



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

OTIMIZAÇÃO NO CONTROLE DOS VALORES DE RADIAÇÃO NAS DEPENDÊNCIAS DO CÍCLOTRON DE 30 MeV DO IPEN

DEMerval LEÔNIDAS RODRIGUES

**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 A. Sordi**

**São Paulo
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**OTIMIZAÇÃO NO CONTROLE DOS VALORES DE RADIAÇÃO
NAS DEPENDÊNCIAS DO CÍCLOTRON DE 30 MeV DO IPEN**

DEMerval LEÔNIDAS RODRIGUES



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

Orientador:
Dr. Gian-Maria A. A. Sordi

**SÃO PAULO
2002**

A meus pais e irmãos

A minha esposa Angela, pelo seu amor, dedicação e incentivo

A minhas filhas Lívia e Sofia, que iluminaram de vez a minha vida

AGRADECIMENTOS

Ao amigo Professor Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi, pelo incentivo, confiança e orientação na execução desta Dissertação.

À Professora Dra. Linda V. Caldas, pelas sugestões, ensinamentos, estímulo e amizade demonstrada durante a realização deste trabalho.

Ao Bel. Christovam Romero Romero Filho, pela preparação dos Croquis, pelas fotos, pelo apoio e ajuda no levantamento de dados e pela amizade dedicada durante a realização deste trabalho.

Aos Srs. Amaro S. Sanchez e Celso Augusto Jacomini, pela realização dos monitoramentos de área e pelo levantamento dos resultados da monitoração individual dos trabalhadores envolvidos neste trabalho.

Ao Centro de Aceleradores Cíclotron, em especial, ao Dr. Valdir Sciani pelas informações prestadas.

Ao Serviço de Radioproteção do IPEN e a todos os seus servidores que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

OTIMIZAÇÃO NO CONTROLE DOS VALORES DE RADIAÇÃO NAS DEPENDÊNCIAS DO CÍCLOTRON DE 30 MEV DO IPEN

DEMerval LEÔNIDAS RODRIGUES

RESUMO

A operação do cíclotron de 30 MeV, como qualquer instalação radiativa, deverá estar amparada por um rigoroso programa baseado nos princípios fundamentais de proteção radiológica que possibilite o conhecimento e o controle dos valores de radiação por meio da implementação dos 13 objetivos mencionados no presente trabalho dos quais citar-se-á quatro que são o monitoramento pessoal, a classificação das áreas de trabalho, os valores de referência e a classificação dos trabalhadores. Um dos resultados principais encontrados com esta implementação foi que apenas dois dos doze trabalhadores que executam as tarefas no prédio do cíclotron receberam, nos anos 2000 e 2001, doses superiores aos 3/10 dos limites anuais, mas inferiores aos 4/10 que são os atuais limites internacionais. Os demais trabalhadores receberam doses inferiores a 1/10 dos limites Anuais. Sugere-se Ainda neste trabalho, a realização de um estudo de otimização nas dependências dos alvos e na caverna envolvendo opções de projeto, procedimentos e treinamento a fim de diminuir as doses daqueles trabalhadores.

OPTIMIZATION IN THE CONTROL OF RADIATION LEVELS AT THE IPEN 30 MeV CYCLOTRON FACILITY

DEMerval LEÔNIDAS RODRIGUES

ABSTRACT

The 30 MeV Cyclotron of IPEN, as any nuclear facility, has been supported by a substantial program established on the radiation protection basic principles that allow the knowledge and the control of the radiation levels by the accomplishment of the 13 objectives named in the present work, four of which are mentioned here: personal monitoring, workplace classification, reference levels and individual exposure at working conditions. One of the major results in this radiation protection program implementation was that only two among twelve persons that work in the accelerator building, during 2000 and 2001, received exposures above the 3/10 of the annual limits, but below 4/10 of annual limits that are the international annual limits. The suggestion introduced in this work is performed as an optimization study by applying the ALARA principle at the irradiation target room and the vault cyclotron involving project optimization options, procedure optimization options and personal training, with the aim to decrease the two workers doses.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 O ciclotron e suas aplicações..... | 1 |
| 1.2 Necessidade de proteção radiológica..... | 5 |
| 1.3 Função da proteção radiológica..... | 8 |
| 1.4 Classificação das áreas..... | 12 |
| 1.5 Classificação dosimétrica do trabalhador..... | 14 |
| 1.6 Princípios básicos de proteção radiológica e seu significado..... | 15 |
| 1.7 Valores de referência..... | 18 |
| 1.8 Finalidade e objetivos do presente trabalho..... | 19 |
| 2. CONHECIMENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO NECESSÁRIO AO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO | 23 |
| 2.1 Descrição das dependências do prédio do ciclotron..... | 23 |
| 2.2 Tarefas executadas em cada dependência..... | 26 |
| 2.3 Padrões de proteção radiológica..... | 27 |
| 2.4 Descrição dos tipos e funções do monitoramento..... | 32 |
| 2.5 Descrição dos equipamentos de proteção radiológica utilizados nos vários tipos e funções do monitoramento..... | 42 |
| 2.5.1 Monitoramento do local de trabalho para radiação externa..... | 42 |
| 2.5.2 Monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície | 43 |
| 2.5.3 Monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar..... | 44 |
| 2.5.4 Monitoramento individual para radiação externa..... | 45 |
| 2.5.5 Monitoramento individual para contaminação de pele e roupa..... | 46 |
| 2.5.6 Monitoramento individual para contaminação interna..... | 47 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.6 | Princípios básicos para a seleção dos pontos de monitoramento e do pessoal que necessita de monitoramento individual e determinação de suas frequências..... | 48 |
| 2.6.1 | Monitoramento do local de trabalho para radiação externa..... | 48 |
| 2.6.2 | Monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície..... | 50 |
| 2.6.3 | Monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar..... | 51 |
| 2.6.4 | Monitoramento individual para radiação externa..... | 51 |
| 2.6.4.1 | Emissores de radiação gama – Irradiação de corpo inteiro..... | 52 |
| 2.6.4.2 | Emissores de radiação gama – Irradiação das mãos..... | 53 |
| 2.6.4.3 | Emissores de radiação beta, com e sem a presença de radiação gama..... | 53 |
| 2.6.5 | Monitoramento individual para contaminação de pele e roupas..... | 54 |
| 2.6.6 | Monitoramento individual para contaminação interna..... | 54 |
| 3. | IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA DE MONITORAMENTO NO PRÉDIO DO CÍCLOTRON..... | 56 |
| 3.1 | Condições radiológicas ambientais..... | 56 |
| 3.2 | Descrição dos equipamentos utilizados em cada dependência para o monitoramento de área para radiação externa e contaminação de superfície para cada função..... | 60 |
| 3.2.1 | Função controladora..... | 60 |
| 3.2.2 | Função operacional..... | 63 |
| 3.2.3 | Monitoramento de área para a contaminação de superfície..... | 67 |
| 3.2.4 | Monitoramento de nêutrons..... | 68 |
| 3.3 | Escolha inicial dos pontos de monitoramento de área para cada tipo e função..... | 69 |
| 3.3.1 | Dependências I e II..... | 69 |
| 3.3.2 | Dependências III e IV..... | 71 |
| 3.3.3 | Dependência V..... | 73 |
| 3.3.4 | Dependências VI, VII e VIII..... | 74 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.3.5 | Dependências IX, XIII e XIV..... | 77 |
| 3.4 | Tipos de monitoramentos e suas funções para os trabalhadores..... | 80 |
| 4. | RESULTADOS DOS MONITORAMENTOS DOS LOCAIS DE TRABALHO.. | 84 |
| 5. | DISCUSSÃO..... | 89 |
| 5.1 | Classificação das áreas..... | 89 |
| 5.1.1 | Dependências I, II, III, IV e V..... | 90 |
| 5.1.2 | Dependência VI..... | 90 |
| 5.1.3 | Dependência VII..... | 91 |
| 5.1.4 | Dependência VIII..... | 91 |
| 5.1.5 | Dependência IX..... | 92 |
| 5.1.6 | Dependências X, XI e XII..... | 92 |
| 5.1.7 | Dependência XIII..... | 92 |
| 5.1.8 | Dependência XIV..... | 93 |
| 5.2 | Classificação dos trabalhadores..... | 93 |
| 5.2.1 | Grupo de alvos..... | 93 |
| 5.2.2 | Grupo de operadores..... | 94 |
| 5.2.3 | Grupo de proteção radiológica..... | 95 |
| 5.3 | Estabelecimento dos valores de referência..... | 96 |
| 5.3.1 | Dependências I, II, III, IV, V, VI, XII e XIV..... | 96 |
| 5.3.2 | Dependências VII, VIII, IX e XIII..... | 96 |
| 5.4 | Aplicação do princípio ALARA..... | 97 |
| 5.5 | Locais onde deverão ser aplicado o princípio ALARA..... | 98 |
| 5.6 | Discussões genéricas..... | 98 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 102 |
| 7. | FUTUROS TRABALHOS..... | 103 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 104 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Cíclotron e suas aplicações

