alvo* irradiado, coletar amostras para controle de qualidade e fracioná-lo, colocando-o em *colunas* cromatográficas ou em frascos de vidro, dependendo da produção, conforme ilustra a FIGURA 3.5. Em seguida essas *colunas* cromatográficas ou esses frascos de vidro contendo os *radioisótopos primários* ou os *radiofármacos* são inseridos em recipientes de chumbo vazios previamente colocados na *cela* por um cubículo de comunicação com o lado externo, SAS.

FIGURA 3.5 - Fase intermediária. Celas de: (a) processamento; (b) fracionamento

A retirada desses recipientes de chumbo de dentro da *cela* contendo as *colunas* cromatográficas ou os frascos de vidro está descrita na próxima etapa (etapa final).

3. Final: consiste em inserir os recipientes de chumbo vazios citados e retirá-los contendo os frascos ou as *colunas* cromatográficas, de dentro das *celas*, pelo SAS, conforme ilustra a FIGURA 3.6 e colocá-los dentro de recipientes maiores.

FIGURA 3.6 - Fase final: (a) retirada de blindagens com colunas cromatográficas; (b) retirada de blindagens com frascos

Durante a montagem do gerador de ^{99m}Tc , ainda nessa fase final, é realizada a montagem de um sistema mecânico que consiste na inserção de mangueiras e agulhas vazadas na *coluna* cromatográfica que permite ao usuário retirar alíquotas da fonte para aplicar nos pacientes sem destampar nenhum recipiente, o que minimiza a dose de radiação recebida ao aplicar o produto. A montagem desse sistema mecânico é realizada em uma esteira de produção com paredes de chumbo à meia altura, onde são executadas as etapas ilustradas de (a) a (c) na FIGURA 3.7. Após essas etapas, são feitos testes de contaminação nos recipientes maiores, ilustrado no item (d) da mesma figura para serem colocados no SAS da ala-quente 1, interface com o setor de embalagem.

FIGURA 3.7 - Etapas na esteira de produção para montagem do sistema mecânico de retirada da fonte. (a) lavagem, tampa e lacre (b) eluição; (c) secagem; (d) monitoramento de contaminação relacionado com a tarefa

Os recipientes das produções que não necessitam desse sistema mecânico, após conterem os frascos, são tampados e colocados no SAS, ilustrado na FIGURA 3.8.

FIGURA 3.8 - (a) fechamento de recipientes; (b) carregamento do SAS da embalagem

As etapas de expedição, ilustradas na FIGURA 3.9 e comuns a todas as produções, também fazem parte da fase final e são compostas por embalagem final e controle de qualidade. Essas etapas estão descritas a seguir:

- Descarregamento dos recipientes depositados no *SAS* do setor da embalagem e acondicionamento dos mesmos dentro de recipientes plásticos predispostos, utilizados como embalagem final para disposição de transporte.
- Monitoramento desses *embalados* para classificação com a finalidade de transporte e emissão de documentos.
- Colocação de documentos necessários para o destinatário dentro dos *embalados*;
- Fechamento dos *embalados* e colocação dos mesmos em uma esteira suspensa que os transfere até um saguão de acondicionamento provisório;
- Retirada dos *embalados* da esteira suspensa e adequação dos mesmos em baias, nesse saguão, para o posterior carregamento dos veículos transportadores que farão sua distribuição;
- Monitoramento da carga disposta nos veículos para transporte e emissão de seus documentos;
- Controle de documentos necessários para o transporte e para o destinatário, emitidos durante o monitoramento dos *embalados*.
- Análise de amostras das produções para testes de qualidade realizados no prédio 2.

Outros trabalhos relacionados com as produções ou relacionados a ambas, pesquisas e produções, estão ilustrados na FIGURA 3.10, tais como:

- Reciclagens de materiais contaminados a serem reutilizados nas produções, uma vez descontaminados, ou após decaimento do material;
- Transportes de amostras dos processamentos com pequenas quantidades dos *radionuclídeos* para controle de qualidade e pesquisas, entre os prédios 1 e 2;
- Transportes de *alvos* irradiados com grandes quantidades dos *radionuclídeos* para processamento, entre as instalações do IPEN.
- Manutenções preventivas ou corretivas e instalações novas nas três regiões;
- Monitoramento individual durante o trabalho;
- Monitoramento de objetos durante o trabalho;
- Monitoramento de pés e mão após os trabalhos.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

FIGURA 3.9 - Etapa de expedição: (a) descarregamento do SAS do setor de embalagem; (b) monitoramento de *embalados*; (c) colocação de documentos; (d) fechamento de *embalados*; (e) retirada de *embalados* da esteira; (f) monitoramento de veículos; (g) controle de documentos; (h) controle de qualidade

FIGURA 3.10 - Trabalhos relacionados com as pesquisas e com as produções.
 (a) reciclagens; (b) transporte de amostras; (c) transporte de *alvos* irradiados;
 (d) manutenções; (e) monitoramento individual durante o trabalho; (f) monitoramento de
 objetos durante o trabalho; (g) monitoramento de pés-e-mãos após o trabalho

3.3.3 Tarefas de Apoio

As tarefas de radioproteção são realizadas para o controle das doses:

- dos trabalhadores, ilustradas na FIGURA 3.11;

FIGURA 3.11 - Tarefas de radioproteção para o controle das doses dos trabalhadores:
Monitoramento de rotina no local de trabalho: (a) detector fixo e sonda; (b) painel instalado na sala de controle da radioproteção com repetição das leituras dos detectores fixos; (c) gráfico registrado para análise dos valores; (d) detector portátil; **Monitoramento intervisor no local de trabalho:** (e) de valores de radiação; (f) de valores de contaminação de superfície; (g) monitoramento de blindagens de transportes; (h) monitoramento individual de rotina para radiação externa; (i) local para monitoramento de rotina ou intervisor, de incorporação

- dos indivíduos do público e meio-ambiente, ilustradas na FIGURA 3.12.

Para o controle das doses dos trabalhadores, são realizados monitoramentos de rotina e interventores nos locais de trabalho, ambos com caráter preventivo utilizando detectores de radiação e de contaminação beta-gama fixos, móveis e portáteis e são realizados os mesmos monitoramentos nos trabalhadores com caráter confirmatório, utilizando detectores individuais (dosímetros termoluminescentes ou eletrônicos).

Para o controle das doses do público e meio-ambiente, são realizados monitoramentos de embalados, FIGURA 3.9 (b), de veículos transportadores, FIGURA 3.9 (f) e de objetos FIGURA 3.12 (a). Também são realizados controles de gases, efluentes radioativos líquidos e resíduo urbano [28], ilustrados na FIGURA 3.12.

FIGURA 3.12 - Tarefas de radioproteção para o controle das doses do público e meio-ambiente: (a) monitoramento de objetos; (b) bomba coletora de gases da chaminé para análise de filtro; (c) tanque de acondicionamento e tratamento de efluentes radioativos líquidos; (d) controle de resíduo urbano

As tarefas administrativas, de proteção física, de limpeza e de serviços gerais são realizadas para fornecer infra-estrutura básica ao funcionamento da instalação. São realizadas sem o manuseio dos *radiofármacos*, porém os trabalhadores que executam as tarefas administrativas e de proteção física eventualmente acessam a região 2 e os trabalhadores que executam as tarefas de limpeza e de serviços gerais eventualmente acessam as três regiões.

3.4 Descrição dos Grupos de Trabalho

A instalação é freqüentada por grupos de trabalhadores internos descritos a seguir:

Um **grupo de estagiários** que freqüenta esporadicamente a instalação, um **grupo de pesquisadores** que freqüenta diariamente a instalação, como o restante dos grupos de trabalhadores internos. Ambos trabalham com *atividades pequenas* de *radiofármacos* e realizam tarefas relacionadas à pesquisa.

Um **grupo de operadores** que trabalha com *atividades grandes* de *radiofármacos* e um **grupo de controle de qualidade** que trabalha com *atividades pequenas* de *radiofármacos*. Ambos realizam tarefas relacionadas à produção.

Um **grupo de radioproteção** que trabalha tanto na presença de *atividades pequenas* de *radiofármacos* como na presença de *atividades grandes* de *radiofármacos* e realizam tarefas de apoio durante as pesquisas e as produções.

Um **grupo administrativo**, um **grupo de segurança física**, um **grupo de limpeza** e um **grupo de serviços gerais** que não manuseiam *radiofármacos*, porém o primeiro grupo permanece dentro da instalação e pode acessar a região 2, o segundo grupo não permanece dentro da instalação, mas acessa eventualmente a região 2 e os dois últimos grupos permanecem dentro da instalação e acessam as três regiões. Esses grupos realizam tarefas de apoio às pesquisas e às produções.

A instalação recebe outros grupos de trabalhadores tais como grupos de manutenções, grupos de firmas externas e grupos de visitantes que são externos à instalação e com freqüência esporádica.

3.5 Monitoramentos

3.5.1 Pontos de Monitoramento do Local de Trabalho

O monitoramento do local de trabalho foi realizado, conforme a necessidade, para a radiação externa, contaminação de superfície e contaminação do ar, nas três regiões apresentadas na descrição da instalação, seção 3.1.

3.5.1.1 monitoramento relacionado com a tarefa: realizado pelos trabalhadores com uma frequência estabelecida de acordo com as tarefas executadas e com a finalidade de evitar as doses efetivas involuntárias advindas de situações anormais de trabalho.

As três regiões possuem detectores de radiação e de contaminação, ou ambos dispostos de acordo com as necessidades que a região exige, utilizados para esse tipo de monitoramento. A região 1 possui detectores de contaminação portáteis ou móveis próximos às regiões de trabalho e detectores de contaminação móveis ou fixos para o monitoramento de pés-e-mãos na saída dela. A região 2 possui detectores de radiação fixos utilizados pelo monitoramento de rotina, mas que também contribuem para o monitoramento relacionado com a tarefa, pois seus valores são observados pelos trabalhadores durante os trabalhos. A região 3 possui esses detectores de radiação fixos citados, detectores de contaminação portáteis e móveis próximos às regiões de trabalho e detectores de contaminação móveis e fixos de pés-e-mãos e de objetos na saída dela.

3.5.1.2 monitoramento de rotina: realizado pelo grupo de radioproteção com detectores de radiação fixos, ligados permanentemente em posições representativas, que detectam o início de situações anormais e orientam as primeiras medidas para avaliar as doses dos trabalhadores. Realizado também com detectores de radiação portáteis para avaliar as doses efetivas que serão apresentadas pelo monitoramento individual, ou ainda para fiscalizar e auditar o monitoramento relacionado com a tarefa, realizado também com detectores de contaminação móveis.

3.5.1.3 monitoramento interventor: realizado pelo grupo de radioproteção quando ocorre alguma mudança de disposição de equipamentos no laboratório, alteração no trabalho, manutenção ou quando é detectado algum valor de radiação ou contaminação anormal pelos monitoramentos de rotina ou monitoramentos relacionados à tarefa.

3.5.2 Trabalhadores com Monitoramento Individual

A decisão para a implementação do monitoramento individual nos trabalhadores foi baseada em fatores técnicos e exigências administrativas. Os fatores técnicos foram os potenciais de dose ou incorporação esperados em relação aos limites pertinentes, a probabilidade de variações nas doses e incorporações e a complexidade das medidas e dos procedimentos de interpretação [16]. As exigências administrativas foram para garantir o uso correto dos equipamentos de medida e a participação de todos os trabalhadores no programa.

3.5.2.1 monitoramento relacionado com a tarefa

Esse monitoramento é realizado pelo próprio trabalhador. Para o controle de exposição externa dos trabalhadores, é realizado com dosímetros eletrônicos individuais semicondutores do tipo cartão - com alarme visual e sonoro - ou com dosímetros eletrônicos individuais semicondutores do tipo caneta e com detectores para contaminação de pés-e-mãos, todos com leitura direta. Os detectores para contaminação de pés-e-mãos são do tipo fixo ou móvel e estão localizados nas saídas das regiões que apresentam possibilidade de incorporação. Quando são detectadas contaminações, são realizadas as descontaminações e o monitoramento interventor.

3.5.2.2 monitoramento de rotina:

Monitoramento individual para exposição externa e interna dos trabalhadores: os objetivos [17] dos fatores técnicos são:

- a) obter uma avaliação da dose efetiva e, onde for adequada, a dose equivalente em tecidos ou órgãos significativamente expostos, de modo tal que demonstre concordância com as exigências administrativas e regulatórias;
- b) contribuir para o controle de operações e para o projeto de instalações;
- c) no caso de sobre-exposição em acidentes, fornecer informação valiosa para o início e auxílio de qualquer acompanhamento médico e tratamento de saúde apropriado.

Para o potencial de exposição externa dos trabalhadores a CIPR [17] recomenda que o monitoramento individual seja realizado em todas as pessoas que estão expostas laboralmente, a menos que seja evidente que suas doses são pequenas. Frequentemente é conveniente identificar três grupos em relação a cada um dos componentes da exposição:

- a) aqueles para quem o monitoramento individual certamente é necessário;
- b) aqueles para quem o monitoramento individual provavelmente é necessário;
- c) aqueles para quem o monitoramento individual não é necessário.

Quando for necessário estabelecer doses específicas para fazer esse julgamento, a CIPR recomenda que os grupos nos quais a dose efetiva anual de algum indivíduo seja provável exceder a um valor selecionado entre 5 e 10 mSv, certamente deverão ser monitorados e suas doses formalmente estimadas. Grupos em que todos os membros provavelmente irão receber dose efetiva anual menor que 1 mSv não necessitam ser monitorados. O monitoramento do grupo intermediário é desejável, porém pode ser menos formal do que aquele para o grupo mais exposto.

A norma da CNEN [27] recomenda o monitoramento individual a qualquer indivíduo que possa receber exposição laboral sujeita ao controle, sempre que adequada, apropriada e factível. Nos casos não aplicáveis, a avaliação da exposição laboral tomará como base os resultados do monitoramento de área e as informações sobre as atividades do indivíduo na área.