O cíclotron é uma máquina que acelera em vácuo, íons, partículas elementares com carga elétrica ao longo de órbitas circulares de raio crescente, resultando em uma trajetória espiralada ao longo do percurso de aceleração, até os íons com energia elevada atingirem uma região na periferia da máquina, denominada de região de extração. Na região de extração, forças elétricas e/ou magnéticas conduzem os íons para fora do acelerador, remetendo-os para tubos com vácuo em seu interior, denominados de linhas de feixe. Nestes tubos os íons caminham por inércia.

A aceleração dos íons é efetuada por campo elétrico alternado, produzido entre eletrodos carregados eletricamente, entre os quais os íons passam sucessivamente a cada volta. A polaridade dos eletrodos é invertida em sincronismo com a passagem dos íons, de forma que os íons ganham impulso a cada passagem. Como a velocidade dos íons é elevada, o campo elétrico precisa se alternar rapidamente, por isso é empregada alta frequência de excitação dos eletrodos. O formato dos eletrodos nos primeiros cíclotrons se assemelhava à letra D e por isso são denominados DEES.

Um forte campo magnético é aplicado perpendicularmente ao plano da órbita dos íons fazendo-os caminharem circularmente. Este campo é produzido por um grande eletroímã que envolve a câmara de vácuo contendo os íons em aceleração. Nos cíclotrons de primeira geração este campo era constante ao

longo de uma órbita e diminuía com o aumento do raio, introduzindo forças que mantinham o íon focalizado nas órbitas, mas não assegurava o perfeito sincronismo com a frequência dos DEES. Nos cíclotrons de segunda geração (os isócronos) o campo é variável ao longo de uma órbita, condição 1, mas seu valor médio por órbita cresce com o aumento do raio, condição 2. A condição 1 gera forças que mantêm a partícula na órbita e a condição 2 assegura o sincronismo, compensando o aumento relativístico de massa dos íons.

O cíclotron de 30 MeV do IPEN, Figura 1.1, é uma máquina de terceira geração, onde estão incorporados tanto as inovações referentes aos princípios básicos de aceleradores circulares, como todos os avanços recentes de comando e controle digitalizado, alcançando uma maior eficiência operacional e reduzindo sua manutenção. Fabricado sob a denominação de Cyclone 30, pela empresa Ion Beam Applications, da Bélgica, o acelerador possui campo magnético fixo e frequência de excitação fixa, para aceleração de prótons com energia variável de 15 a 30 MeV, sendo a mudança de energia obtida pela variação da posição radial de extração dos íons acelerados; portanto, ao invés de ajustes no campo magnético e na alta frequência para a mudança de energia, é feito apenas um ajuste de posição de uma pequena peça denominada de folha de extração. Isso foi possível porque o cíclotron acelera íons negativos de hidrogênio, isto é, hidrogênio com dois elétrons nas camadas eletrônicas. Os íons negativos do hidrogênio, conforme Figura 1.1, produzidos na fonte de íons "multicusp" são originados de um cilindro comercial de moléculas de hidrogênio (^2H) gasoso que por meio de um filamento elétrico torna os átomos em estado físico de plasma provocando uma reação que produz os íons de hidrogênio, já com 2 MeV de energia cinética que ao passarem pela folha de extração de carbono perde os

dois elétrons, restando os prótons que se curvam para fora, impelidos pelo próprio campo magnético do ciclotron.

Esta máquina foi especialmente projetada para produzir radioisótopos, Tabela 1.1, podendo fornecer dois feixes simultâneos, com energias e correntes distintas, possibilitando a produção de dois radioisótopos simultaneamente. A corrente total dos dois feixes atinge até 350 μA . Apesar da elevada corrente de feixe, a ativação de peças internas, por espalhamento de íons, é pequena por causa do vácuo residual de 10^{-7} mbar e pela ausência das peças defletoras existentes nos ciclotrons convencionais. Praticamente 100% dos íons acelerados são extraídos, permitindo uma alta corrente de feixe e redução no consumo de refrigeração.

O sistema de irradiação de alvos sólidos é constituído por uma estação de irradiação, um sistema pneumático de transporte do alvo e uma estação de recepção localizada dentro da cela blindada (*hot-cell*) de manipulação dos alvos. Esta estação de recepção situa-se em sala contígua ao prédio do ciclotron. O sistema pneumático transporta o alvo em uma cápsula porta alvo, conhecida internacionalmente como coelho, nas duas direções, entre as estações de irradiação e recepção. O acionamento pneumático é realizado por meio de uma tubulação de alumínio de secção quadrada. Para evitar possíveis contaminações devido à perda de material particulado proveniente do alvo, o acionamento é feito por vácuo parcial, ao invés de pressões positivas, cuja descarga do ar está conectada a um sistema de filtros absolutos.

Resumindo, o ciclotron acelera prótons (radiação ionizante), que são utilizados como projéteis para incidir sobre alvos, que na interação projétil-alvo,

por meio de reações nucleares, torna algum ou todo os elementos químicos do alvo radioativos e portanto emissores de radiação ionizante.

CÍCLOTRON 30MeV MODELO CYCLONE 30 ION BEAM APPLICATIONS

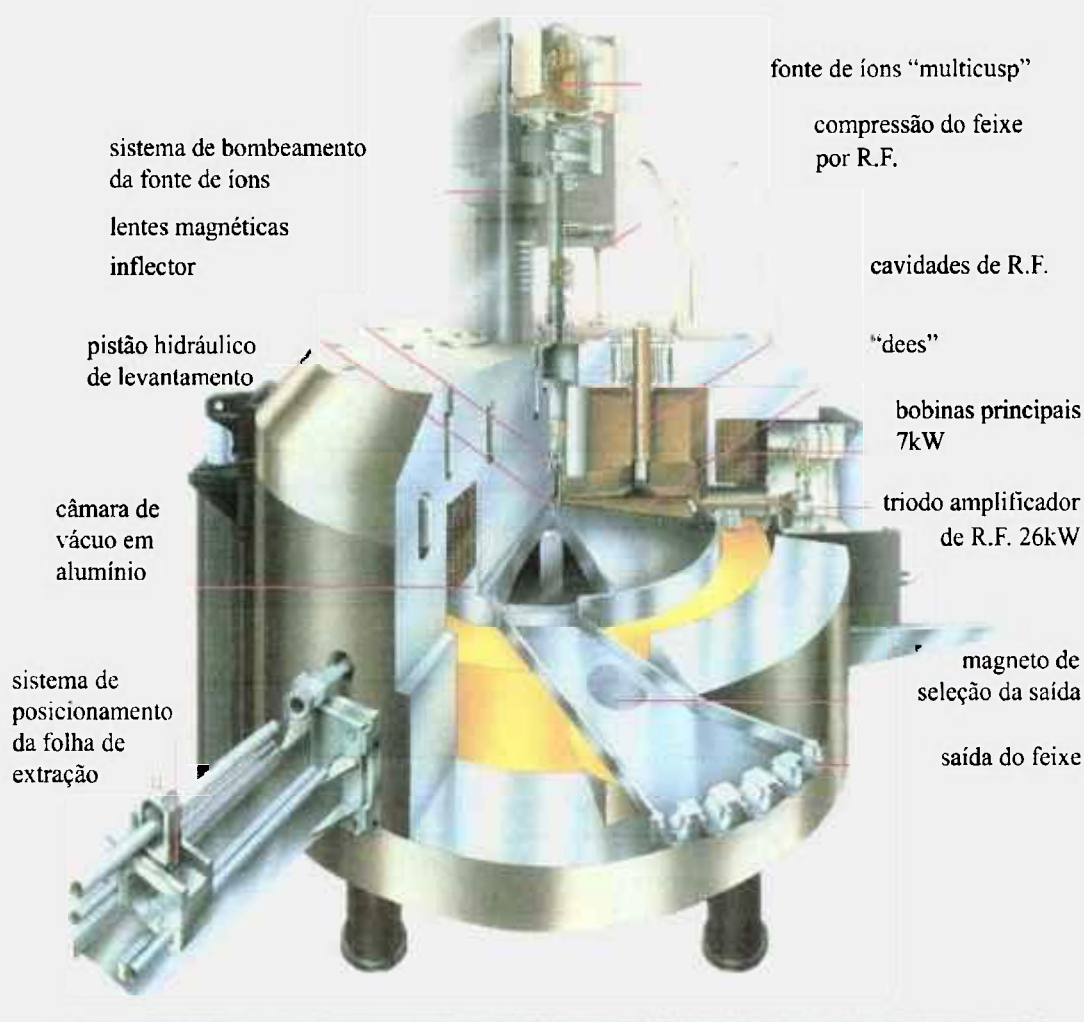


Figura 1.1: Cíclotron de 30 MeV do IPEN

Tabela 1.1 – Radioisótopos produzidos no ciclotron

| RADIOISÓTOPO | REAÇÃO NUCLEAR | MEIA VIDA (h) | ENERGIA DO PRÓTON (MeV) | ATIVIDADE (TBq) |
|---|---|---------------|-------------------------|-----------------|
| Tálio | $^{203}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ | 73,5 | 30 | 37,0 |
| Gálio | $^{68}\text{Zn} (p,2n) ^{67}\text{Ga}$ | 78,3 | 30 | 37,0 |
| Iodo | $^{124}\text{Te} (p,2n) ^{123}\text{I}$ | 13,2 | 30 | 3,7 |
| Índio | $^{112}\text{Cd} (p,2n) ^{111}\text{In}$ | 67,2 | 30 | 18,5 |
| Flúor | $^{18}\text{O} (p,n) ^{18}\text{F}$ | 1,83 | 16 | 97,5 |
| Geradores Rb ⁸¹ -Kr ^{81M} | $^{82}\text{Kr} (p,2n) ^{81}\text{Rb} \rightarrow ^{81\text{M}}\text{Kr}$ | 4,58 | 30 | 1,85 |

1.2 Necessidade de proteção radiológica

Desde os primeiros estudos sobre os raios X e os minerais radioativos se observou que a exposição a valores elevados de radiação pode causar danos clinicamente identificáveis aos tecidos do corpo humano. Além disso, prolongados estudos epidemiológicos das populações expostas às radiações, especialmente dos sobreviventes dos bombardeios atômicos ocorridos nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão, em 1945, têm demonstrado que a exposição à radiação ionizante pode também provocar, com tempos de incubação longo, enfermidades malignas.

A radiação e as substâncias radioativas existem de forma natural e permanente no meio ambiente e, em consequência, os riscos derivados da exposição à radiação só pode ser restringida, mas não eliminada por completo, a não ser por meio de um vultoso custo. Além disso, o emprego da radiação de origem artificial na medicina tem-se generalizado, já que as fontes de radiação são indispensáveis para uma moderna atenção à saúde. A utilização da energia nuclear e as aplicações de seus subprodutos, ou seja, da radiação e das

substâncias radioativas, seguem aumentando em todo o mundo. As técnicas nucleares encontram aplicações crescentes na indústria, na agricultura, na medicina, na proteção ao meio ambiente, na geração de energia elétrica por meio de reatores de potência e em muitos campos da pesquisa, beneficiando milhões de pessoas e propiciando empregos a outros inúmeros trabalhadores.

A aceitação pela sociedade dos riscos derivados do uso da radiação é condicionada aos benefícios resultantes da sua utilização. De qualquer forma, tem-se que restringir os riscos e oferecer proteção contra eles mediante a aplicação de normas e regulamentos de segurança radiológica (1, 2, 3 e 4). A exposição a doses elevadas de radiação pode causar efeitos tais como anemias, leucopenia, eritemas na pele ou, nos casos graves, as síndromes agudas que se manifestam clinicamente nos indivíduos mais expostos, pouco tempo depois da exposição. Estes efeitos se denominam Efeitos Determinísticos porque sua aparição é certa se a dose ultrapassa um limiar de dose. A exposição à radiação pode também produzir efeitos somáticos tais como enfermidades malignas, que se manifestam após um período de latência e podem ser detectadas epidemiologicamente em uma população; supõe-se que tais efeitos são produzidos em todo o intervalo de doses, sem limiar de dose. Assim mesmo, em populações de mamíferos têm-se detectado estatisticamente efeitos hereditários resultantes da exposição à radiação e se supõe que também ocorrem nas populações humanas. Estes efeitos epidemiologicamente detectáveis (enfermidades malignas e efeitos hereditários) se denominam Efeitos Estocásticos por sua natureza probabilística.

Os efeitos determinísticos são resultados de processos diversos, principalmente de morte celular e demora na divisão celular, causadas pela

exposição a elevados valores de radiação. Se as doses forem suficientemente grandes, podem deteriorar a função do tecido exposto. A gravidade de um efeito determinístico em um indivíduo exposto aumenta com as doses acima dos limiares da aparição do efeito.

Os efeitos estocásticos podem apresentar-se quando uma célula irradiada não morre, mas se modifica. As células modificadas podem, ao fim de um processo prolongado, degenerar-se em câncer. Os mecanismos de recuperação e defesa do organismo fazem com que a degeneração em câncer seja muito improvável para as doses pequenas; mas não existe prova alguma de que existe uma dose limiar abaixo do qual seja impossível a produção de um câncer. A probabilidade de aparição do câncer aumenta com as doses, mas a gravidade de um eventual câncer resultante da irradiação é independente das doses. Se a célula danificada por exposição à radiação é uma célula germinal, cuja função é transmitir informação ao código genético, é concebível que nos descendentes do indivíduo exposto se manifestem efeitos hereditários de diversos tipos. Supõe-se que a probabilidade dos efeitos estocásticos é proporcional às doses recebidas, sem limiar de doses.

Ademais dos efeitos mencionados, podem ser produzidos outros efeitos na saúde das crianças por causa da exposição do embrião ou feto à radiação ionizante. Entre tais efeitos cabe mencionar uma maior probabilidade de leucemia nas crianças do que no adulto e, em caso de exposição acima dos distintos valores dos limiares de doses durante certos períodos da gravidez, atraso mental e deformações congênitas graves. Por isso, admite-se que todo incremento de dose, por menor que seja, existe sempre um incremento na probabilidade de aparição dos efeitos estocásticos. As Normas de Radioproteção são aplicáveis

em todo o intervalo de doses, com a finalidade de reduzir todo detrimento por radiação que se possa produzir.

Portanto, é essencial que as atividades que implicam em exposição à radiação, tais como a produção e o emprego de fontes e materiais radioativos, assim como a operação das instalações radiativas e nucleares, incluindo a gestão de rejeitos radioativos, se submetam às normas e regulamentos nacionais e internacionais de segurança para proteger as pessoas expostas ou que possam vir a estar expostas à radiação ionizante e em virtude disso, em nosso caso, deverão obedecer a diversas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN^(5, 6, 7).

Daí justifica-se que a operação do ciclotron de 30 MeV, como qualquer instalação radiativa, deverá estar amparada por um rigoroso programa que possibilite o conhecimento e o controle dos valores de radiação para que a proteção radiológica possa alcançar sua principal finalidade que é a de manter um padrão adequado de proteção aos trabalhadores, sem limitar, indevidamente, suas atividades e evitar a possibilidade de ocorrência de situações anormais indesejáveis. Por isso é essencial que o sistema de proteção radiológica esteja alicerçado nos princípios fundamentais de proteção radiológica.