Para estimar a dose efetiva, todos os trabalhadores autorizados que acessam as áreas controladas possuem monitoramento individual confirmatório relativo à exposição externa com dosímetros termoluminescentes individuais posicionados sobre o tórax, com frequência de leitura mensal, realizada pelo laboratório de dosimetria do IPEN. Os trabalhadores que potencialmente recebem

doses efetivas nas mãos utilizam dosímetros termoluminescentes individuais em pulseira. Os trabalhadores que acessam freqüentemente as áreas supervisionadas também possuem dosímetros individuais por exigência administrativa do IPEN. Esses dosímetros são de uso obrigatório, fornecidos no início da jornada para todos trabalhadores sujeitos à exposição externa na portaria da instalação e recolhidos no mesmo local, no término dela.

Para o potencial de incorporação os trabalhadores que acessam as regiões com possibilidade de incorporação, independente das tarefas executadas, participam de um programa de monitoramento de incorporação. Estes monitoramentos são realizados pelo método de bioanálise “in vivo”, nos laboratórios de monitoramento interno do IPEN. Os trabalhadores recém contratados devem se submeter a este monitoramento antes de acessarem pela primeira vez as regiões com possibilidade de incorporação. Para os trabalhadores que executam a tarefa de descarregamento do SAS das *celas* com compostos de ^{131}I , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga e ^{153}Sm , os quais potencialmente contribuem para a incorporação [22], a freqüência do monitoramento de rotina adotada para detecção de incorporação é quinzenal.

Para os trabalhadores que não executam as tarefas que potencialmente contribuem para a incorporação, a freqüência do monitoramento de rotina obedece à legislação específica: semestral para os servidores públicos [29] e anual para os outros trabalhadores [26].

3.6 Uso dos Patamares de Referência

A CIPR [17] utiliza atualmente os mesmos conceitos que utilizava nas definições dos patamares de referência [9] com o objetivo de atingir os valores aceitáveis (5mSv/ano) que obedeciam à publicação 26 da CIPR, porém o controle dos LAMA ficou mais restrito com a publicação 60 da CIPR.

O OIEA utiliza atualmente os conceitos dos patamares de referência em valores de referência menores, pois considera a média qüinqüenal do dobro do limite anual máximo admissível ($2 \times 50 \text{ mSv} / 5 \text{ anos} = 20 \text{ mSv/ano}$) e recomenda diminuir as doses até o patamar de investigação (6 mSv/ano). A CNEN [20] adotou os valores recomendados pelo OIEA.

3.7 Classificação das Áreas

A classificação dos locais de trabalho em áreas controladas e áreas supervisionadas, cujas definições foram apresentadas no item 2.2, tornam o controle da exposição laboral mais eficaz, pois além de exigir procedimentos específicos, permite diferenciar os trabalhadores que possuem autorização para acesso. As definições da classificação consideram os valores obtidos do monitoramento do local de trabalho, o potencial de exposição externa e de incorporação dos trabalhadores e a probabilidade de transferência da contaminação para fora dessas regiões. O controle da exposição laboral é auxiliado pelo controle de acesso dos trabalhadores que por sua vez é realizado mediante autorização registrada, catracas de acesso físico que registram nomes e horários de passagem e câmeras filmadoras que identificam atividades, locais de passagem e de permanência através de suas imagens. A classificação das áreas e essas informações agrupadas auxiliam, portanto o monitoramento radiológico e o controle da exposição laboral.

4 RESULTADOS

4.1 Monitoramento do Local de Trabalho

A leitura dos detectores de radiação identifica e quantifica a radiação no ambiente de trabalho.

A leitura dos detectores de contaminação em superfícies, em objetos (panos, luvas, sapatos e *papel esfregado*) e em equipamentos (ferramentas e máquinas) contaminados identifica e quantifica a soma da contaminação fixa com a transferível. Para avaliar a transferência da contaminação são consideradas a capacidade de remoção e a porcentagem removida em testes de transferência e os valores obtidos comparados com os limites derivados para contaminação de superfície apresentados pela norma [25].

O monitoramento da contaminação de ar é realizado apenas em monitoramentos interventores, pois normalmente é substituído pelas informações do monitoramento de exposição externa e do monitoramento de contaminação de superfície.

4.1.1 Monitoramento relacionado com a tarefa

Nesse monitoramento não são necessários os registros de valores para análise, apenas devem ser observadas variações nos campos de radiação para detectar desvios de procedimentos. Os trabalhadores utilizam detectores de contaminação antes, durante ou após suas tarefas. Estes detectores ficam ligados permanentemente para monitorarem o que o trabalhador julgar necessário nas regiões com possibilidade de incorporação: luvas, equipamentos de proteção individual, objetos e o próprio laboratório. Os objetos que saem dessa região são monitorados individualmente. Qualquer medição que indique uma variação acima da radiação de fundo, RF, é avaliada. Se ocorrer alguma contaminação anormal, o trabalhador toma as medidas iniciais de proteção e comunica o fato ao grupo de radioproteção que providencia o monitoramento interventor. Desse modo, não permanece contaminação anormal nos ambientes de trabalho após o término das tarefas.

4.1.2 Monitoramento de rotina

4.1.2.1 região 1

- a) radiação externa: os pontos escolhidos estão identificados na FIGURA 4.1 pelos números de 1 a 57, representam a posição ocupada pelos trabalhadores na região 1. As medidas nesses pontos foram realizadas com detector de radiação beta-gama portátil, modelo NDG 1000 A, de fabricação da Nortron, número de série 5627, durante o trabalho e fora dele. Os valores das medidas foram tomados de quatro monitoramentos trimestrais realizados durante o ano de 2005 e estão apresentados na TABELA 4.1 (a) e TABELA 4.1 (b). A radiação de fundo, RF, obtida com esse detector foi de $0,5 \mu\text{Sv/h}$.

FIGURA 4.1 - Pontos que representam a posição ocupada pelos trabalhadores na região 1

O monitoramento permanente com detectores de radiação gama fixos não se justifica nessa região, pois as quantidades de *radionuclídeos* manuseadas são pequenas em comparação às quantidades manuseadas nas outras regiões, conforme descritas nos pontos de 31 a 49 do ANEXO B – APÊNDICE 2. As variações nas intensidades dos campos de radiação ao longo do tempo para detectar deterioração das condições do ambiente de trabalho são pequenas e se manifestam de modo lento, de forma que não seriam apreciavelmente detectáveis com esses detectores fixos.

Os pontos 3, 4 e 15, TABELA 4.1 (a), apresentam valores diferentes da RF fora do trabalho por causa da presença de materiais radioativos estocados para uso dentro das *capelas*.

TABELA 4.1 (a) - Valores da radiação externa na região 1 do prédio 1

Local de Trabalho (representa a posição ocupada pelos trabalhadores)		Taxa de Dose ⁽¹⁾ na região do tronco do trabalhador (μSv/h)		
Descrição	Ponto (FIGURA 4.1)	Durante o trabalho	Fora do trabalho	
Laboratório de Preparação de Alvos	Proximidades da porta de acesso	1	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	2	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	3	2,0 ± 0,8	2,0 ± 0,8
	Em frente à <i>capela</i>	4	22,5 ± 12,6	22,5 ± 12,6
	Em frente à bancada	5	RF	RF
Laboratório de Preparação de Colunas	Proximidades da porta de acesso	6	RF	RF
	Em frente à bancada	7	RF	RF
Laboratório de Espectrometria	Proximidades da porta de acesso	8	RF	RF
	Em frente à bancada	9	RF	RF
	Em frente à mesa	10	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	11	RF	RF
Laboratório de Pesquisas	Proximidades da porta de acesso	12	RF	RF
	Em frente à bancada	13	RF	RF
	Em frente à bancada	14	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	15	1,2 ± 0,5	1,2 ± 0,5
	Em frente à <i>capela</i>	16	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	17	RF	RF

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados com o detector portátil modelo NDG 1000 A, de fabricação da Nortron, número de série 5627.

RF = 0,5 ± 0,1 μSv/h.

As doses provocadas nos pontos que apresentam valores diferentes da RF ocorrem em parte pelos materiais que permanecem no local após o trabalho e em

parte pela presença de rejeitos radioativos nas proximidades, para os pontos 22, 32, 33 e 34, TABELA 4.1 (b), e de materiais radioativos estocados para uso, para os pontos 27 e 51.

TABELA 4.1 (b) - Valores da radiação externa na região 1 do prédio 2

Local de Trabalho (representa a posição ocupada pelos trabalhadores)			Taxa de Dose ⁽¹⁾ na região do tronco do trabalhador (μSv/h)	
Descrição		Ponto (FIGURA 4.1)	Durante o trabalho	Fora do trabalho
Laboratório de Pesquisas	Proximidades da porta de acesso	18	RF	RF
	Em frente à bancada	19	RF	RF
	Em frente à bancada	20	RF	RF
	Em frente à <i>capela</i>	21	RF	RF
Laboratório de Pesquisas	Proximidades da porta de acesso	22	1,5 ± 0,6	1,5 ± 0,6
	Em frente à <i>caixa-de-luvas</i>	23	RF	RF
	Em frente à bancada	24	RF	RF
	Em frente à bancada	25	RF	RF
	Em frente à <i>caixa-de-luvas</i>	26	RF	RF
	Em frente à <i>caixa-de-luvas</i>	27	3,75 ± 4,19	3,75 ± 4,19
Laboratório de Análise Cromatográfica	Proximidades da porta de acesso	28	RF	RF
	Em frente à mesa	29	RF	RF
	Em frente à bancada	30	RF	RF
	Em frente à bancada	31	RF	RF
Sala de Decaimento	Proximidades da porta de acesso	32	1,5 ± 0,6	1,5 ± 0,6
	Em frente à bancada	33	2,5 ± 1,7	2,5 ± 1,7
	Embaixo da escada	34	210 ± 234	210 ± 234
Sala de Lavagem	Proximidades da porta de acesso	35	RF	RF
	Pia	36	RF	RF
Laboratório de Controle Químico e Radioquímico	Proximidades da porta de acesso	37	RF	RF
	Em frente à bancada	38	RF	RF
	Em frente à mesa	39	RF	RF
	Em frente à bancada	40	RF	RF
Sala de Equipamentos	Proximidades da porta de acesso	41	RF	RF
	Em frente à bancada	42	RF	RF
	Em frente à bancada	43	RF	RF
Laboratório de Controle Radioquímico e Físico-Químico	Proximidades da porta de acesso	44	RF	RF
	Em frente à bancada	45	RF	RF
	Em frente à bancada	46	RF	RF
	Em frente à bancada	47	RF	RF
Sala de Equipamentos	Proximidades da porta de acesso	48	RF	RF
	Em frente à bancada	49	RF	RF
	Em frente à bancada	50	RF	RF
Laboratório de Controle Microbiológico	Proximidades da porta de acesso	51	3,5 ± 1,7	3,5 ± 1,7
	Em frente à bancada	52	RF	RF
	Em frente à mesa	53	RF	RF
Laboratório de Controle Biológico	Proximidades da porta de acesso	54	RF	RF
	Em frente à mesa	55	RF	RF
	Em frente à bancada	56	1,7 ± 0,5	RF
	Em frente à bancada	57	4,2 ± 1,5	RF

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados com o detector portátil modelo NDG 1000 A, de fabricação da Nortron, número de série 5627. RF = $0,5 \pm 0,1 \mu\text{Sv/h}$.

b) contaminação de superfície: os pontos escolhidos estão identificados na FIGURA 4.2 pelos números de 1 a 50, representam mesas, bancadas e pisos com possibilidade de contaminação causada pelos trabalhos na região 1. As medidas nesses pontos foram realizadas com avaliação direta e indireta (da transferência ao *papel esfregado* amostrado) nos pontos escolhidos, medidos com o detector de contaminação portátil, modelo MIP-10, de fabricação da Eurisys Mesures, número de série 7449. Os valores das medidas foram tomados de quatro monitoramentos trimestrais realizados às quartas-feiras, após os trabalhos terem sido finalizados, durante o ano de 2005 e estão apresentados na TABELA 4.2 (a) e TABELA 4.2 (b). A radiação de fundo, RF, é de 4 contagens por segundo, cps. Esse monitoramento é complementado com medidas nas paredes, nas maçanetas das portas e nos panos de chão utilizados na limpeza periodicamente sem uma frequência estabelecida ou em razão de algum monitoramento interventor.

FIGURA 4.2 - Pontos com possibilidade de contaminação na região 1

TABELA 4.2 (a) - Valores da contaminação de superfície na região 1 – prédio 1

Local de Trabalho		Ponto (FIGURA 4.2)	Contaminação ⁽¹⁾	
Descrição			Transferível ⁽²⁾	Fixa
Laboratório de Preparação de <i>Alvos</i>	Piso	1	RF	RF
	Bancada	2	RF	RF
	Bancada	3	RF	RF
Laboratório de Preparação de <i>Colunas</i>	Piso	4	RF	RF
	Bancada	5	RF	RF
Laboratório de Espectrometria	Piso	6	RF	RF
	Bancada	7	RF	RF
	Mesa	8	RF	RF
	Bancada	9	RF	RF
Laboratório de Pesquisas	Piso	10	RF	RF
	Bancada	11	RF	RF
	Bancada	12	RF	RF
	Mesa	13	RF	RF

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados às quartas-feiras com o detector modelo MIP-10, de fabricação da Eurisys Mesures, número de série 7449.

⁽²⁾ O método utilizado para avaliar a transferência da contaminação foi o *papel esfregaço*.
RF = $4,0 \pm 0,1$ contagens por segundo.

Na bancada do laboratório de pesquisas do prédio 2, próximo ao ponto 19 da TABELA 4.2 (b), foram encontradas pinças contaminadas e anormalmente fora da *caixa-de-luvas* ou *capelas*.