1.3 Função da proteção radiológica

O termo “proteção radiológica”, por falta de uma expressão melhor, é quase universalmente usado para significar a proteção às radiações ionizantes, a higiene, a segurança e o controle da radiação ionizante. Físicos, biólogos e químicos fornecem as bases técnicas para a ciência da proteção radiológica, mas

muitas outras atividades auxiliares estão a ela associadas, tais como: a filosofia, a economia, as relações no trabalho, as relações públicas, os ensinamentos e a administração⁽⁴⁾.

A proteção radiológica tem interesses comuns com um apreciável número de especializações, bem conhecidas como: física, eletrônica, biofísica, química, bioquímica, biologia, fisiologia, genética, toxicologia, ecologia e engenharia. Pode ser definida como a ciência ou profissão da proteção à radiação ionizante em todos os seus aspectos⁽⁴⁾.

A principal finalidade da proteção radiológica é proteger a pessoa e seu ambiente dos efeitos nocivos das radiações ionizantes e das substâncias radioativas e ao mesmo tempo possibilitar a raça humana de desfrutar de todos os benefícios que se podem originar do uso da energia atômica.

A proteção radiológica considera que se dando proteção suficiente à pessoa, também o seu meio ambiente estará protegido, uma vez que existe uma interação entre ambos⁽⁴⁾.

A proteção radiológica à pessoa pode ser dividida em duas grandes partes: proteção ao trabalhador, isto é, aquele indivíduo cujas atividades envolvam radiações ionizantes e materiais radioativos; e indivíduos do público ou população em geral, isto é, aquele grupo de indivíduos que não está envolvido diretamente em atividades com radiações ou materiais radioativos, mas que sofrerá as conseqüências delas por viver próximo a instalações radiativas ou nucleares. Estes indivíduos podem ser irradiados diretamente pela radiação ionizante, ou pela liberação de material radioativo no ambiente. Dentre estes indivíduos considera-se o grupo crítico, ou seja, aquele grupo homogêneo nos hábitos e

costumes, que vem a sofrer as maiores conseqüências em virtude daquela atividade com radiação ionizante, em outras palavras, é aquele grupo de indivíduos que recebe a maior dose⁽³⁾.

Desta maneira, o principal objetivo da proteção radiológica laboral é a obtenção e manutenção de condições de trabalho admissivelmente seguras e satisfatórias, enquanto que o principal objetivo da proteção radiológica do indivíduo do público é controlar a radiação direta e a liberação de material radioativo no ambiente, de tal forma, que o risco a que está sendo submetido o grupo crítico, seja inferior ou no máximo igual ao risco normalmente aceito por ele, dentre os que se apresentam em sua vida diária ^(1,8,9).

Neste trabalho só estarão envolvidos trabalhadores, razão pela qual serão descartadas as funções da proteção radiológica para indivíduos do público. Considerando então a proteção radiológica laboral para a qual se deve obter e manter condições de trabalho admissivelmente seguras e satisfatórias, os únicos meios disponíveis para se proteger da radiação ionizante são: tempo, distância e blindagem, ou uma combinação de dois deles ou todos eles juntos. Esta que é a principal função da proteção radiológica; em cíclotrons foi resolvida em grande parte ou em sua essência no próprio projeto da máquina, fazendo parte intrínseca dele. Assim sendo, o serviço de radioproteção encarregado das instalações do cíclotron deve mostrar que o sistema de segurança é adequado e comprovar que continua adequado com o decorrer do tempo. Isto se consegue pela técnica do monitoramento que será discutido mais adiante⁽¹⁰⁾.

Desde que o material irradiado não se encontre na forma sólida, ou em forma especial ⁽¹¹⁾, existe a possibilidade de ocorrência de contaminações, tanto

dos trabalhadores, como de suas vestimentas de trabalho, utensílios e ambiente de trabalho. Neste caso, há necessidade de uma intervenção, a fim de se voltar ao grau de segurança anterior à ocorrência. Assim, nestes casos, deve-se ter a mão procedimentos de descontaminação e a preocupação diária de como evitar que estas contaminações ocorram, já que elas provocam atrasos na produção. Ora, se numa instalação ocorrem contaminações e estas provocam a necessidade de procedimentos de descontaminação, como consequência, serão gerados rejeitos radioativos, que por um meio ou outro deverão ser eliminados desde que não haja previsão de reaproveitamento^(7, 12 e 13).

Com todas estas funções principais de proteção radiológica, de natureza completamente variada, torna-se evidente que para se trabalhar com maior segurança é necessário ter pessoal treinado e portanto a formação e treinamento tanto do pessoal de operação, como o pessoal de proteção radiológica encarregado das atividades apresentadas neste item, tornam-se imprescindíveis. É de se salientar, que esta formação e o treinamento não necessitam ser do tipo formal escolar, mas na maioria das vezes, podem ser realizados durante o desenvolvimento das tarefas em seu próprio local de trabalho.

Por fim deve-se informar que a instituição que trabalha com material radioativo ou fontes de radiação ionizante tem às vezes, responsabilidades que transcendem o simples desempenho técnico, dentro dos limites de sua instalação, e que vão de encontro aos anseios da comunidade em que ela se encontra. Dentre estas atividades devemos destacar:

- a) Atividades normativas e legislativas perante a Prefeitura, Estado e País;

- b) Atividades de planejamento de emergência junto à defesa civil dos órgãos governamentais; e
- c) Prestação de serviço e atividades de educação à população.

Evidentemente, estas atividades não condizem com a subsistência da instituição e ao fim a que ela se destina, mas por outro lado tem uma grande utilidade de caráter público.

O serviço de proteção radiológica para dar cumprimento a todas estas funções que acabamos de enumerar utiliza-se de mais algumas ferramentas que será enumeradas nos itens seguintes deste capítulo.

1.4 Classificação das áreas

Como as diferentes áreas de trabalho podem apresentar valores de doses de radiação diferentes devemos controlar os seus acessos. Em virtude disto, existe uma classificação das áreas recomendadas tanto pelo Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA, órgão oficial da Organização das Nações Unidas, ONU, quanto pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIRP, órgão técnico-científico máximo internacional de proteção radiológica ^(3, 8 e 10), apresentado resumidamente na Tabela 1.2, e que será descrito sucintamente a seguir.

Tabela 1.2: Classificação de áreas de trabalho.

| TIPO DE CONTROLE | DOSE DE RADIAÇÃO IONIZANTE* | DENOMINAÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO | TIPO DE ACESSO |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Não controlado | < LA* público | Livre | Livre |
| Controle brando | $\leq 3 / 10$ LA* trabalhador | Supervisionado | Restrito aos Autorizados |
| Controle rígido | > 3/10 LA* trabalhador | Controlado | Restrito aos Autorizados |

* LA, limite anual de dose de radiação ionizante: As doses são calculadas considerando as 2000 h de trabalho por ano.

Começando pela segunda coluna, o limite anual de dose de radiação para o público é de 1 mSv^(1 a 3). A dose média mundial, exceção feita a determinadas zonas de doses elevadas, é de 2,4 mSv/ano e 1 mSv corresponde ao desvio padrão médio deste valor de radiação natural. O limite anual de dose de radiação para o trabalhador é de 50 mSv/ano^(1 a 3). A título de esclarecimento, a dose média anual em Kerala, Índia, é de 13 mSv e em Guarapari, Brasil, é de 7,5 mSv⁽¹⁴⁾.

Com relação à Tabela 1.2, pode-se dizer que nos locais de trabalho onde as doses de radiação ionizante anuais são inferiores aos limites do público, estas áreas são consideradas não controladas, pelo serviço de proteção radiológica, e são denominadas de áreas livres. O seu acesso é livre para qualquer trabalhador. Os locais, onde os valores das doses de radiação ionizante anuais são superiores aos limites do público, são considerados restritos às pessoas autorizadas pela direção da instalação, sob parecer do serviço de proteção radiológica. Em função dos valores das doses nos locais restritos, coluna 3, da Tabela 1.2, eles são denominados supervisionados ou controlados. No local supervisionado o controle é brando, bastam sinais de aviso como: acesso restrito às pessoas autorizadas,

solicite sua autorização ao supervisor de radioproteção etc. Nos locais de trabalho classificados como controlados o controle é rígido e pode ser obtido com o auxílio de agentes de segurança física ou por meio de procedimentos específicos. Além disso, todos os locais restritos devem estar claramente sinalizados com o símbolo internacional de radiação, na entrada e na saída.

1.5 Classificação dosimétrica do trabalhador

Os organismos internacionais, tanto o OIEA como a CIPR consideram que os dosímetros portados pelo trabalhador ou os monitoramentos individuais dos trabalhadores executados em laboratório são classificados como equipamentos de proteção individual, EPI, e não devem ser usados nos casos onde as doses de radiação possuem valores pequenos, pois o uso destes EPI não se justifica, nem pelo seu custo e nem pelo risco radiossanitário que é considerado irrisório.

A Tabela 1.3. apresenta a classificação dosimétrica do trabalhador.

Tabela 1.3: Classificação dosimétrica do trabalhador

| Dose ⁽¹⁾ | Classificação |
|-------------------------------|--|
| Dose > 3/10 LA ⁽²⁾ | A – Monitoramento individual obrigatório |
| Dose ≤ 3/10 LA ⁽²⁾ | B – Basta conhecer os valores das doses de radiação no local de trabalho |

(1) Deve ser relativa às horas realmente trabalhadas.

(2) (2) A possibilidade de alcançar este valor nas horas realmente trabalhadas não significa que a dose seja recebida.

Cabe salientar que esta Tabela é válida para o monitoramento individual, que visa estimar a dose do trabalhador em situação normal de trabalho e que de acordo com as normas internacionais e nacionais ^(3, 8 e 9), devem ser registradas e guardadas por 30 anos, após o trabalhador cessar toda e qualquer atividade em presença de radiação ionizante e não pode ser eliminada antes do seu decesso. Não contempla as situações anormais, ou seja, as situações de exposição potencial para os quais deve-se dar preferência ao monitoramento de alerta visível ou sonoro.

1.6 Princípios básicos de proteção radiológica e seu significado

Em virtude dos possíveis malefícios à saúde, as atividades humanas que envolvem o uso das radiações ionizantes devem obedecer a três princípios básicos de radioproteção ^(1,2,3), a saber:

- a) Qualquer atividade envolvendo radiação ionizante ou exposição deve ser justificada em relação a alternativas e produzir um benefício líquido positivo para a sociedade. Conhecido como Princípio da Justificação.
- b) O projeto, o planejamento do uso e a operação da instalação e de fontes de radiação ionizante devem ser feitos de forma a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto racionalmente exeqüíveis, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos. Conhecido como Princípio da Otimização ou Princípio ALARA, advindo do inglês, “as low as reasonable achievable”.

- c) As doses individuais dos trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos. Conhecido como Princípio da Limitação de Dose.

O primeiro princípio é mais pertinente à autoridade competente do País, uma vez que proíbe atividades humanas, envolvendo o uso de radiação ionizante, que produzam mais malefícios do que benefícios à população pertinente, mas também pode ser utilizado pelo usuário da radiação ionizante sempre que se puder fazer uma seleção entre várias técnicas ou procedimentos.

O terceiro princípio estabelece um limite superior de risco, para o trabalhador e o público, acima do qual a atividade humana se torna inaceitável, mas mesmo abaixo deste valor não significa que ele seja aceitável.

O segundo princípio visa, em resumo, o abaixamento das doses nas três categorias em que são divididos os irradiados, a saber: trabalhadores, indivíduos do público e irradiações médicas, a valores mínimos de risco, que sejam aceitos pela população, em função dos benefícios trazidos pelo uso das radiações ionizantes. No caso da categoria de trabalhadores, o segundo princípio pode ser entendido pela Figura 1.2.

É exatamente na região tolerável que se deve aplicar o princípio ALARA, fazendo melhorias nas condições de proteção radiológica, tanto de projeto como nos procedimentos, a fim de diminuir as doses de radiação recebidas pelo trabalhador. Esta é a filosofia da norma brasileira ⁽³⁾, que está baseado nas normas internacionais ^(8, 9). Quando todos os trabalhadores, do País, receberem doses inferiores a 3/10 dos atuais limites, poder-se-á adotar as novas normas internacionais da CIPR e do OIEA ^(1, 2). Para abaixar os valores de dose anuais de

50 mSv/ano para os 3/10 dos limites anuais, numa primeira etapa, quando serão adotados os novos limites médios anuais e para 1/10 dos limites anuais numa segunda etapa, basta acrescentar, no primeiro caso, à fonte de radiação ionizante duas camadas semi-redutoras de blindagem para a dose diminuir de um fator 4 e, portanto, de 50 mSv/ano para 12,5 mSv/ano, onde poderão ser aplicados os novos limites internacionais.

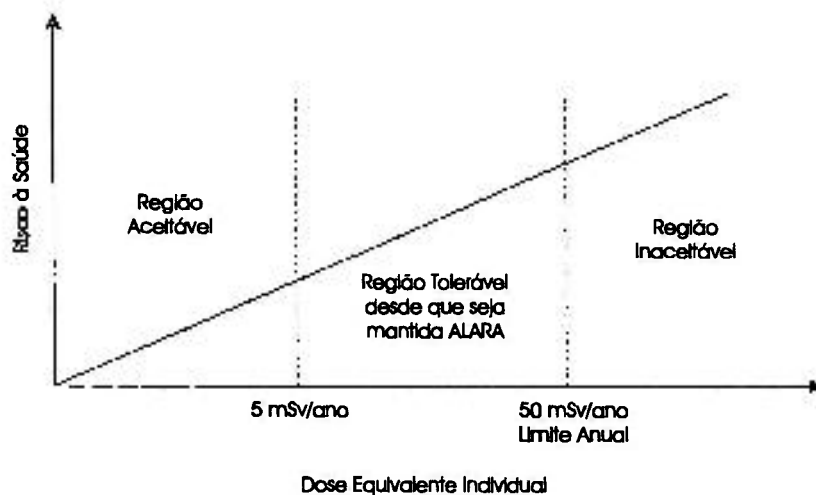


Figura 1.2 – Região de aplicação do princípio ALARA

O que a proteção radiológica pretende não é exatamente isto, pois em instalações de grande porte, como reatores, aceleradores, irradiadores para esterilização, etc., encareceria muito o custo e a proteção radiológica deve ter, por lema, a economia e a eficácia. Neste caso, devem-se identificar as ações dos trabalhadores, nas quais recebem suas maiores frações de dose e então melhorar a proteção radiológica pertinente àquela ação, por melhorias de projeto e/ou procedimentos de trabalho.

Neste caso, surge a questão: deve-se partir para a opção mais cara e, conseqüentemente, chegar à região aceitável mais rapidamente ou deve-se partir

para a opção mais barata, levando-se, em consequência, muito mais tempo para alcançar a meta de 1/10 dos limites anuais. A tomada de decisão é efetuada fazendo uso de técnicas de ajuda para a tomada de decisão ^(15,16,17). Conclusão: este esquema de trabalho deve ser repetido múltiplas vezes, até se chegar à meta desejada de 1/10 dos limites de dose. Os europeus, para chegarem aos 3/10 dos limites anuais, levaram em média 14 anos e tudo indica que no ano de 2003 terão alcançado os valores de dose de radiação anuais aceitáveis, isto é, inferiores a 1/10 dos limites anuais.

Com o intuito de auxiliar nesta tarefa de abaixamento dos valores das doses, recebidas pelos trabalhadores, os serviços de radioproteção fazem uso dos denominados valores de referência, que se apresenta a seguir.