TABELA 4.2 (b) - Valores da contaminação de superfície na região 1 – prédio 2

Local de Trabalho		Ponto (FIGURA 4.2)	Contaminação ⁽¹⁾	
Descrição			Transferível ⁽²⁾	Fixa
Laboratório de Pesquisas	Piso	14	RF	RF
	Bancada	15	RF	RF
	Bancada	16	RF	RF
Laboratório de Pesquisas	Piso	17	RF	RF
	Bancada	18	RF	RF
	Bancada ⁽³⁾	19	RF	RF
	Bancada	20	RF	RF
Laboratório de Análise Cromatográfica	Piso	21	RF	RF
	Mesa	22	RF	RF
	Bancada	23	RF	RF
	Bancada	24	RF	RF
Sala de Decaimento	Piso	25	RF	RF
	Bancada	26	RF	RF
	Bancada	27	RF	RF
Sala de Lavagem	Piso	28	RF	RF
	Pia	29	RF	RF
Laboratório de Controle Químico e Radioquímico	Piso	30	RF	RF
	Bancada	31	RF	RF
	Mesa	32	RF	RF
	Bancada	33	RF	RF
Sala de Equipamentos	Piso	34	RF	RF
	Bancada	35	RF	RF
	Bancada	36	RF	RF
Laboratório de Controle Radioquímico e Físico-Químico	Piso	37	RF	RF
	Bancada	38	RF	RF
	Bancada	39	RF	RF
	Bancada	40	RF	RF
Sala de Equipamentos	Piso	41	RF	RF
	Bancada	42	RF	RF
	Bancada	43	RF	RF
Laboratório de Controle Microbiológico	Piso	44	RF	RF
	Bancada	45	RF	RF
	Mesa	46	RF	RF
	Bancada	47	RF	RF
Laboratório de Controle Biológico	Piso	48	RF	RF
	Bancada	49	RF	RF
	Bancada	50	RF	RF

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados às quartas-feiras com o detector modelo MIP-10, de fabricação da Eurisys Mesures, número de série 7449.

⁽²⁾ O método utilizado para avaliar a transferência da contaminação foi o *papel esfregaço*

⁽³⁾ Presença anormal de pinças contaminadas fora da *caixa-de-luvas* ou *capelas*

RF = $4,0 \pm 0,1$ contagens por segundo.

4.1.2.2 região 2

a) radiação externa: os pontos escolhidos estão identificados na FIGURA 4.3 pelos números de 1 a 15, representam a posição ocupada pelos trabalhadores nos laboratórios de operação das celas e no setor de embalagem, FIGURA 3.2. As medidas nesses pontos foram realizadas com o detector de radiação gama portátil, modelo 6150 AD 5, de fabricação da Automess, número de série 107189, durante o trabalho e fora dele. Os valores das medidas foram tomados de quatro monitoramentos trimestrais realizados durante o ano de 2005 e estão apresentados na TABELA 4.3. A radiação de fundo, RF, obtida com esse detector foi de $0,5 \mu\text{Sv/h}$.

FIGURA 4.3 - Pontos que representam a posição ocupada pelos trabalhadores nos laboratórios de operação das celas e no setor de embalagem, FIGURA 3.2

TABELA 4.3 - Valores da radiação externa nos laboratórios de operação das celas e no setor de embalagem, FIGURA 4.3

Local de Trabalho (representa a posição ocupada pelos trabalhadores)		Taxa de Dose ⁽¹⁾ na região do tronco do trabalhador (μSv/h)		
Descrição	Ponto (FIGURA 4.3)	Durante o trabalho	Fora do trabalho	
Laboratórios de manipulação das celas	1, em frente ao painel das celas	1	25 ± 13	2,25 ± 1,26
	2, em frente ao painel das celas	2	RF	RF
	3, em frente ao painel das celas	3	1,12 ± 1,25	RF
	4, em frente ao painel das celas	4	RF	RF
	5, em frente ao painel das celas	5	RF	RF
	6, em frente ao painel das celas	6	13,75 ± 11,09	RF
	7, em frente ao painel das celas	7	4,5 ± 1,7	1,12 ± 1,25
	8, em frente ao painel das celas	8	RF	RF
Setor de Embalagem	SAS	9	175 ± 104	RF
	Ajuste de posição do embalado para leitura da taxa de dose - monitoramento	10	17 ± 5	RF
	Colocação de documentos no embalado	11	17 ± 5	RF
	Leitura da taxa de dose - monitoramento	12	3 ± 1	RF
	Fechamento de embalados	13	13,75 ± 11,09	RF
	Retirada de embalados da esteira	14	50 ± 67	RF
	Controle de documentos	15	7 ± 2	RF

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados com o detector portátil modelo 6150 AD 5, de fabricação da Automess, número de série 107189.

RF = 0,50 ± 0,05 μSv/h.

Os laboratórios 1 e 7 apresentam valores diferentes da RF mesmo fora do trabalho por causa da permanência de materiais radioativos estocados dentro das celas que serão utilizados nas próximas produções.

O monitoramento de radiação externa com detectores de radiação gama fixos é realizado com os aparelhos instalados, ilustrados na FIGURA 3.11, nos

ambientes com os pontos representados por IF na FIGURA 4.3. Os valores de taxa de dose foram medidos continuamente e registrados a cada 6 segundos em um microcomputador localizado na sala de equipamentos do prédio 1, indicada na FIGURA 3.2. Diariamente o registro desses valores é impresso, analisado e arquivado pelo grupo de radioproteção. O módulo de alarme sonoro e visual está instalado na sala de controle da radioproteção, indicada na FIGURA 3.2, e também próximo a cada sonda desses detectores. Quando o alarme é acionado, o seu desligamento é possível apenas em um painel central instalado na sala de controle da radioproteção. Essa ação é realizada por um trabalhador do grupo de radioproteção para investigação ou intervenção, dependendo do valor medido em relação ao valor esperado.

As variações da taxa de dose em cada ponto de monitoramento com os detectores fixos ocorrem por causa da presença ou da passagem das fontes (*radionuclídeos*) por esses locais. A relação entre as letras e os números da FIGURA 3.2 permite a identificação dessas fontes nos locais de trabalho. A passagem das fontes pelas *celas* de processamento, descrita no subitem 3.2.2, dura o tempo necessário, na fase intermediária, de menos de 24 horas seguidas por semana. A presença das fontes em alguns locais ocorre por causa da sobra em alguns processos ou por causa da geração de rejeitos.

Os resultados dos registros dos pontos de monitoramento com os detectores fixos representados por IF na FIGURA 4.3 em um mês característico e em 2005 são apresentados nas figuras de 4.4 a 4.13, nas quais a data 3/4/2005 corresponde a um domingo.

Os picos da taxa de dose apresentados na FIGURA 4.4 são semanais por causa da frequência de uso da *cela* e ocorrem por causa da presença de um filtro de retenção instalado sobre a *cela* que acumula ^{131}I por adsorção que causa valores de taxa de dose que decaem com a meia-vida do *radionuclídeo*, 8 dias. No mês de julho, os detectores foram enviados para o laboratório de calibração de instrumentos, LCI, do IPEN, por essa razão os gráficos anuais apresentam valores nulos nesses dias seguidos do mês de julho em que os detectores não estavam presentes. Quando falta a energia elétrica que alimenta o microcomputador, como ocorreu em finais de semana dos meses de junho, julho e agosto, observa-se nos gráficos anuais os valores das últimas leituras mantidos antes desses eventos. Quando falta a energia elétrica que alimenta os detectores, como ocorreu nos meses de janeiro, junho, agosto, outubro, novembro e dezembro, observa-se nos gráficos anuais registros de valores nulos durante esses eventos.

FIGURA 4.4 - Variação da taxa de dose no laboratório 1, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

A variação da taxa de dose apresentada na FIGURA 4.5 (a) praticamente não ocorre, pois a quantidade de material radioativo processado não é suficiente para modificar a RF, porém nos dias 04, 11 e 25 podem ser identificadas pequenas variações por causa dos processamentos de cápsulas de ^{131}I . Os picos apresentados na FIGURA 4.5 (b) ocorreram por causa de maiores quantidades processadas.

(a)

(b)

FIGURA 4.5 - Variação da taxa de dose no laboratório 2, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

A variação da taxa de dose apresentada na FIGURA 4.6 praticamente não ocorre, pois a quantidade de material radioativo processado não é suficiente para modificar a RF, porém, em alguns dias podem ser identificadas pequenas variações por causa da presença, dentro da *cela*, de cápsulas de alumínio irradiadas com materiais para pesquisa e dos processamentos de ^{153}Sm com *atividades* maiores produzidas. No dia 21/04/2005, por causa de um feriado, a demanda da produção de ^{153}Sm foi menor e houve a permanência de material estocado dentro da *cela* de processamento que decaiu com a meia-vida do *radionuclídeo*, 1,95 dias.

(a)

(b)

FIGURA 4.6 - Variação da taxa de dose no laboratório 3, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

As variações da taxa de dose apresentada na FIGURA 4.7 podem ser identificadas por causa dos processamentos, às terças-feiras, do ^{131}I que compõe os *radiofármacos* hippuran, soro albumina humana, lipiodol e metaiodobenzilguanidina, ANEXO B – APÊNDICE 1, porém são pequenas.

(a)

(b)

FIGURA 4.7 - Variação da taxa de dose no laboratório 4, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

A variação da taxa de dose apresentada na FIGURA 4.8 praticamente não ocorre, pois as operações estão suspensas até o reator IEA-R1 aumentar sua potência. Os picos existentes podem ocorrer por causa da radiação proveniente das *celas* do laboratório 2, retirada de rejeitos das *celas* do laboratório 4 e da passagem de fontes pela ala-quente 1, apresentada na FIGURA 3.2.

(a)

(b)

FIGURA 4.8 - Variação da taxa de dose no laboratório 5, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

Os picos da taxa de dose semanais apresentados na FIGURA 4.9 ocorrem durante a passagem de ^{99}Mo pela *cela* de processamento de ^{99}Mo e desaparecem com o término da produção.

(a)

(b)

FIGURA 4.9 - Variação da taxa de dose no laboratório 6, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

Os picos da taxa de dose apresentados na FIGURA 4.10 ocorrem por causa do acúmulo das fontes no SAS do setor de embalagem por alguns instantes durante a etapa final das produções e desaparecem com o fim das atividades.

(a)

(b)

FIGURA 4.10 - Variação da taxa de dose no setor de embalagem, área de monitoramento de embalados, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

Os picos da taxa de dose apresentados na FIGURA 4.11 ocorrem por causa da passagem dos *embalados* nesse ponto durante a etapa final das produções e desaparecem com o fim das atividades.

(a)

(b)

FIGURA 4.11 - Variação da taxa de dose no setor de embalagem, área de fechamento de embalados, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

Os picos da taxa de dose apresentados na FIGURA 4.12 (a) ocorrem por causa da passagem dos *embalados* nesse ponto durante a etapa final das produções e desaparecem com o fim das atividades. Até o mês de abril de 2005 a sonda desse detector estava instalada no mesmo setor de embalagem, porém encostada à parede da sala de decaimento, FIGURA 3.3, que causava taxas de dose impróprias à análise atual, FIGURA 4.12 (b). Por essa razão a sonda foi reinstalada na parede do mesmo setor, porém em um local sem influência da sala de decaimento, FIGURA 4.3.

(a)

(b)

FIGURA 4.12 - Variação da taxa de dose no setor de embalagem, área de acondicionamento de *embalados*, FIGURA 4.3: (a) em um mês característico; (b) em 2005

A variação da taxa de dose apresentada na FIGURA 4.13 (a) praticamente não ocorre, pois a quantidade de material radioativo processado na instalação não é suficiente para modificar a RF neste local.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 4.13 - Variação da taxa de dose no setor de acesso aos laboratórios, FIGURA 3.2: (a) em um mês característico; (b) em 2005; (c) em um semestre

Após o retorno do LCI do IPEN do detector instalado no setor de acesso aos laboratórios, que propiciou a FIGURA 4.13, também do detector da ala-quente 1 instalado próximo à cela de flúor, FIGURA 4.15 e do detector instalado no saguão do porão do prédio 1, FIGURA 4.19; a instalação do cabo que conecta a sonda ao módulo de leitura deles foi mal realizada e causou um ruído eletrônico que transformou a leitura de taxa de dose em valores grandes irreais. Esses valores são observados na FIGURA 4.13 (b), FIGURA 4.15 (b) e FIGURA 4.19(b). Nesses casos, são apresentados nas mesmas FIGURAS os gráficos semestrais para apresentar a variação da taxa de dose em um período longo.

4.1.2.3 região 3

a) radiação externa: os pontos escolhidos estão identificados na FIGURA 4.14 pelos números de 1 a 19 e representam a posição ocupada pelos trabalhadores na ala-quente. As medidas nesses pontos foram realizadas com detector de radiação beta-gama portátil, modelo NDG 1000 A, de fabricação da Nortron, número de série 5627, durante o trabalho e fora dele. Os valores das medidas foram tomados de quatro monitoramentos trimestrais realizados durante o ano de 2005 e estão apresentados na TABELA 4.4. A radiação de fundo, RF, obtida com esse detector foi de $0,5 \mu\text{Sv/h}$.

Os pontos de monitoramento com detectores de radiação gama fixos estão representados por IF na FIGURA 4.14. O monitoramento é realizado da mesma maneira que o monitoramento de rotina com detectores fixos da região 2.

FIGURA 4.14 - Pontos que representam a posição ocupada pelos trabalhadores na ala-quente, FIGURA 3.2

TABELA 4.4 - Valores da radiação externa na ala-quente, FIGURA 4.14

Local de Trabalho (representa a posição ocupada pelos trabalhadores)		Taxa de Dose ⁽¹⁾ na região do tronco do trabalhador (μSv/h)	
Descrição	Ponto (FIGURA 4.14)	Durante o trabalho	Fora do trabalho
SAS da <i>cela</i> de ^{18}F	1	27,5 ± 12,6	7 ± 9
SAS da <i>cela</i> de MIBG – ^{131}I	2	75 ± 29	14,2 ± 23,9
SAS da <i>cela</i> de ^{153}Sm	3	15 ± 6	7 ± 9
SAS da <i>cela</i> de cápsulas de ^{131}I	4	150 ± 58	3,5 ± 1,7
SAS da <i>cela</i> de gerador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$	5	42 ± 15	1,37 ± 0,75
SAS da <i>cela</i> de gerador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$	6	40 ± 11	1,1 ± 0,6
Ala-quente 1	Esteira	55 ± 31	0,62 ± 0,25
	Esteira	42 ± 25	RF
	Esteira	30 ± 22	RF
	Esteira	47,5 ± 26	RF
	Esteira	42 ± 17	RF
	Esteira	37,5 ± 12,6	RF
	SAS do setor de embalagem	175 ± 104	RF
	SAS da <i>cela</i> de ^{131}I	175 ± 96	0,62 ± 0,25
Ala-semiquente	Porta de entrada de material radioativo, saída de objetos e equipamentos	50 ± 38	RF
	Laboratório de recuperação de alvos irradiados	22,5 ± 12,6	12 ± 5
	Laboratório de descontaminação	2,4 ± 1,9	1,5 ± 1
Ala-quente 2	SAS das <i>celas</i> e <i>caixas-com-luvas</i> (próximo à <i>cela</i> de ^{67}Ga e de ^{201}Tl)	35 ± 17	4 ± 1
	SAS das <i>celas</i> e <i>caixas-com-luvas</i> (próximo às <i>caixas-com-luvas</i> de ^{32}P , ^{35}S e de ^{51}Cr)	6 ± 5	6 ± 5

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados com o detector modelo NDG 1000 A, de fabricação da Nortron, número de série 5627. RF = 0,5 ± 0,1 μSv/h.

Os pontos que apresentaram valores diferentes da RF na ala-quente 1 e na ala-quente 2 apresentam influência da presença de rejeitos radioativos em suas proximidades e na ala-semiquente apresentam influência das salas de decaimento, FIGURA 3.2, e da presença de materiais radioativos estocados para uso (próximo ao ponto 16 da FIGURA 4.14), ou de rejeitos, (próximo ao ponto 17 da FIGURA 4.14).

As figuras de 4.15 a 4.18 apresentam as variações da taxa de dose em um mês característico nos pontos identificados por IF da FIGURA 4.14, exceto na ala-quente 2, descrita no item 3.1, onde apesar de já ter sido instalado o detector fixo durante o período deste trabalho, ainda está em andamento a viabilidade técnica para o registro de seus valores no microcomputador.

As variações da taxa de dose apresentadas na FIGURA 4.15 ocorrem por causa da movimentação dos materiais radioativos existentes no setor.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 4.15 - Variação da taxa de dose na ala-quente 1, próximo à cela de flúor, obtida pelo detector instalado na região 3 da FIGURA 4.14 entre os pontos 8 e 9 da FIGURA 3.2: (a) em um mês característico; (b) em 2005; (c) em um semestre

As variações da taxa de dose apresentadas na FIGURA 4.16 ocorrem por causa da movimentação dos materiais radioativos existentes no setor.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 4.16 - Variação da taxa de dose na porta de acesso da ala-quente 1, FIGURA 3.2, obtida pelo detector instalado na região 3 entre os pontos 10 e 14 da FIGURA 4.14: (a) em um mês característico; (b) em 2005; (c) no primeiro semestre de 2005

Esse detector, apesar de apresentar linearidade em sua calibração, após a data de retorno do Laboratório de Calibração de Instrumentos, LCI do IPEN, foi trocado por outro detector que tem uma sensibilidade maior à radiação, portanto registra valores menores que os valores anteriores.

Os picos da taxa de dose apresentados na FIGURA 4.17 ocorrem por causa da passagem dos *embalados* nesse ponto durante a etapa final das produções e desaparecem com o fim das atividades. Após a segunda quinzena do mês de novembro, este detector foi desligado para manutenção.

(a)

(b)

FIGURA 4.17 - Variação da taxa de dose próximo à esteira de produção, obtida pelo detector instalado entre os pontos 10 e 11 da FIGURA 4.14: (a) em um mês característico; (b) em 2005

As variações da taxa de dose apresentadas na FIGURA 4.18 ocorrem por causa da movimentação dos materiais radioativos existentes no setor.

(a)

(b)

FIGURA 4.18 - Variação da taxa de dose na região de acesso à ala-semiquente, FIGURA 3.2, obtida pelo detector instalado na região 3 entre os pontos 15 e 16 da FIGURA 4.14: (a) em um mês característico; (b) em 2005

A FIGURA 4.19 apresenta as variações da taxa de dose no porão do prédio 1.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 4.19 - Variação da taxa de dose no saguão do porão do prédio 1: (a) em um mês característico; (b) em 2005; (c) em um semestre

As variações da taxa de dose apresentadas na FIGURA 4.19 ocorrem por causa da permanência dos rejeitos radioativos no setor. Os valores observados na FIGURA 4.19 (b) foram explicados após a FIGURA 4.12.

b) contaminação de superfície: os pontos escolhidos estão identificados na FIGURA 4.20 pelos números de 1 a 21 e representam bancadas e pisos próximos ao trabalhador com possibilidade de contaminação transferível durante os trabalhos. As medidas nesses pontos foram realizadas com avaliação indireta (levando-se o *papel esfregação*, amostrado em cerca de 100 cm^2 , à um local com valor de radiação de fundo pequeno, $\simeq 100 \text{ cpm}$), nos pontos escolhidos, tomadas com detector de contaminação móvel, modelo RM 21-1, de fabricação da Eberline, número de série 465. A avaliação da contaminação fixa nesta região é realizada apenas nos monitoramentos especiais, pois, nas atividades normais, esse tipo de contaminação é esperada nessa região, porém a dose causada pela contaminação fixa é muito menor que a dose causada pela radiação externa avaliada com os detectores de radiação portáteis. Os valores estão apresentados na TABELA 4.5 pela média de quatro monitoramentos trimestrais realizados às quintas-feiras, após os trabalhos terem sido finalizados, durante o ano de 2005. A radiação de fundo, RF, é de 100 contagens por minuto. Esse monitoramento é complementado periodicamente sem uma frequência estabelecida ou em razão de algum monitoramento interventor com medidas nas paredes, nas maçanetas das portas, nas solas das botas e nos panos de chão utilizados na limpeza. As medidas da contaminação podem variar apreciavelmente, principalmente para valores pequenos, por causa da variação natural dos procedimentos do trabalhador e das condições de trabalho.

FIGURA 4.20 - Pontos com possibilidade de contaminação na ala-quente

TABELA 4.5 - Valores da contaminação de superfície transferível na ala-quente

Local de Trabalho		Ponto (FIGURA 4.20)	Contaminação ⁽¹⁾	Transferível ⁽²⁾
Descrição			(Contagens por minuto/esfre gaço)	(Bq/cm ²)
Vestiários	Piso na portaria de entrada	1	RF	-
Ala-semiquente	Piso próximo ao banco	2	675 ± 340	4,0 ± 2,4
	Piso próximo à porta automática	3	750 ± 614	4,5 ± 4,3
	Bancada para monitoramento	4	920 ± 466	5,7 ± 3,2
	Bancada para objetos	5	525 ± 320	2,9 ± 2,2
	Piso em frente à porta da ala-quente 1	6	1000 ± 726	6,2 ± 5,0
	Piso em frente à entrada da sala de decaimento	7	1375 ± 1034	8,8 ± 7,2
	Piso do laboratório de descontaminação	8	500 ± 216	2,8 ± 1,5
Ala-quente 1	Piso na entrada	9	525 ± 275	2,9 ± 1,9
	Piso em frente à porta da cela de fracionamento de ¹³¹ I	10	250 ± 58	1,0 ± 0,4
	Piso em frente ao SAS da cela de fracionamento de ¹³¹ I	11	725 ± 550	4,3 ± 3,8
	Piso em frente à porta da cela de ¹³¹ I – via seca	12	600 ± 316	3,5 ± 2,2
	Piso em frente à porta da cela de ¹²³ I	13	1200 ± 356	7,6 ± 2,5
	Piso em frente à porta da cela de cápsula de ¹³¹ I	14	450 ± 300	2,4 ± 2,1
	Piso em frente ao SAS da cela de cápsula de ¹³¹ I	15	500 ± 356	2,8 ± 2,5
	Piso em frente à porta da cela de MIBG - ¹³¹ I	16	275 ± 96	1,2 ± 0,7
	Piso em frente à porta da cela de ¹⁵³ Sm	17	525 ± 320	2,9 ± 2,2
	Piso entre as celas de HIPPURAN - ¹³¹ I e de ¹⁸ F	18	925 ± 780	5,7 ± 5,4
	Piso em frente ao SAS da cela de ⁹⁹ Mo	19	700 ± 200	4,2 ± 1,4
	Piso em frente ao SAS do setor de embalagem	20	675 ± 884	4,0 ± 6,1
	Ala-quente 2	Piso no centro do corredor	21	650 ± 436

⁽¹⁾ Valores obtidos de quatro monitoramentos trimestrais durante o ano de 2005 que foram realizados às quintas-feiras com o detector modelo RM 21-1, de fabricação da Eberline, número de série 465.

⁽²⁾ O método utilizado para avaliar a transferência da contaminação foi o *papel esfregaço* amostrado em cerca de 100 cm². RF = 100 ± 5 contagens por minuto.

Os pontos que apresentaram valores acima da RF tiveram os valores das leituras convertidos para Bq/cm^2 para uma comparação direta com os limites derivados para contaminação de superfície apresentados na TABELA VI da norma CNEN [25], que diz que “em superfícies de áreas restritas; utensílios, equipamentos (incluindo roupas de proteção individual), materiais e artigos dentro de áreas restritas, o limite de contaminação é de 30 Bq/cm^2 para a classe III de *radionuclídeos*, excluindo o interior e conteúdo de *caixas-de-luvas*; *capelas* com exaustão, onde o limite de contaminação é o mínimo razoavelmente exequível”. Para a superfície de áreas livres e roupas individuais o limite de contaminação apresentado na mesma TABELA VI é de 3 Bq/cm^2 para a classe III de *radionuclídeos*.

A classe III de *radionuclídeos* é a mais restritiva entre os *radioisótopos* identificados na instalação, ANEXO A.

Para a conversão dos valores, utilizou-se a equação e as eficiências fornecidas pelo certificado de calibração do detector para os *radionuclídeos* da classe III, que apresenta a atividade superficial, A_s , conforme a seguinte relação:

$$A_s (\text{Bq/cm}^2) = \frac{(C - C_0) (\text{cpm})}{(\epsilon_i \cdot \epsilon_s \cdot W \cdot 60) (\text{cm}^2)}, \text{ onde:}$$

C = Leitura do detector (cpm)

C_0 = Leitura da radiação de fundo (cpm)

ϵ_i = Eficiência do instrumento (0,32)

ϵ_s = Eficiência de emissão da fonte (0,5)

W = Área da sonda (15 cm^2)

60 = Fator de conversão de unidades

Esses limites são utilizados como referência para avaliar a contaminação fixa e transferível. Para o acesso à região 3, é necessário o uso de EPIs como roupas exclusivas individuais, botas, luvas e toucas, pois os valores de contaminação de superfície dentro dessa região são maiores que os valores de contaminação de superfície fora dela e ainda podem ser maiores que os limites apresentados na TABELA VI da norma CNEN [25]. A descontaminação da região após as produções, em razão da grande frequência das mesmas, traria um custo-benefício menor do que o uso desses EPIs.

4.1.3 Monitoramento interventor

O monitoramento interventor foi realizado em eventos que provocaram contaminações de superfície anormais em que foi necessária a intervenção para o posterior retorno às atividades normais. Além disso, monitoramentos interventores são realizados no cotidiano para a autorização de trabalhos em áreas restritas, geralmente para manutenções.

O monitoramento interventor para a contaminação de ar foi realizado no local de presença de grande quantidade de um dos *radionuclídeos* mais radiotóxicos identificados na instalação (^{131}I), ANEXO A, e de possibilidade de incorporação, isto é, na porta do SAS da *cela* de fracionamento do laboratório 1 durante uma produção característica. O resultado da análise do filtro utilizado correspondeu a 11 % do limite para concentração no ar do *radionuclídeo* processado nesse local [25]. Para se avaliar esse resultado deve-se considerar que o operador permanece cerca de 10% de seu tempo semanal nessa tarefa se não revezar com outros trabalhadores, o que corresponderia a uma dose recebida de 1,1% do limite anual máximo admissível.

4.2 Monitoramento Individual dos Trabalhadores

4.2.1 Monitoramento relacionado com a tarefa

Esse monitoramento é realizado pelos trabalhadores. Os valores desse monitoramento não são registrados para os trabalhadores que participam do monitoramento de rotina, apenas são utilizados para familiarização e orientação dos valores das doses. Desse modo, foi realizado na produção de geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, pois essa produção contribui para a atividade de maior valor de dose efetiva coletiva recebida e envolve o maior número de trabalhadores do CR. Os dados foram tomados em produções representativas do ano de 2005, inicialmente com 8 e posteriormente com 7 dosímetros eletrônicos individuais tipo cartão disponíveis, sendo que a sua distribuição foi realizada considerando critérios como as tarefas-chave, a facilidade de entrega dos dosímetros e a ordem de chegada dos trabalhadores. A TABELA 4.6 apresenta o tempo aproximado consumido pelo trabalhador, o número de trabalhadores que realizam as atividades, os pontos de

monitoramento, os valores da taxa de dose medidos com detector portátil, o número de medidas realizadas com os dosímetros eletrônicos e os valores individuais registrados nos dosímetros (do grupo de operadores e do grupo de radioproteção) por produção. As tarefas realizadas pelo grupo de radioproteção estão identificadas com asterisco duplo.