1.7 Valores de referência

O valor de referência ^(3, 8, 9, 10) corresponde a uma dose de radiação ionizante pré-determinada a partir do qual se torna obrigatória uma ação por parte do serviço de proteção radiológica. Tanto a CIPR como o OIEA sugerem pelo menos três valores de referência: valor de registro, valor de investigação e valor de interferência. O valor de registro é uma dose de radiação ionizante a partir da qual se torna obrigatório o seu registro por parte do serviço de proteção radiológica. Tanto a CIPR como o OIEA recomendam para o monitoramento individual o valor de 1/10 dos limites anuais para trabalhador, na fração de tempo de medida do instrumento. O valor de investigação é uma dose de radiação ionizante a partir da qual se torna obrigatória uma investigação por parte do Serviço de Proteção Radiológica e exige melhorias no sistema de proteção, para

que a situação não se repita, isto é, invoca a aplicação do princípio ALARA e o uso das técnicas de ajuda para a tomada de decisão. Para cumprir esta etapa será estabelecido, numa primeira instância, o valor de 3/10 do limite anual para trabalhador, na fração de tempo medida do instrumento que é o recomendado, tanto pela CIPR como pelo OIEA, para a realização do monitoramento individual e, numa segunda instância, o valor aceitável de 1/10 do limite anual para o trabalhador. Se as doses estimadas estiverem acima dos 3/10 dos limites anuais para trabalhador, serão montadas as opções de proteção que poderiam diminuir as doses determinadas e os seus custos, bem como as doses coletivas recebidas por cada opção considerada e a partir destes valores serão aplicadas às técnicas de ajuda para a tomada de decisão. O valor de investigação é uma dose de radiação ionizante a partir da qual se toma obrigatório medidas de interferência nos procedimentos de operação normal, a fim de corrigir uma situação claramente inaceitável ou um dano. Os detalhes desta interferência dependerão de cada situação em particular.

1.8 Finalidade e objetivos do presente trabalho

A finalidade do presente trabalho é implementar um programa de monitoramento, para avaliar e estimar as doses dos trabalhadores em aderência aos princípios da limitação de doses e da otimização, nas instalações do cíclotron fabricado pela empresa Ion Beam Applications, modelo Cyclone 30, que está sendo operado no IPEN-CNEN. Por avaliar entendem-se os resultados apresentados pelo monitoramento do local de trabalho e por estimar entendem-se os resultados apresentados pelo monitoramento individual ⁽¹⁸⁾. A avaliação dos resultados apresentados pela técnica de monitoramento tem caráter preventivo,

pois estes resultados podem ser obtidos sem a presença do trabalhador e a partir deles pode-se avaliar a dose que o trabalhador irá receber durante o trabalho. Neste caso, se as condições de trabalho forem inaceitáveis pode-se tomar medidas de proteção radiológica antes que o trabalhador venha a receber as doses avaliadas. Por sua vez, a estimativa dos resultados apresentados pelo monitoramento individual tem caráter confirmatório, pois estes resultados só são obtidos após o trabalhador ter recebido a dose de radiação. Neste caso, se os resultados forem em excesso aos previstos pela avaliação, o serviço de proteção radiológica deverá proceder a uma investigação e analisar se o trabalhador poderá continuar trabalhando normalmente ou se deverá ser encaminhado, para uma avaliação médica.

Para atingir esta finalidade devem ser alcançados vários objetivos mencionados a seguir:

1. Efetuar o levantamento das doses obtidas nos locais de trabalho com o transcorrer do tempo durante um período suficiente para se poder determinar o intervalo de variação, o valor médio em cada ponto de monitoramento e o seu desvio padrão.
2. Efetuar um segundo levantamento similar ao item 1 com as doses individuais recebidas pelos trabalhadores.
3. Descrever em cada local de trabalho, sujeito a doses de radiação, as tarefas executadas, as fontes de radiação que estão presentes, suas atividades e, se necessário, as características físicas e químicas.

4. Identificar o pessoal que permanece nos locais de monitoramento de área, suas tarefas e possíveis tempos de permanência.
5. Pela análise dos itens anteriores (1 a 4) identificar os pontos nos locais de trabalho que realmente necessitam de monitoramento, considerando as várias funções desta técnica que serão descritas no Capítulo 2. Este item engloba a classificação das áreas.
6. Novamente pela análise dos itens 1 a 4, identificar os trabalhadores que necessitarão de monitoramento individual, considerando as várias funções que serão descritas no Capítulo 2. Este item engloba a classificação dosimétrica dos trabalhadores.
7. Descrever os tipos de equipamentos que deverão ser usados para cada função do monitoramento do local de trabalho.
8. Descrever os tipos de equipamentos que deverão ser usados para cada função do monitoramento individual
9. Estabelecer com base em dados normativos as frequências de monitoramento dos locais de trabalho para cada função.
10. Estabelecer com base em dados normativos as frequências dos monitoramentos individuais para cada função.
11. Estabelecer formalmente os valores de registros, investigação e interferência em base aos resultados do monitoramento de área.
12. Com base nos resultados do monitoramento individual identificar os locais de trabalho nos quais deverá ser introduzido o princípio

ALARA para se alcançar os 3/10 dos limites anuais, numa primeira instância, e os valores de dose aceitáveis numa segunda instância.

13. Efetuar uma análise sucinta para verificar se o princípio ALARA deverá ser aplicado ao procedimento de operação, ao projeto ou a ambos.

2 CONHECIMENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO NECESSÁRIO AO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

2.1 Descrição das dependências do prédio do cíclotron

O cíclotron do IPEN está instalado em um prédio monolítico contendo dois pavimentos, estando suas diversas dependências dispostas no piso térreo do prédio, Figura 2.1. Cada unidade que compõe o cíclotron está convenientemente posicionada de forma a possibilitar uma adequada funcionalidade da instalação e facilitar o acesso, para manutenção e reparos, às diversas unidades sem a necessidade de sair do interior do prédio. No piso superior encontram-se os sistemas de ventilação, refrigeração e de filtros, não sendo lá permitido o acesso de pessoas durante o período de operação do cíclotron.

Na Figura 2.1, as dependências com hachuras, na cor amarela, são locais onde não se trabalha com materiais radioativos ou fontes de radiação, portanto os valores das doses anuais devem obedecer aos limites dos indivíduos do público. As dependências I e II são, respectivamente, a sala de operação e a sala de fontes elétricas para alimentação do cíclotron de 30 MeV, e seus ocupantes estão sujeitos a doses de radiação ionizante somente durante o período de operação do cíclotron. As dependências III, IV e V referem-se ao cíclotron de 28 MeV, que se encontra atualmente fora de operação e são, respectivamente, a sala de operação e corredor de acesso, a sala de fontes elétricas de alimentação e a caverna, onde está instalado o cíclotron de 28 MeV. Nestes locais, há exposição à radiação ionizante durante o período de operação do cíclotron de 30 MeV e seus ocupantes estão sujeitos a doses de radiação ionizante. As dependências VI e VII

são os locais de preparação e troca de alvos, e seus ocupantes estão sujeitos a doses de radiação ionizante, durante todo o período de permanência. A dependência VIII é a caverna do cíclotron de 30 MeV; neste local está instalado o cíclotron propriamente dito, as linhas de feixe, o sistema de refrigeração dos alvos sólidos e a fonte de alimentação da fonte de íons. Neste local as doses de radiação ionizante são elevadas durante o período de operação do cíclotron sem possibilidade de permanência de trabalhadores, durante este período. Fora do período de operação do cíclotron os trabalhadores ficam sujeitos a doses de radiação devido ao fato de alguns materiais e componentes do cíclotron estarem irradiados. A dependência IX é o conjunto de celas blindadas onde é realizado o recolhimento do I-123, a desmontagem do Ga-67 e do Tl-201 depois de ativados, a preparação e o processamento do F-18. Neste local, existe exposição à radiação ionizante e, em consequência, seus ocupantes estão sujeitos a doses de radiação. As dependências X, XI e XII, são os corredores de acesso às dependências I, II, VI, VII, VIII, IX, XIII e XIV. Nestes locais existe exposição à radiação ionizante, durante o período de operação do cíclotron, portanto seus transeuntes estão sujeitos a doses de radiação. As dependências XIII e XIV são, respectivamente, a sala de armazenamento temporário, de rejeitos radioativos gerados no cíclotron (papel, algodão, estopa, luvas e etc.) e materiais irradiados, e o laboratório de desenvolvimento de porta-alvos. Nestes locais, seus ocupantes estão sujeitos a doses de radiação ionizante, mesmo fora do período de operação do cíclotron.

2.2 Tarefas executadas em cada dependência

Os trabalhadores expostos laboralmente à radiação ionizante foram divididos em três grupos:

- a) Grupo de Alvos encarregado da preparação e de troca de alvos; do recolhimento dos radioisótopos e da preparação e do processamento de F-18: este grupo, doravante denominado de Grupo de alvos, realiza nas dependências V, VI, VII, VIII, IX, XIII e XIV as tarefas de troca de alvos sólidos, líquidos e gasosos, medidas de intervenção nas linhas de feixe nos cíclotrons de 28 MeV e 30 MeV. Esta intervenção consiste em algumas medidas corretivas de falhas que ocorrem quando o cíclotron está operando, tais como: escape de mangueiras conectadas à linha de feixe; reparo ou troca da janela de refrigeração da frente do alvo, colocação de hélio para refrigeração do alvo etc. Todas as medidas de intervenções são realizadas, obrigatoriamente, com o cíclotron desligado. São executados, em bancada de trabalho, alguns serviços de reparos, preparação e manutenção de alvos e as atividades de manutenção dos cíclotrons, tanto nas estruturas como nas linhas de feixe. São realizadas ainda todas as etapas de controle dos rejeitos radioativos sólidos, as tarefas de recolhimento e envio de I-123, as etapas de preparação e processamento do F-18; são ainda realizadas as desmontagens do Ga-67 e Tl-201 e a limpeza e manutenção das celas blindadas. O grupo de alvos é composto pelos trabalhadores A1, A2 e A3. Mas, quando necessário, conta com a ajuda dos integrantes do grupo de operação.

- b) Grupo de Operação do Cíclotron: composto pelos trabalhadores Op1, Op2, Op3, Op4, Op5, e Op6. Este grupo tem como principal tarefa operar os cíclotrons. Na dependência I os operadores executam todas as atividades que envolvem a condução segura de operação do cíclotron de 30 MeV. Na dependência II são tomadas as leituras dos painéis das fontes elétricas que alimentam o cíclotron e estão localizadas as botoeiras para ligar e desligar as bombas de vácuo, bem como as botoeiras das fontes elétricas que podem ser desligadas no caso de necessidade de intervenção. Na dependência III e IV as tarefas executadas são idênticas às realizadas nas dependências I e II, mas referentes ao cíclotron de 28 MeV. Estes trabalhadores, quando necessário, ajudam nas tarefas que são executadas nas demais dependências.
- c) Grupo de Radioproteção: composto pelos trabalhadores P1, P2 e P3. Este grupo deve garantir condições seguras na instalação, do ponto de vista de radioproteção; portanto o grupo executa tarefas, em todas as dependências da instalação, pertinentes à segurança radiológica.

2.3 Padrões de proteção radiológica

São conhecidos como padrões de proteção radiológica os fatores limitantes que devem ser obedecidos para se ter a certeza de que as normas de radioproteção vigentes estão sendo observadas. Geralmente, são expressos em unidades de dose. Estes tipos de padrões são implementados pela autoridade competente, pelos serviços de radioproteção ou ainda pela direção da instalação.

Em virtude de sua importância para este trabalho, eles serão aqui introduzidos sucintamente.

a) Limites básicos primários e secundários de doses equivalentes.

Os limites primários são:

- i. dose equivalente num órgão ou tecido para radiação externa;
- ii. dose equivalente comprometida para a radiação interna;
- iii. dose equivalente efetiva para estimativa do dano no corpo inteiro quando um ou mais órgãos são irradiados. Esta grandeza física é usada no Brasil pela legislação nacional⁽³⁾; e
- iv. dose efetiva, para estimativa do dano no corpo inteiro quando um ou mais órgãos são irradiados, usada nas recomendações internacionais^(1, 2).

Os limites básicos secundários, pela legislação nacional são⁽³⁾:

- i. índice de dose equivalente superficial para radiação externa;
- ii. índice de dose equivalente profundo para radiação externa; e
- iii. limite de incorporação anual, LIA, para radiação interna.

Pelas recomendações internacionais são^(1, 2, 19):

- iv. dose equivalente ambiente para radiação externa;
- v. dose equivalente pessoal para radiação externa; e
- vi. dose equivalente, por becquerel, para a radiação interna.

As normas estabelecem que os métodos de monitoramento devem ser capazes de fornecer avaliações e estimativas suficientemente exatas dos limites secundários possibilitando a obtenção de concordância com os limites primários e graus de proteção indispensáveis.

Os monitoramentos individuais em situações normais de trabalho dependem da probabilidade de irradiação externa e interna considerados independentemente. Um tipo de monitoramento não justifica o outro. Só é justificado aquele em que há a possibilidade de ocorrência de doses superiores aos 3/10 dos limites anuais. A introdução de ambos, externos e internos, só se justifica em algumas situações.

As grandezas físicas usadas nos monitoramentos nem sempre são aquelas usadas nos limites básicos primários e secundários; neste caso torna-se necessário o uso de um modelo dosimétrico capaz de relacionar a grandeza física medida com as grandezas físicas usadas nos limites básicos. Estes modelos algumas vezes são simples como no caso do dosímetro portado sobre o tronco do corpo e relacionado com a dose equivalente efetiva ou índice de dose equivalente; em outros casos os modelos são complexos como na medida da contaminação de superfície relacionada com os limites básicos e que podem envolver os movimentos do trabalhador, geometria de irradiação, vias de irradiação, etc.

Tanto os limites básicos primários como os secundários são estabelecidos pela autoridade competente do País. Os limites básicos primários, atualmente, em vigor para o trabalhador e para o indivíduo do público encontram-se na Tabela 2.1 e foram extraídos da norma nacional⁽³⁾.

Tabela 2.1: Limites básicos primários anuais de dose equivalente

| Dose Equivalente | Trabalhador | Indivíduo do Público |
|---|-------------|-------------------------|
| Dose equivalente efetiva | 50 mSv | 1 mSv |
| Dose equivalente para o órgão ou tecido T | 500 mSv | 1 mSv/w _T ** |
| Dose equivalente para a pele | 500 mSv | 50 mSv |
| Dose equivalente para o cristalino | 150 mSv | 50 mSv |
| Dose equivalente para as extremidades* | 500 mSv | 50 mSv |

*Extremidades são: mãos, antebraços, pés e tornozelos;

w_T** Fator de ponderação para o tecido ou órgão T.

b) Limites derivados

Estes limites são estabelecidos pelos serviços de radioproteção e geralmente são expressos numa grandeza física diferente daqueles usados nos limites básicos.

Por meio de um modelo, procura-se refletir o limite básico numa situação específica de um determinado local de trabalho. A relação quantitativa entre a grandeza medida, num programa de monitoramento, e os limites anuais, ou limites autorizados, depende da exatidão do modelo escolhido para representar a situação real e em que grau o modelo representa o limite derivado. Um exemplo, já citado, é o limite derivado escolhido para a contaminação de superfície. Se o limite derivado escolhido refletir uma situação mais geral, ele será mais usado, enquanto que se refletir uma situação mais específica ele será mais realista. Em virtude deste fato e de que a proteção radiológica deve ser eficaz e econômica na escolha de um limite derivado, parte-se do limite derivado mais geral em direção a um limite derivado mais específico.

A finalidade do limite derivado é estabelecer um quadro cuja aderência fornecerá uma certeza virtual da obediência aos limites básicos ou limites ALARA. Se ocorrer uma falha quanto à obediência ao limite derivado, isto não implicará, necessariamente, em doses maiores do que os limites básicos anuais, mas significará que houve falha na obtenção dos padrões de proteção pretendidos. Neste caso deve-se empreender uma ação remediadora, sempre que praticável, ou uma modificação no sistema de operação, ou ainda a adoção de um novo limite derivado. Para este último caso deve-se lembrar que para a manutenção da confiança no significado do limite derivado, as modificações não devem ser nem levianas e nem freqüentes.

c) Limites operacionais

O que foi esclarecido para os limites derivados vale, também, para os limites operacionais. A única diferença é que os limites operacionais são estabelecidos pela direção da instalação e não pelo serviço de radioproteção.

d) Limites otimizados

Os limites otimizados são limites originados das maiores doses previstas pela opção otimizada de proteção radiológica, isto é, aquela que satisfaz ao princípio ALARA.