TABELA 4.6 - Valores da dose obtidos com detector portátil e com dosímetro eletrônico individual tipo cartão na produção de geradores de ^{99m}Tc

Tarefas	Tempo aproximado consumido pelo trabalhador (h)	Nº de trabalhadores que realizam as atividades	Ponto de monitoramento	Taxa de dose medida com detector portátil ($\mu\text{Sv/h}$)	Nº de medidas realizadas com os dosímetros eletrônicos	Valor individual registrado nos dosímetros eletrônicos por produção (μSv)
Recebimento, desembalagem e inserção do ^{99}Mo na <i>cela</i> de processamento	0,5	2	15 (FIG. 4.14)	80	1	40
Processamento	2	1	6 (FIG. 4.3)	5	1	10
Fracionamento	4	2	6 (FIG. 4.3)	$13,75 \pm 11,09$ (TAB. 4.3)	6	$40,2 \pm 9,54$
Inserção de <i>castelos</i> vazios na <i>cela</i> e retirada dos mesmos com <i>colunas</i>	4	3	6 (FIG. 4.14)	42 ± 15 (TAB. 4.4)	10	$207,4 \pm 79,8$
Lavagem	4	1	7 (FIG. 4.14)	55 ± 31 (TAB. 4.4)	5	236 ± 121
Tampa	4	1	8 (FIG. 4.14)	42 ± 25 (TAB. 4.4)	5	180 ± 56
Lacre	4	1	9 (FIG. 4.14)	30 ± 22 (TAB. 4.4)	2	117 ± 25
Eluição*	4	1	10 (FIG. 4.14)	47 ± 26 (TAB. 4.4)	7	$226 \pm 162^*$
Secagem	4	1	11 (FIG. 4.14)	42 ± 17 (TAB. 4.4)	1	180
Controle de contaminação e colocação dos recipientes plásticos no SAS do setor de embalagem**	4	1	12 (FIG. 4.14)	$37,5 \pm 12,6$ (TAB. 4.4)	6	169 ± 41
Descarregamento do SAS do setor de embalagem*	3	1	9 (FIG. 4.3)	175 ± 104 (TAB. 4.3)	7	$420 \pm 232^*$
Monitoramento de <i>embalados</i> **	4	1	10 (FIG. 4.3)	17 ± 5 (TAB. 4.3)	1	80
Colocação de documentos dentro dos <i>embalados</i>	4	1	11 (FIG. 4.3)	17 ± 5 (TAB. 4.3)	4	69 ± 18
Fechamento de <i>embalados</i> *	4	1	13 (FIG. 4.3)	$13,75 \pm 11,09$ (TAB. 4.3)	6	$49 \pm 37^*$
Retirada de <i>embalados</i> da esteira	4	2	14 (FIG. 4.3)	50 ± 67 (TAB. 4.3)	7	215 ± 86
Monitoramento de veículos**	0,25	1	-	150	1	36
Controle de documentos	4	3	15 (FIG. 4.3)	7 ± 2 (TAB. 4.3)	5	18 ± 7
SOMATÓRIA GERAL	-	24	-	-	-	3039

* tarefas que possuem uma grande variação entre os valores mínimos e máximos, identificando a destreza dos trabalhadores.

** tarefas realizadas pelo grupo de radioproteção.

CONTINUA

TABELA 4.6 - Continuação

Tarefas	Tempo aproximado consumido pelo trabalhador (h)	Nº de trabalhadores que realizam as atividades	Ponto de monitoramento	Taxa de dose medida com detector portátil ($\mu\text{Sv/h}$)	Nº de medidas realizadas com os dosímetros eletrônicos	Valor individual registrado nos dosímetros eletrônicos por produção (μSv)
SOMATÓRIA Operadores	-	21	-	-	-	2754
SOMATÓRIA Radioproteção	-	3	-	-	-	285
SOMATÓRIA GERAL	-	24	-	-	-	3039

4.2.2 Monitoramento de rotina

4.2.2.1 potencial de exposição externa

O laboratório de dosimetria externa do IPEN fornece mensalmente os valores das leituras dos dosímetros termoluminescentes em unidade de doses efetivas individuais (mSv), pois subtrai a radiação de fundo registrada em um dosímetro de controle, localizado na portaria de entrada da instalação e, através de um modelo [30], converte a dose absorvida em dose efetiva. O patamar de registro (nível de registro, NR) adotado pelo laboratório é de 0,2 mSv/mês. Quando as doses efetivas correspondem a valores inferiores a este patamar, são simbolizadas por “< NR”.

As doses efetivas anuais individuais recebidas pelos trabalhadores que utilizaram dosímetros termoluminescentes individuais estão apresentadas pelas atividades realizadas na instalação nas figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 com os valores decrescentes em 2005.

As doses efetivas coletivas anuais recebidas pelos trabalhadores que utilizaram dosímetros termoluminescentes individuais estão apresentadas, pelos grupos que realizam essas atividades, nas tabelas 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

a) Trabalhos relacionados à pesquisa:

FIGURA 4.21 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de estagiários (Es)

Quando o trabalhador ingressa no monitoramento individual rotineiro, após o início do período de controle (anual), ou quando tem seu dosímetro cancelado em menos de 12 meses de uso seguidos, portanto não participa do monitoramento individual rotineiro todos os meses do ano, o valor anual (soma de 12 meses) é menor do que 2,4 mSv, se em cada mês o valor obtido do laboratório de dosimetria externa do IPEN for menor do que 0,2 mSv. Este caso ocorreu no período do presente trabalho com alguns trabalhadores do grupo de estagiários e ocorreria com todos os trabalhadores por causa de férias se os dosímetros fossem cancelados nesse período.

Quando um dosímetro é utilizado por mais de um mês seguido esse valor é dividido pelo número de meses que foi utilizado o dosímetro e seu resultado atribuído a cada mês. Desse modo o valor anual (soma de 12 meses) da dose efetiva de alguns trabalhadores em 2004 e 2005 é menor do que 2,4 mSv, pois o valor de sua leitura recebido do laboratório de dosimetria externa do IPEN foi inferior ao patamar de registro mensal (0,2 mSv/mês) mesmo com o dosímetro utilizado por mais de um mês seguido.

Em 2004, os dosímetros de julho continuaram em uso em agosto e os dosímetros de outubro continuaram em uso em novembro por todos os

trabalhadores por necessidade do laboratório de dosimetria externa do IPEN. Foram realizadas 2 leituras bimestrais e 8 leituras mensais naquele ano, totalizando 10 leituras. Em 2005 ocorreu o mesmo nos bimestres de abril/maio, junho/julho e agosto/setembro. Foram realizadas 3 leituras bimestrais e 6 leituras mensais em 2005, totalizando 9 leituras. Alguns trabalhadores receberam, portanto doses efetivas anuais menores do que 1,8 mSv (9 x 0,2 mSv) em 2005 e menores do que 2,0 mSv (10 x 0,2 mSv) em 2004, obtidas com essa frequência de leitura, mas podem ter sido menores ainda, pois no período de férias os dosímetros permanecem na portaria, sem uso.

FIGURA 4.22 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de pesquisadores (Pe)

TABELA 4.7 - Dose efetiva coletiva anual recebida pelos trabalhadores do grupo de estagiários e do grupo de pesquisadores

Grupo	Ano	n*	$\sum E$	E média
Estagiários	2003	10	18,73	1,87
	2004	18	33,20	1,84
	2005	27	33,30	1,23
Pesquisadores	2003	9	20,50	2,28
	2004	9	18,27	2,03
	2005	9	17,04	1,89

* número de trabalhadores

b) Trabalhos relacionados à produção:

FIGURA 4.23 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de operadores (Op)

Os operadores que possuem dosímetros termoluminescentes de pulso e os valores de suas doses equivalentes anuais individuais de extremidade registrados estão apresentados na FIGURA 4.24.

FIGURA 4.24 - Doses efetivas anuais individuais recebidas nas mãos pelos trabalhadores do grupo de operadores (Op)

Do grupo de operadores que possuem o dosímetro de pulso, o operador 17, FIGURAS 4.23 e 4.24, é considerado mais representativo, pois realizou semanalmente, de 2003 a 2005, um maior número de vezes, tarefas repetidas por causa de sua especialidade na esteira de produção, FIGURA 3.7 (b), local onde mais difere o campo de radiação com a distância e utilizou assiduamente o dosímetro de pulso em conjunto com o dosímetro de tórax. Os outros trabalhadores desse grupo realizam mais revezamentos e executam outras tarefas fora da esteira de produção onde o campo de radiação difere menos no espaço por serem realizados à distância e/ou atrás de blindagens. Além disso, utilizaram assiduamente apenas o dosímetro de tórax, pois os dosímetros de pulso foram encontrados, algumas vezes, com as pulseiras quebradas e permaneceram nos bolsos de suas vestimentas.

FIGURA 4.25 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de controle de qualidade (Cq).

TABELA 4.8 - Dose efetiva coletiva anual recebida pelos trabalhadores do grupo de operadores e do grupo de controle de qualidade

Grupo	Ano	n*	$\sum E$	$E_{\text{média}}$
Operadores	2003	42	236,84	5,64
	2004	43	292,93	6,81
	2005	44	283,54	6,44
Controle de Qualidade	2003	21	52,01	2,48
	2004	22	53,01	2,41
	2005	23	39,87	1,73

* número de trabalhadores

c) Tarefas de Apoio:

FIGURA 4.26 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de radioproteção (Pr)

TABELA 4.9 - Dose efetiva coletiva anual recebida pelos trabalhadores do grupo de radioproteção

Grupo	Ano	n*	$\sum E$	$E_{\text{média}}$
Radioproteção	2003	7	24,44	3,49
	2004	7	24,95	3,56
	2005	7	27,65	3,95

* número de trabalhadores

FIGURA 4.27 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo administrativo (Ad)

No grupo administrativo, apenas um trabalhador recebeu 0,65 mSv, no mês de agosto de 2005, por executar excepcionalmente tarefas técnicas no setor de embalagem que causaram 2,25 mSv em sua dose anual ao invés dos 1,80 mSv esperados.

FIGURA 4.28 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de limpeza (Li)

FIGURA 4.29 - Doses efetivas anuais individuais recebidas pelo grupo de serviços gerais (Sg)

TABELA 4.10 - Dose efetiva coletiva anual recebida pelos trabalhadores dos grupos administrativo, de limpeza e de serviços gerais

Grupo	Ano	n*	$\sum E$	E média
Administrativo	2003	1	2,00	2,00
	2004	4	6,80	1,70
	2005	5	5,05	1,01
Limpeza	2003	2	2,20	1,10
	2004	3	5,60	1,87
	2005	3	2,60	0,87
Serviços Gerais	2003	2	3,79	1,89
	2004	2	2,77	1,38
	2005	1	1,00	1,00

* número de trabalhadores

4.2.2.2 potencial de incorporação

Nesses monitoramentos, os resultados fornecidos pelo laboratório de monitoramento interno do IPEN indicam para todos os trabalhadores, nos últimos

três anos, valores menores que o patamar de registro (0,4 mSv/mês para o corpo inteiro e 4 mSv/mês para tireóide), exceto para um trabalhador que, em setembro de 2004, recebeu 5,37 mSv de dose equivalente comprometida na tireóide por causa de um processamento de iodeto de sódio. A exaustão da *cela* de fracionamento estava desligada durante a utilização da porta do SAS naquela produção. Esse fato foi comunicado após a realização do monitoramento de incorporação de rotina que por sua vez foi realizada após findado o referido processamento.

4.2.3 Monitoramento interventor

Esse monitoramento foi realizado para o potencial de incorporação em dois eventos:

1. para um trabalhador do grupo de manutenção, em junho de 2003, que durante uma manutenção realizada dentro da *cela* de fracionamento de ^{131}I deslocou parcialmente a máscara facial. Após a informação desse fato, foi realizado o monitoramento que apresentou o resultado menor que o patamar de registro ¹;
2. para um trabalhador do grupo de operadores, em novembro de 2003, que durante uma manutenção realizada dentro da *cela* de fracionamento de ^{131}I deslocou parcialmente a máscara facial. Após a informação desse fato, foi realizado o monitoramento que apresentou o resultado de 7,41 mSv de dose equivalente comprometida na tireóide para ^{131}I .

¹ A dose comprometida efetiva é determinada somente quando a incorporação apresentar valor maior que o patamar de registro na frequência de medida.

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

5.1 Monitoramento do Local de Trabalho

- Detectores fixos e detectores portáteis:

A obtenção dos valores das doses nos locais de trabalho com os **detectores fixos**, representados por IF na FIGURA 4.3 e na FIGURA 4.14, com função de rotina, permite uma análise adequada sobre as condições de deterioração do local de trabalho. Esse monitoramento é realizado com o auxílio de registros de acesso físico por controles eletrônicos e registros de imagens por câmeras de vídeo e avalia as doses efetivas apresentadas no monitoramento individual em conjunto com os valores das doses obtidas com os **detectores portáteis**, cujos pontos estão representados na FIGURA 4.1, na FIGURA 4.3 e na FIGURA 4.14.

- Frequência e pontos escolhidos:

A maioria das tarefas na instalação não é inédita, é realizada ciclicamente, conforme descritos no item 3.2. Desse modo, para o monitoramento de rotina abranger situações durante as tarefas, e fora delas, pode consumir um tempo proporcional ao ciclo de tarefas.

- a) com os detectores fixos:

Os pontos e a frequência (a cada 6 segundos) estabelecidos para a obtenção dos valores das doses com os detectores fixos, com a finalidade de **detectar o início de situações anormais**, devem ser mantidos, porém a frequência para obtenção dos valores das doses com a finalidade de **avaliação** é suficiente de ser obtida mensalmente durante o trabalho e fora dele, desde que as produções não sejam modificadas. Desse modo, obtém-se os valores mínimos e os valores máximos necessários para a comparação mensal com os valores do monitoramento de rotina individual.

Os laboratórios 7 e 8 ilustrados na FIGURA 4.3 não possuem detectores fixos instalados. Pelo resultado do monitoramento de rotina, realizado com detector portátil nesses locais, TABELA 4.3, pode-se observar que no laboratório 7 os valores da taxa de dose são diferentes da RF mesmo fora do período de trabalho, por influência do laboratório 1, ilustrado na FIGURA 3.2 e do próprio laboratório 7. Nesse caso, sugere-se a instalação de um detector fixo nesse local. No laboratório 8, os valores da taxa de dose equivalem à RF mesmo no período de trabalho, pois as *caixas-de-luvas* com acesso por esse laboratório são blindadas por uma parede de chumbo suficiente para manter essa condição.

b) com os detectores portáteis:

Os pontos escolhidos e a frequência (trimestral), para obtenção dos valores das doses, com detectores portáteis, com a finalidade de avaliação, satisfizeram essa finalidade. A frequência (trimestral) utilizada para obtenção dos valores das doses e para obtenção dos valores de contaminação de superfície (utilizada para detectar desvios de procedimentos) com a finalidade de auditoria, deve ser aumentada nos pontos com valores diferentes da RF e nos pontos com o desvio padrão grande em relação à medida, apresentados nas TABELAS 4.1, 4.3, 4.4 e 4.5, com o objetivo de melhor avaliar o desvio padrão.

A fiscalização audita o monitoramento relacionado com a tarefa realizado pelos trabalhadores. Para os trabalhos de pesquisa com frequência diária, para os trabalhos de produção com frequência semanal e para os trabalhos de produção com frequência quinzenal a auditoria pode ser realizada aleatoriamente ou com uma frequência estabelecida que satisfaça avaliação técnica de radioproteção e administrativa do *titular*.

- Avaliação dos resultados

Os picos apresentados nos gráficos das FIGURA 4.13 (b), FIGURA 4.15 (b) e FIGURA 4.19 (b) não representam taxa de dose e sim ruídos eletrônicos, já que foi constatado o mau contacto de seus cabos de conexão, além do que, pelos valores exacerbatantes, impressionariam os outros gráficos também e aumentariam a dose efetiva individual em 2005 dos trabalhadores do prédio 1.

Os valores obtidos com os detectores de radiação portáteis, considerada sua mobilidade, são próximos aos valores obtidos com os detectores de radiação fixos.

5.2 Monitoramento Individual

5.2.1 Valores da dose obtidos com os dosímetros eletrônicos tipo cartão

Observa-se da TABELA 4.6:

a) valores médios:

O valor da dose individual média em uma produção de geradores de ^{99m}Tc é a dose coletiva média recebida nas produções dividida pelo número de trabalhadores. Para os trabalhadores do grupo de:

- operadores: $\frac{2,754(\text{mSv})}{21(\text{trabalhadores})} \cong 0,13 \text{ mSv/trabalhador}$
- radioproteção: $\frac{0,285(\text{mSv})}{3(\text{trabalhadores})} \cong 0,095 \text{ mSv/trabalhador}$

Considerando 50 produções ao ano e considerando que os valores reais obtidos por alguns dos certificados de calibração desses dosímetros serem, no máximo, maiores em 10% do que os valores registrados nos dosímetros, os valores anuais projetados são:

- operadores: $\frac{0,13 \times 50 \times 10}{9} \cong 7,22 \text{ mSv/ trabalhador}$
- radioproteção: $\frac{0,095 \times 50 \times 10}{9} \cong 5,28 \text{ mSv/trabalhador}$

b) valores máximos e mínimos:

- valor individual na tarefa que apresenta o maior valor registrado no dosímetro eletrônico (descarregamento do SAS do setor de embalagem):

cerca de 21 mSv, que corrigido com o certificado de calibração projeta um valor de 23,3 mSv;

- valor individual na tarefa que apresenta o menor valor registrado no dosímetro eletrônico (processamento): cerca de 0,5 mSv, que corrigido com o certificado de calibração projeta um valor de 0,55 mSv.

Os valores projetados acima são observados se não houver revezamentos pelos operadores entre tarefas que resultam em doses distintas, ainda que haja o revezamento entre as tarefas que resultam doses parecidas.

Grupo de operadores:

O valor individual médio anual recebido na posição dos 21 operadores no monitoramento individual relacionado a essa produção apresentado no item (a) (7,22 mSv/ano) é maior que a dose efetiva individual média anual obtida pelo monitoramento individual de rotina dos 44 operadores em 2005, apresentada na TABELA 4.8 (6,44 mSv/ano), porém são próximos entre si. Essa proximidade é esperada por causa dos dosímetros de cada tipo de monitoramento serem utilizados em situações parecidas. Deve-se considerar que esses 21 operadores apesar de participarem também de outras atividades com radiação, com valores de dose efetiva coletiva menores, revezam suas tarefas com o restante do grupo.

Grupo de radioproteção:

O valor individual médio anual recebido na posição dos 3 trabalhadores do grupo de radioproteção, apresentado no item (a) (5,28 mSv/ano), é maior que a dose efetiva individual média anual obtida pelo monitoramento individual de rotina dos 7 trabalhadores do grupo de radioproteção em 2005, apresentada na TABELA 4.9 (3,95 mSv/ano), porém são próximos entre si. Essa proximidade é esperada por causa dos dosímetros de cada tipo de monitoramento serem utilizados em situações parecidas. Deve-se considerar que esses 3 trabalhadores, apesar de participarem também de outras atividades com radiação, com valores de dose efetiva coletiva menores, revezam suas tarefas com o restante do grupo.

5.2.2 Considerações

Comparação dos valores:

a) monitoramento do local de trabalho e monitoramento individual

O estudo comparativo entre as **doses avaliadas** com os detectores de taxa de dose e as **doses estimadas** com os dosímetros individuais deve ser realizado pelo grupo de radioproteção sempre em períodos curtos e em cada atividade para garantir os princípios apresentados no item 1.2 e a boa proximidade na previsão desses valores.

b) monitoramento individual relacionado com a tarefa e monitoramento individual de rotina

Das 52 semanas (que representam produções de geradores de ^{99m}Tc) de 2005 contabilizaram-se 50 semanas para o cálculo do **valor projetado** da dose efetiva na posição de um mesmo trabalhador que permanecesse na mesma tarefa, porém deveriam ser contabilizadas 46 semanas ($52 - 6$) por causa das férias. Desse modo, 4 semanas a mais foram utilizadas no cálculo da projeção da dose efetiva (que aumentou a projeção anual em $8\% = 50/46$).

Os resultados do monitoramento de rotina obtidos do laboratório de dosimetria do IPEN que fornecem os **valores recebidos** de dose efetiva foram mensais. Das 52 semanas que compuseram o ano de 2005, não foram subtraídas as 6 semanas (3 semanas por semestre) de férias que esses trabalhadores gozam, enquanto os dosímetros termoluminescentes permanecem na portaria. Desse modo, 6 semanas a mais foram contabilizadas no monitoramento de rotina (que deixou de subtrair do resultado anual no mínimo um valor $< \text{NR}$ mensal).

Essas correções realizadas diminuem a diferença entre o valor projetado e o valor recebido, bem como cada um deles.

Para a boa proximidade na previsão desses valores anuais, o controle das doses é realizado mensalmente pelo grupo de radioproteção na instalação com a finalidade de interferir nas atividades, se necessário.

Dosímetro de pulso:

No caso do operador 17, apresentado na FIGURA 4.23 e FIGURA 4.24, pode se observar a diferença significativa (aproximadamente 10 vezes) entre os valores registrados no dosímetro de tórax e no dosímetro de pulso. As tarefas realizadas nos locais próximos à presença das fontes (p.ex. esteiras durante as produções e SAS) causam essas diferenças. Os outros operadores que receberam doses efetivas individuais anuais tanto maiores como menores do que o operador 17 e também possuem os dosímetros de pulso não apresentaram essas diferenças, lembrando que os limites de dose recomendados para mãos e pés é de 500 mSv/ano, TABELA 2.1.

Utilização do dosímetro eletrônico:

a) Para avaliar a dose efetiva externa anual individual recebida pelos operadores e trabalhadores do grupo de radioproteção, em razão da produção de geradores de ^{99m}Tc , priorizou-se o uso dos valores dos dosímetros eletrônicos ao invés dos valores das taxas de doses medidas na posição dos trabalhadores, TABELA 4.6, pois os dosímetros permaneceram no tempo real (durante toda a produção) e na posição real (com cada trabalhador), simulando o espalhamento existente no organismo, ao passo que as taxas de dose estimadas na posição dos trabalhadores são mais suscetíveis às variações de leituras por causa das variações do campo de radiação no tempo e no espaço.

b) Nas tarefas de apoio às produções e às pesquisas, três grupos que freqüentaram esporadicamente a instalação e não participam do monitoramento de rotina da instalação realizaram o monitoramento individual com esses dosímetros eletrônicos e tiveram os valores das medidas registrados por causa das exigências administrativas:

- Grupo de manutenção;
- Grupo de firmas externas e
- Grupo de visitantes.

Esses grupos não manuseiam os *radiofármacos* e os *radioisótopos primários*, porém podem acessar as três regiões da instalação.

Os grupos de manutenção e de firmas externas são considerados trabalhadores e os valores registrados não passam de 1 mSv para cada manutenção na pior situação, quando realizadas dentro das *celas*. São realizadas menos de 20 manutenções por ano em cada *cela* na pior situação e quando são realizadas pelo mesmo trabalhador, suas doses recebidas e registradas no monitoramento relacionado com a tarefa são avaliadas previamente.

O grupo de visitantes é composto de membros do público e os valores registrados não passam de 0,01 mSv por visita para cada indivíduo (1/100 do limite anual máximo admissível para indivíduos do público) e considera-se 1 visita na vida ou no máximo 1 visita ao ano.

Dispensa do uso do dosímetro:

Os trabalhadores que acessam apenas as áreas classificadas como supervisionadas não necessitam normalmente de procedimentos de radioproteção pelos novos conceitos. As doses efetivas individuais recebidas nessas áreas podem ser inferidas baseadas nos resultados do monitoramento de áreas controladas e nas informações sobre as atividades do indivíduo na área que demonstram que as doses nos campos de radiação são inferiores a valores pequenos. (1 mSv/ano).

5.3 Introdução dos Patamares de Referência

5.3.1 Monitoramento do local de trabalho

Em razão do patamar de registro para monitoramento individual não ser maior que 2 mSv ao ano [17], calculado em função do período de monitoramento, o valor mínimo de dose equivalente que justifica o registro da medida de um ponto de monitoramento com detector de radiação beta-gama portátil na posição do trabalhador é de 1 μ Sv/h. Em 2000 horas de trabalho anual esse valor de dose equivalente implicaria em 2 mSv se o indivíduo permanecesse todo o tempo da jornada de trabalho nessa posição.

Em razão da instrução normativa [20] recomendar o valor de 6 mSv por ano como patamar de investigação para o monitoramento individual para dose efetiva, foi adotado o valor medido de 3 μ Sv/h de dose equivalente na posição do trabalhador, se este permanecer por 2000 horas de trabalho por ano nesta posição, para investigação das tarefas. Esses valores também foram utilizados como orientação para classificar as áreas em que predomina a exposição à radiação externa.

5.3.2 Monitoramento individual

Os valores obtidos do monitoramento individual comparados com os atuais patamares de referência orientam a decisão técnica dos trabalhadores que necessitam de monitoramento individual por terem o potencial de receber mais do que 5 mSv/ano, dos trabalhadores que não necessitam por talvez receberem menos do que 1 mSv/ano e do grupo intermediário cujo monitoramento é desejável, porém pode ser menos formal.

Pela norma CNEN-NN-3.01 [27] a dose efetiva anual é de 50 mSv para trabalhadores, porém, neste segundo ciclo de otimizações, apresentado no item 1.1, utiliza-se a dose efetiva média de 20 mSv/ano como patamar de intervenção para dose efetiva anual. O patamar de registro para monitoramento individual mensal deve ser igual ou inferior a 0,20 mSv para dose efetiva [27]. O patamar de investigação para monitoramento individual para dose efetiva deve ser de 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês [20].

Os resultados das doses efetivas anuais individuais recebidas obtidos pelo monitoramento individual de rotina no período deste trabalho permitem classificar os trabalhadores conforme a TABELA 6.1.

TABELA 5.1 Doses efetivas anuais individuais obtidas pelo monitoramento individual de rotina

Tarefas	Grupos	Ano	Número de Trabalhadores (n)	n° de trabalhadores classificados			
				≤ patamar de registro (2 mSv)	entre patamar de registro e ≤ patamar de investigação (2 e 6 mSv)	entre patamar de investigação e ≤ patamar de intervenção (6 e 20 mSv)	> patamar de intervenção (20 mSv)
Pesquisa	Estagiários	2003	10	4	6	0	0
		2004	18	18	0	0	0
		2005	27	27	0	0	0
	Pesquisadores	2003	9	2	7	0	0
		2004	9	6	3	0	0
		2005	9	7	2	0	0
Produção	Operadores	2003	42	1	28	13 ⁽¹⁾	0
		2004	43	6	15	22 ⁽¹⁾	0
		2005	44	11	13	20 ⁽¹⁾	0
	Controle de Qualidade	2003	21	3	18	0	0
		2004	22	15	6	1 ⁽¹⁾	0
		2005	23	20	3	0	0
Apoio	Radioproteção	2003	7	0	7	0	0
		2004	7	0	6	1 ⁽¹⁾	0
		2005	7	0	6	1 ⁽¹⁾	0
	Administrativo	2003	1	1	0	0	0
		2004	4	4	0	0	0
		2005	5	4	1	0	0
	Limpeza	2003	2	2	0	0	0
		2004	3	3	0	0	0
		2005	3	3	0	0	0
	Serviços Gerais	2003	2	1	1	0	0
		2004	2	2	0	0	0
		2005	1	1	0	0	0
TOTAL	-	2003	94	14	67	13 ⁽¹⁾	0
		2004	108	54	30	24 ⁽¹⁾	0
		2005	119	73	25	21 ⁽¹⁾	0

⁽¹⁾ Trabalhadores que necessitam de otimizações.

5.4 Classificação das Áreas

Os locais de trabalho são sinalizados e estão classificados conforme ilustra a FIGURA 4.30, de acordo com valores avaliados que obedecem ao primeiro ciclo de otimizações [25].

Em razão da possibilidade de incorporação e da *exposição potencial* poder ser maior do que 15 mSv/ano (3/10 do limite anual máximo admissível para trabalhadores), a região 3, ilustrada na FIGURA 3.2, bem como o porão do prédio 1 estão classificados atualmente como áreas controladas, FIGURA 4.30. O

acesso a esses locais é realizado por trabalhadores treinados, com autorização registrada do *titular* da instalação, mediante orientações do grupo de radioproteção, uso de EPIs, controle dosimétrico individual e com acompanhamento de responsável pela tarefa quando o trabalhador não pertencer à instalação. Na saída desta região, estão dispostos detectores de contaminação de uso obrigatório.

O corredor de acesso dos trabalhadores à ala-quente 1, ala-quente 2, ala-semiquente e os laboratórios de operação das *celas* de processamento, ilustrados na FIGURA 3.2, ainda que não tenham possibilidade de incorporação, estão classificados atualmente como área supervisionada em conjunto com o laboratório de pesquisas, químico, de espectrometria de *radionuclídeos* e de preparação de *alvos* e de *colunas* (insumos com potencial de contaminação), ilustrados na FIGURA 3.2, que têm possibilidade de incorporação. Nessa área e na área dos laboratórios de pesquisas e de controle de qualidade do prédio 2, que também é classificada como supervisionada, pois o valor da *exposição potencial* pode estar entre 5 mSv/ano e 15 mSv/ano (1/10 e 3/10, respectivamente do limite anual máximo admissível para trabalhadores), o acesso é realizado atualmente mediante autorização com vestimentas adequadas, registro de dados pessoais e controle de tempo de permanência através de porta de proteção física. Nas saídas dessas áreas, ainda que de menor possibilidade de incorporação que a área controlada, estão dispostos detectores de contaminação fixos de uso obrigatório, vide FIGURA 4.1 e FIGURA 4.20. O setor de embalagem está classificado atualmente como área supervisionada. Neste setor existe a possibilidade exclusiva de exposição durante as etapas de expedição das produções, ilustradas na FIGURA 3.9.

FIGURA 5.30 - Classificação dos locais de trabalho do CR conforme a norma CNEN NE-3.01

A classificação das áreas na instalação não está adequada aos conceitos do segundo ciclo de otimizações, pois a partir da publicação das normas atuais [16;19;27], onde há algum equipamento de proteção e recomendações especiais, deve ser classificado como áreas controladas e o restante da instalação deve ser classificado como área supervisionada, conforme ilustrada na FIGURA 4.31.

Desse modo, para satisfazer o presente segundo ciclo de otimizações deve-se utilizar essa medida de radioproteção atualizada para o controle das doses dos trabalhadores.

FIGURA 5.31 - Classificação dos locais de trabalho do CR, conforme a norma CNEN NN-3.01

5.5 Otimização

As *atividades* anuais trabalhadas na instalação de 2003 a 2005 aumentaram em 10% ao ano [23], portanto mais de 20%. A dose efetiva individual média do grupo de operadores aumentou 14% no mesmo período, vide TABELA 4.8, o número de operadores aumentou 5%, vide TABELA 4.8, porém, de 2004 a 2005 a dose efetiva individual média do grupo de operadores diminuiu 5% com o aumento das *atividades* trabalhadas e de menos de 5% do número de operadores. Esses valores médios demonstram um resultado positivo no último ano, porém, apesar disso alguns trabalhadores do grupo de operadores, FIGURA 4.23 e do grupo de radioproteção, FIGURA 4.26 devem ter suas doses diminuídas, pois receberam doses efetivas anuais maiores do que 6 mSv em 2005.

- No **grupo de operadores** alguns trabalhadores receberam doses efetivas anuais maiores que 15 mSv, desobedecendo ao primeiro ciclo de otimizações apresentado no item 1.1 e podem diminuí-las em duas etapas:

Na primeira etapa, para atingirem valores menores que 15 mSv/ano devem otimizar seus procedimentos, revezando as tarefas, trabalhando com destreza (observada na TABELA 4.6 que os identifica com um asterisco) e sincronia para evitar o acúmulo de materiais radioativos nos locais da fase final das produções;

Na segunda etapa, para atingirem valores menores que 6 mSv/ano, serão necessárias otimizações no projeto da instalação, tais como a construção de blindagens no SAS do setor de embalagem, melhorar disposição nas baias de *embalados* no setor de embalagem com construção de blindagens ou um estudo de opções de radioproteção nas tarefas de maior dose. Este estudo será deixado para futuros trabalhos.

- No **grupo de radioproteção** apenas o trabalhador Pr01, FIGURA 4.26, recebeu dose efetiva anual individual maior do que 6 mSv, mas o trabalhador Pr02 recebeu valor maior que 5 mSv, portanto pela dose efetiva coletiva anual média (3,95 mSv) apresentada na TABELA 4.9 ambos devem revezar suas tarefas individuais para obedecerem ao atual ciclo de otimizações.

- Nos **grupos de radioproteção, de pesquisadores, de controle de qualidade e administrativo** alguns trabalhadores receberam doses efetivas individuais entre 2 e 6 mSv. Estes trabalhadores devem ter suas doses registradas. Parece que no futuro necessitarão de otimização até 2 mSv uma vez que serão considerados os limites vinculados em nosso país.

- No **grupo de estagiários** e no **grupo de limpeza**, os trabalhadores receberam em 2005 valores abaixo de 2 mSv. Para esses grupos, para o grupo de serviços gerais e para o grupo administrativo (exceto um trabalhador apresentado na FIGURA 4.27), que receberam em 2005 valores abaixo de 1,8 mSv, pode se realizar um monitoramento interventor individual com duas leituras: uma leitura trimestral e uma leitura semestral subsequente, além do monitoramento de rotina com leitura mensal exigida pelo procedimento

administrativo apresentado no item 3.4.2 para o potencial de exposição externa, com o objetivo de obter a dose efetiva individual trimestral dividida por três e a dose efetiva individual semestral dividida por 6. A finalidade desse monitoramento é avaliar se esses grupos recebem taxa de dose menores do que 1 mSv/ano, pois nesse caso pela CIPR [17] não necessitam de monitoramento como salientamos no item 3.4.2.2.

6 CONCLUSÕES

O controle dos valores da dose de radiação ionizante para trabalhadores foi demonstrado com a utilização dos novos conceitos das medidas de radioproteção.

A técnica do monitoramento da CIPR foi implementada para apresentar os valores de dose de radiação nos locais de trabalho e para apresentar os valores das doses efetivas individuais a fim de compará-las com os valores regulamentados pelas normas atuais e possibilitar a identificação de trabalhadores que necessitam de otimizações.

Como mostrado nas discussões, item 6.5, serão necessárias várias otimizações para os operadores, mas não para os demais.

Para os estagiários, pessoal da limpeza e administrativo seria necessário introduzir um monitoramento trimestral e outro semestral com função interventora para comprovar que suas doses efetivas são inferiores aos limites do público.

Também dever-se-á reclassificar as áreas de trabalho para estar em consonância com as vigentes publicações da CIPR [17].

Os dosímetros de pulso devem possuir condições adequadas de uso para serem utilizados corretamente.

Deve ser instalado um detector de radiação fixo no laboratório 7 conectado ao sistema de tomada de dados existente. O detector instalado na ala-quente 2 também deve ser conectado a esse sistema.

7 FUTUROS TRABALHOS

1. Reclassificar as áreas em obediência às últimas recomendações da CIPR [17];
2. Efetuar um estudo dos locais onde os operadores recebem as maiores doses e montar as opções de radioproteção que poderão diminuí-las;
3. A partir do estudo efetuado no item 2, realizar um estudo de otimização aplicando as técnicas de ajuda para tomada de decisão e determinar a solução analítica;
4. Preparar um dossiê para modificar a resolução administrativa e demonstrar que é desnecessário efetuar monitoramentos individuais para as categorias de trabalhadores (estagiários, administrativo, serviços gerais e limpeza);
5. Efetuar um estudo de melhorias de radioproteção aproveitando a verba economizada com os resultados do trabalho 4;
6. Introduzir as melhorias realizadas nos trabalhos de 1 a 5 no plano de radioproteção a ser submetido à CNEN-Sede por ocasião de sua renovação;
7. Realizar uma análise detalhada da FIGURA 4.23 para os operadores que recebem valores maiores do que 6 mSv/ano;
8. Como foi visto, a exposição potencial é pequena, mas merece um estudo considerando aquelas prováveis, mas que ainda não ocorreram para verificar se necessitam ser introduzidas nas otimizações.

ANEXOS

ANEXO A – Meia-vida física e classificação dos *radionuclídeos* utilizados na instalação

ANEXO B – APÊNDICE 1 - Descrição das estruturas, tarefas, compostos químicos, *radionuclídeos* identificados, atividades máximas e dias da semana trabalhados nos pontos representados na FIG. 3.1.

ANEXO B – APÊNDICE 2 - Descrição das estruturas, tarefas, compostos químicos, *radionuclídeos* identificados, atividades máximas e frequência de trabalho nos pontos representados na FIG. 3.2.

ANEXO A

Meia-vida física e classificação dos *radionuclídeos* utilizados na instalação

Radionuclídeo	Meia-Vida Física [32]	Radiotoxicidade^(*) / Classe [33]	Classe de Radionuclídeos (limites derivados para contaminação de superfície) [25]
²⁰¹ Tl	3,04d	Normal / C	III
¹⁸⁸ Re	16,7h	Normal / C	III
¹⁷⁷ Lu	6,7d	Normal / C	III
¹⁵³ Sm	1,95d	Normal / C	III
¹³¹ I	8d	Grande / B	III
¹²⁵ I	60,1d	Grande / B	IV
¹²³ I	13,2h	Normal / C	IV
¹¹¹ In	2,8d [31]	-	III
^{99m} Tc	6h	Pequena / D	IV
⁹⁹ Mo	2,75d	Normal / C	III
⁹⁰ Y	2,7d [31]	-	III
⁶⁷ Ga	3,26d	Normal / C	IV
⁵¹ Cr	27,7d	Normal / C	V
⁴⁵ Ca	163d	Grande / B	III
³⁵ S	87,5d	Normal / C	IV
³² P	14,3d	Normal / C	III
¹⁸ F	1,83h	Normal / C	III

^(*) Os termos “normal”, “grande” e “pequena” utilizados nesta tabela foram substituídos respectivamente pelos termos “relativa”, “alta” e “baixa” utilizados pela norma [33], pois caracterizam melhor o seu significado.

ANEXO B – APÊNDICE 1

Descrição das estruturas, tarefas, compostos químicos, *radionuclídeos* identificados, atividades máximas e dias da semana trabalhados nos pontos representados na FIG. 3.2.

Ponto	Descrição	Atividade máxima/Dia da semana
1	Cela de fracionamento de iodeto de sódio (^{131}I)	1,48 TBq às sextas-feiras
2	Cela de processamento de iodeto de sódio (^{131}I)	1,78 TBq às quintas-feiras
3	Cela de processamento de iodeto de sódio (^{131}I)	1,78 TBq às quintas-feiras
4	Cela de processamento de iodeto de sódio e metaiodobenzilguanidina, MIBG (^{123}I)	16,65 GBq às terças-feiras
5	Cela de fracionamento de cloreto de tálio importado (^{201}Tl)	33,3 GBq por importação, às segundas-feiras
6	Cela de processamento de cápsulas de iodeto de sódio (^{131}I)	222 GBq às segundas-feiras
7	Cela de processamento de etilenodiaminotetrametileno difosfônico, EDTMP (^{153}Sm)	166,5 GBq às quartas-feiras
8	Cela para abertura de cápsulas de alumínio de samário, cálcio e enxofre (^{153}Sm , ^{45}Ca e ^{35}S)	166,5 GBq às quartas-feiras
9	Cela de processamento de fluordeoxiglicose, FDG (^{18}F)	74 GBq às terças, quartas, quintas e sextas-feiras
10	Cela de processamento de hippuran, HIPP, soro albumina humana, SAH, e lipiodol, LIPI (^{131}I)	1,11 GBq a cada 15 dias, 1,11 GBq por mês e 5,55 GBq a cada 15 dias, respectivamente, todos às terças-feiras
11	Cela de processamento de metaiodobenzilguanidina, MIBG (^{131}I)	37 GBq às terças-feiras
12	Cela de processamento de molibdênio gel (^{99}Mo)	Suspenso até Reator IEA-R1 aumentar sua potência para 4 MW
13	Cela de processamento de tecnécio, gerador ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	32,41 TBq às quintas-feiras
14	Cela de processamento de citrato de gálio (^{67}Ga)	55,5 GBq às sextas-feiras
15	Cela de processamento de cloreto de tálio nacional (^{201}Tl)	37 GBq às segundas-feiras
16	Cela de processamento de sulfato de sódio e ácido sulfúrico (^{35}S)	37 GBq por semestre às terças-feiras
17	Caixa-de-luvas de processamento de ácido fosfórico e fosfato de sódio (^{32}P)	11,1 GBq por quinzena às segundas-feiras
18	Caixa-de-luvas de fracionamento de sulfato de sódio e ácido sulfúrico (^{35}S)	3,7 GBq por semestre às quartas-feiras
19	Caixa-de-luvas de processamento de cromato de sódio (^{51}Cr)	2,22 GBq por quinzena às segundas-feiras
20	Caixa-de-luvas de processamento de cloreto de cromo, ácido etilenodiaminotetraacético, EDTA e soro albumina humana, SAH (^{51}Cr)	2,22 GBq por quinzena às segundas-feiras
21	Caixa-de-luvas de processamento de hidroxapatita (^{153}Sm)	22,2 GBq por mês às quartas-feiras
22	Caixa-de-luvas de pesquisa com trihidrato (azul de metileno) (^{131}I)	1,85 GBq por encomenda
23	Caixa-de-luvas de pesquisa com moléculas marcadas (^{188}Re)	370 MBq por encomenda
24	Capela de recuperação de <i>alvo</i> dissolvido usado na produção de tálio	residual
25	Capela de processamento de cloreto de cálcio (^{45}Ca)	296 MBq por encomenda (anual)
26	Capela de recuperação de <i>alvo</i> dissolvido usado na produção de gálio	1GBq de ^{65}Zn (por semana)
27	Capela de recuperação de <i>alvo</i> dissolvido usado na produção de gálio	1GBq de ^{65}Zn (por semana)
28	Capela de pesquisa com vários compostos ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{99}Mo e ^{188}Re)	1,85 GBq de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 925 MBq de ^{99}Mo , 185 MBq de ^{67}Ga e 3,7 GBq de ^{188}Re por encomenda
29	Capela de pesquisa com vários compostos ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{99}Mo e ^{188}Re)	1,85 GBq de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 925 MBq de ^{99}Mo , 185 MBq de ^{67}Ga e 3,7 GBq de ^{188}Re por encomenda
30	Capela de pesquisa com vários compostos ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{99}Mo e ^{188}Re)	1,85 GBq de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 925 MBq de ^{99}Mo , 185 MBq de ^{67}Ga e 3,7 GBq de ^{188}Re por encomenda

Fonte: Informação verbal dos trabalhadores do CR do IPEN, 2005

ANEXO B – APÊNDICE 2

Descrição das estruturas, tarefas, compostos químicos, *radionuclídeos* identificados, atividades máximas e frequência de trabalho nos pontos representados na FIG. 3.3.

Ponto	Descrição	Atividade máxima/Frequência
31	Capela de pesquisa com pertecnetato de sódio (^{99m}Tc)	370 MBq, semanal
32	Caixa-de-luvas de pesquisa com cloreto de lutécio (^{177}Lu)	3,7 GBq, 15 dias seguidos por mês
33	Caixa-de-luvas de pesquisa com iodeto de sódio (^{131}I)	3,7 GBq, diária
34	Caixa-de-luvas de pesquisa com citrato de gálio (^{67}Ga)	1,48 GBq, diária
35	Bancada de análise cromatográfica com <i>radioisótopos</i> (^{131}I , ^{99m}Tc , ^{67}Ga e ^{177}Lu)	74 MBq de ^{131}I , 37 MBq de ^{67}Ga e 37 MBq de ^{177}Lu , diária
36	Bancada de monitoramento de <i>castelos</i> contaminados (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{18}F e ^{123}I)	37 MBq às segundas-feiras
37	Palate blindado com rejeitos em decaimento	-
38	Pia de lavagem com compostos (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{18}F e ^{123}I)	37 MBq, semanal
39	Bancadas de controle químico e radioquímico com alíquotas dos processamentos com compostos (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{111}In , ^{177}Lu , ^{90}Y , ^{18}F e ^{123}I)	Suspensão em 2005 para obras
40	Caixa-de-luvas de controle de qualidade com compostos (^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{18}F)	1,48 GBq de ^{131}I , 1,48 GBq de ^{201}Tl , 740 MBq de ^{153}Sm , 629 MBq de ^{67}Ga , 37 MBq de ^{51}Cr e 666 MBq de ^{18}F , diária
41	Caixa-de-luvas de controle de qualidade com compostos (^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{18}F)	1,48 GBq de ^{131}I , 1,48 GBq de ^{201}Tl , 740 MBq de ^{153}Sm , 629 MBq de ^{67}Ga , 37 MBq de ^{51}Cr e 666 MBq de ^{18}F , diária
42	Capela e bancada de controle de pertecnetato de sódio (^{99m}Tc)	9,25 GBq, dia sim, dia não.
43	Capela e bancada de controle de pertecnetato de sódio (^{99m}Tc)	9,25 GBq, dia sim, dia não.
44	Capela e bancada de controle químico e radioquímico com alíquotas dos processamentos com compostos (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{111}In , ^{177}Lu , ^{90}Y , ^{18}F e ^{123}I)	1 GBq de ^{131}I , 1,74 GBq de ^{201}Tl , 370 MBq de ^{153}Sm , 555 MBq de ^{67}Ga , 148 MBq de ^{51}Cr , 555 MBq de ^{18}F , 55,5 MBq de ^{99m}Tc e 370 MBq de 1,8 GBq de ^{123}I , ^{111}In , ^{177}Lu , ^{90}Y cada, diária
45	Capela e bancada de controle de pertecnetato de sódio (^{99m}Tc)	55,5 MBq diária
46	Bancada de controle e pesquisa com equipamentos para análise com gamacâmara de compostos com (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{18}F e ^{131}I)	37 MBq, semanal
47	Estufa de armazenamento com os compostos (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{111}In , ^{177}Lu , ^{90}Y , ^{18}F e ^{131}I)	3700 MBq, diária
48	Bancada de controle microbiológico com os compostos (^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{51}Cr , ^{111}In , ^{177}Lu , ^{90}Y , ^{18}F e ^{131}I)	370 MBq, diária
49	Bancada de controle biológico com pertecnetato de sódio (^{99m}Tc)	555 MBq, diária

Fonte: Informação verbal dos trabalhadores do CR do IPEN, 2005

GLOSSÁRIO

Alvo: sólido ou líquido preparado de modo a ser submetido a um bombardeio por um feixe de partículas.

Área livre: qualquer área que não seja classificada como área controlada ou área supervisionada [27].

Atividade: número de desintegrações nucleares que ocorrem em uma amostra, por unidade de tempo.

Atividade grande: quantidade menor que cerca de uma centena em TBq e maior que cerca de uma dezena em GBq, considerando as estruturas de trabalho e limites de incorporações anuais para cada radionuclídeo (*ICRP Publication 61, Annual Limits on intake of Radionuclides by Workers Base on the 1990 Recommendations*).

Atividade pequena: quantidade menor que cerca de uma dezena em GBq, considerando as estruturas de trabalho e limites de incorporações anuais para cada radionuclídeo (*ICRP Publication 61, Annual Limits on intake of Radionuclides by Workers Base on the 1990 Recommendations*).

Caixa-de-luvas: compartimento transparente totalmente estanque com luvas longas instaladas para possibilitar a manipulação interna e com sistema de ventilação controlado por motores e filtros.

Capela: compartimento fechado e envidraçado, nos laboratórios, no qual se realizam as reações químicas que desprendem gases deletérios.

Cela: compartimento paralelepipedal, vedado para contenção das fontes não-seladas (*radiofármacos e radioisótopos primários*), confeccionado com material transparente, geralmente gaiola de lucite, com paredes de chumbo construídas ao seu redor e visores de vidro plumbífero em sua parede dianteira para minimizar a exposição do operador. Na face dianteira, possui garras longas para movimentar seus componentes no interior dela e, na face traseira, possui um sistema de portas para colocar e retirar materiais, denominado de SAS (*Servicement d' Arrivé et Sortie*). Possui um sistema de trocas de ar controlado por um motor e filtros de entrada e de saída para retenção de partículas e gases. O conjunto

contém uma instrumentação (vidraria para laboratório) e é adequado para o trabalho com grandes quantidades dessas fontes não-seladas.

Coluna: tubo de vidro vertical tampado e preenchido com material adsorvedor, onde é realizada uma separação entre elementos químicos. Sua tampa é vazada por dois pequenos tubos finos de aço: um para entrada e outro para saída, onde se coloca um vidro com vácuo para puxar o elemento químico de interesse.

Detrimento: dano total esperado, causado pelo *efeito estocástico*, em um grupo de indivíduos e seus descendentes, como resultado da *exposição* deste grupo à radiação ionizante, determinado pela combinação das probabilidades condicionais de indução de câncer letal, câncer não letal, danos hereditários e redução da expectativa de vida [27].

Dose comprometida: dose equivalente comprometida ou dose comprometida efetiva definida respectivamente pelas expressões:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

onde:

t_0 é o instante em que ocorre a incorporação, $\dot{H}_T(t)$ é a taxa de dose equivalente no instante t em um órgão ou tecido T e τ é o tempo transcorrido desde o início da incorporação das substâncias radioativas até os tempos especificados a seguir:

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

onde:

$H_T(\tau)$ é a dose equivalente comprometida no tecido T ao longo do período de integração τ e w_T é o fator de ponderação para o tecido correspondente ao tecido T .

Quando τ não é especificado considera-se que o seu valor é de 50 anos para os adultos e até a idade de 70 anos para as incorporações em crianças [16;19].

Efeitos determinísticos: efeitos da radiação onde geralmente existe um valor limiar de dose acima do qual a gravidade do efeito aumenta com o aumento da dose [19].

Efeitos estocásticos: efeitos da radiação que são produzidos em geral sem um valor de dose limiar, cuja probabilidade é proporcional à dose e cuja gravidade é independente da dose [19].

Embalado: conjunto formado pela fonte de radiação e embalagem.

Exposição: ato ou condição de estar submetido à radiação ionizante [27].

Exposição potencial: exposição cuja ocorrência não pode ser prevista com certeza, mas que pode resultar de um acidente envolvendo diretamente uma fonte de radiação ou em consequência de um evento ou de uma série de eventos de natureza probabilística [27].

Grupo crítico: grupo de indivíduos do público razoavelmente homogêneo em relação a sua exposição para uma fonte de radiação e uma via de exposição, grupo este característico dos indivíduos que recebem a maior dose efetiva ou dose equivalente, segundo o caso, por essa via de exposição causada pela fonte de radiação [19].

Papel esfregaço: filtro de papel de falso tecido absorvedor esfregado nas superfícies para análise da transferência de contaminação.

Proteção: é definida para situações normais de trabalho, isto é, aquela situação que pode ser racionalmente esperada que ocorra com uma probabilidade igual a 1 ou maior do que 10^{-2} a^{-1} . A situação normal deve obedecer aos limites de dose senão a atividade é proibida pelas autoridades regulatórias [24].

Radiofármaco: radionuclídeos agregados a moléculas em condições de serem aplicados em seres vivos. Podem ser usados como traçadores em diagnoses ou como fontes de energia em terapias.

Radioisótopo: isótopos de elementos químicos que emitem radiação.

Radioisótopo primário: isótopo a ser agregado às moléculas específicas a fim de se tornar um radiofármaco.

Radionuclídeo: núclídeos instáveis dos elementos químicos que para se estabilizarem emitem radiação.

SAS: servicement d'arrivée et sortie, cubículo de passagem entre ambientes.

Segurança: é definida para situações potenciais, isto é, aquela exposição à radiação que, ainda que sem certeza de que ocorra, pode ser prevista como resultado da introdução ou modificação de uma atividade e a qual se pode atribuir uma probabilidade de ocorrência menor do que 10^{-2} a^{-1} . A situação potencial geralmente não respeita os limites de dose anuais [24].

Titular: responsável legal pela instituição, estabelecimento ou instalação para a qual foi outorgada, pela CNEN, uma licença, autorização ou qualquer outro ato administrativo de natureza semelhante [27].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** (Adopted September 9, 1958). Pergamon Press, London, (1959). (ICRP Publication 1).
- [2] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Report of committee II on permissible dose from internal radiation.** (1959). Pergamon Press, London. In press. (ICRP Publication 2).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic safety standards for radiation protection.** IAEA, Vienna, 1962 (Safety Series No. 9).
- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** (Adopted September 17, 1965). Pergamon Press, Oxford, (1966). (ICRP Publication 9).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic safety standards for radiation protection.** IAEA, Vienna, 1967 (Safety Series No. 9).
- [6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implication of commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable.** ICRP, Vienna, 1973 (ICRP Publication 22).
- [7] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** ICRP, Vienna, 1977 (ICRP Publication 26).
- [8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Limits for intakes of radionuclides by workers.** (1978). Pergamon Press, London. (ICRP Publication 30).
- [9] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles of monitoring for radiation protection of workers.** ICRP, Vienna, 1982 (ICRP Publication 35).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic safety standards for radiation protection.** ICRP, Vienna, 1982 (Safety Series No. 9).
- [11] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles of monitoring for radiation protection of workers.** ICRP, Vienna, 1968 (ICRP Publication 12).
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The basic requirements for personnel monitoring.** IAEA, Vienna, 1965 (Safety Series No. 14).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic requirements for personnel monitoring.** IAEA, Vienna, 1980 (Safety Series No. 14).

- [14] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Cost benefit analysis in the optimization of radiation protection**. ICRP, Vienna, 1982 (ICRP Publication 37).
- [15] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and decision-making in radiological protection**. ICRP, Vienna, 1988 (ICRP Publication 55).
- [16] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection**. ICRP, Vienna, 1991 (ICRP Publication 60).
- [17] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Principles for the radiation protection of workers**. ICRP, Vienna, 1997 (ICRP Publication 75).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic principles for occupational radiation monitoring**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No. 84).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources**. IAEA, Vienna, 1996 (Safety Series No. 115).
- [20] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Posição Regulatória 3.01/004**. Disponível em: <http://www.cnem.gov.br/seguranca/normas/pr301_004.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2006.
- [21] RODRIGUES, Demerval Leônidas. **Otimização no controle dos valores de radiação nas dependências do ciclotron de 30 MeV do IPEN**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [22] SANCHES, Matias Puga. **Identificação e análise dos principais radionuclídeos que potencialmente contribuem para a dose interna dos trabalhadores do centro de radiofarmácia**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- [23] GERULIS, Eduardo; DE ALMEIDA, Evandro Alves; SANCHES, Matias Puga. **Proceso de automatización y optimización de la radioprotección en una instalación para producción de radiofármacos**. In: VI CONGRESO REGIONAL SOBRE SEGURIDAD RADIOLOGICA Y NUCLEAR, **Anais**, p. 57, Nov. 9-13, 2003, Lima, Peru, CD-ROM.
- [24] SORDI, Gian-Maria Agostino Ângelo. **Elementos fundamentais de radioproteção**. Disciplina de Pós-graduação, TNA-5732. São Paulo, 2003. Notas de aula.
- [25] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de radioproteção – CNEN-NE-3.01**. Rio de Janeiro: 1988.
- [26] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Serviços de radioproteção – CNEN-NE-3.02**. Rio de Janeiro: 1988.
- [27] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de proteção radiológica – CNEN-NN-3.01**. Rio de Janeiro: 2005.

[28] GERULIS, Eduardo; SORDI, Gian-Maria Agostino Ângelo; DA SILVA, Olavo Pedro; ***Gerenciamento de rejeitos no centro de radiofarmácia do instituto de pesquisas energéticas e nucleares***. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, INAC-2005, VII ENAN, CD-ROOM, E-06-226, Aug. 28 to Sep 2, 2005, Santos, Brazil, (ISBN: 85-99141-01-5).

[29] Artigo 72, LEI Nº 8.112, DE 11 DE DEZEMBRO DE 1990, “Regime Jurídico Único”.

[30] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of radiation protection monitoring instruments***. IAEA, Vienna, 2000 (Safety Report Series No. 16).

[31] SAHA, GOPAL B.. **Fundamentals of Nuclear Pharmacy**. Fourth Edition, New York, 1998 (ISBN 0-387-98341-4).

[32] ***GENERIC PROCEDURES FOR ASSESSMENT AND RESPONSE DURING A RADIOLOGICAL EMERGENCY***. IAEA, VIENNA, 2000. IAEA-TECDOC-1162.

[33] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas – CNEN-NE-6.02**. Rio de Janeiro: 1984.