Na realidade, o limite otimizado é sempre cerca de 20 a 25% maior do que as doses previstas pela opção de radioproteção ALARA. Este tipo de limite é estabelecido para evitar que pequenas variações nas doses levem à aderência aos limites.

e) Limites vinculados

Os limites vinculados são estabelecidos pela autoridade competente do país e são sempre inferiores aos limites básicos. Eles se destinam a uma determinada atividade ou a uma determinada categoria de profissionais, como por exemplo gamagrafia ou categoria dos enfermeiros.

f) Limites autorizados

Os limites autorizados são estabelecidos pela autoridade competente do país, são sempre inferiores aos limites básicos e sempre prevalecem sobre estes últimos, nos casos aos quais eles são aplicados.

Os limites otimizados podem se tornar limites autorizados, pela autoridade competente e os limites vinculados são, também, limites autorizados.

2.4 Descrição dos tipos e funções do monitoramento

A principal maneira de se avaliar o controle das irradiações e, desta forma, comprovar a adequação das condições de trabalho em instalações radiativas ou nucleares é por meio da realização de medidas que forneçam as informações sobre a irradiação de trabalhadores e de indivíduos do público. Estas medidas recebem o nome de monitoramentos. Assim sendo, o monitoramento tem o propósito claro de mostrar que as condições de segurança desejada são adequadas e de comprovar que elas continuam adequadas com o transcorrer do tempo ^(10, 20, 21, 22, 23, 24 e 25).

Os resultados dos monitoramentos devem ser interpretados em relação às normas e aos regulamentos de radioproteção pertinentes; devem também

fornecer informações que permitam estimar a irradiação em termos das mesmas grandezas em que foram estabelecidos os limites básicos de dose equivalente nos órgãos e tecidos e de dose efetiva.

A utilização dos monitoramentos para um programa de proteção radiológica será tanto mais proveitosa quanto melhor forem definidos, por meio de um projeto de programa de monitoramento, seus objetivos e os fundamentos para a interpretação de seus resultados.

Um programa de monitoramento deve ter objetivos claramente definidos e registrados, que deverão ser cumpridos de forma efetiva e econômica. É importante a orientação sobre os assentamentos e apontamentos associados, inclusive sobre o descarte destes registros. É necessário ainda que o programa de monitoramento seja revisto periodicamente e sempre que ocorrerem alterações nas operações executadas na instalação ou devido a recomendações e exigências de normas e regulamentos de radioproteção.

O monitoramento pessoal^(10,18,19) é composto pelo monitoramento do local de trabalho e pelo monitoramento individual, sendo que ambos estão divididos, de acordo com sua função, em três: Controlador, Operacional e Interventor.

O objetivo do monitoramento dos locais de trabalho é fornecer informações sobre as condições gerais do ambiente de trabalho. Já o monitoramento individual tem como objetivo estimar a dose equivalente média sobre um órgão ou tecido; ou a dose efetiva ou ainda a incorporação de material radioativo. Pode-se obter este objetivo por meio da execução e interpretação dos resultados de medidas feitas com equipamentos portados pelos trabalhadores ou por meio de medidas

da quantidade de material radioativo depositados em seus corpos, excretas ou fluidos.

O monitoramento tem função controladora quando, como no caso do monitoramento do local de trabalho, avalia a dose que será recebida pelos trabalhadores que permanecem na área ou quando se quer mostrar que as condições de proteção não foram alteradas com o transcorrer do tempo, ação auditora. No caso do monitoramento individual, a função controladora estima a dose dos trabalhadores. As palavras avaliar as doses e estimar as doses serão usadas com o significado definido pelo OIEA⁽¹⁸⁾.

O monitoramento tem função operacional quando é realizada com o objetivo de evitar, detectar e possibilitar a introdução das primeiras medidas em desvios de situações normais de trabalho. Portanto, não visa avaliar ou estimar a dose do trabalhador, que é função do monitoramento controlador, e sim evitar que o trabalhador venha a receber dose desnecessária em caso de desvios das condições normais. Como os desvios das condições de trabalho só podem ser provocados de duas maneiras distintas, a saber: por falha humana ou por falha do equipamento, o indivíduo presente é o trabalhador. Assim sendo, esta função do monitoramento deve ser efetuado por ele, sob treinamento prévio e orientação do grupo de proteção radiológica. Neste caso, o equipamento de proteção radiológica, necessário para cumprir esta função do monitoramento, pertence à instalação mesmo que seja adquirido e às vezes instalado (equipamento fixo ou móvel) sob orientação e aprovação do serviço de radioproteção.

O monitoramento para a função interventora pode ser realizado tanto em situações normais de trabalho como em situações anormais reais, portanto já

ocorridas. Sua função primordial é procurar resolver problemas e por isso tem objetivos e prazos bem definidos. Uma vez solucionado o problema, ou restabelecida a situação de normalidade, o monitoramento é eliminado.

O monitoramento individual constitui um método simples, barato e de fácil interpretação que permite verificar o controle das condições de trabalho e os resultados de mudanças operacionais. Da mesma forma, pode-se recorrer ao monitoramento do local de trabalho caso as técnicas ou instrumentos usados para estimar as doses equivalentes ou as incorporações individuais não sejam confiáveis. Desta maneira, pode-se dizer que o monitoramento do local de trabalho tem um caráter preventivo, uma vez que avalia as doses de radiação dos trabalhadores antes que elas sejam recebidas, enquanto que o monitoramento individual tem caráter confirmatório, pois estima as doses após terem sido recebidas pelos trabalhadores.

Desta forma, é função do monitoramento fornecer as informações necessárias para se avaliar e se estimar a dose de radiação recebida pelos trabalhadores em termos daquelas grandezas em que foram expressos os limites anuais básicos. Isto é realizado em duas etapas, a saber:

- a) a medida que leva a um resultado; e
- b) a interpretação do resultado.

A medida do monitoramento nem sempre é realizada nas grandezas físicas em que são expressos os limites anuais básicos; por meio de um modelo obtém-se o resultado desejado. Desta maneira, pode-se dizer que o modelo tem a função de descrever de forma quantitativa a relação entre grandezas medidas e

aquelas que se desejam avaliar ou estimar. O modelo é um requisito para a seleção adequada dos procedimentos de medida.

Este modelo está baseado em suposições selecionadas de modo a assegurar que os riscos de subestimar a dose de radiação de um indivíduo sejam aceitavelmente pequenos.

Se o uso de um modelo mais geral indicar que o padrão de radioproteção é ou poderá ser excedido, deve-se adotar um novo modelo. O novo modelo deverá estar baseado em novas suposições que reflitam a situação real com maior exatidão e deve manter pequeno o risco de sub ou superestimar a dose de radiação.

A interpretação dos resultados do monitoramento, já representado nas grandezas físicas usadas nos limites anuais básicos, só deve ser realizada numa primeira instância quando as doses estimadas forem superiores a 3/10 dos limites anuais básicos para trabalhadores considerando a fração de tempo usada no resultado; e, em segunda instância, quando todas as doses forem inferiores aos 3/10 e superiores a 1/10 dos limites anuais. Interpretar significa avaliar as causas que resultam nestas doses, formular os cenários de proteção que podem abaixar os valores das doses, avaliando os custos e as novas doses. Por fim, interpretar significa ainda aplicar as técnicas de ajuda para a tomada de decisão para determinar o cenário de proteção ótimo a ser implementado.

Os monitoramentos têm como funções complementares à reavaliação do programa de monitoramento a determinação do perímetro dos locais de trabalho restritos e o auxílio à supervisão médica dos trabalhadores, com relação a sua forma e intensidade.

A reavaliação do programa de monitoramento deve ser feita periodicamente e sempre que as condições de trabalho forem alteradas. Nesta reavaliação devem ser analisadas a necessidade, o tipo, a freqüência e a extensão das medidas, de forma a assegurar que os esforços do monitoramento estão bem distribuídos. A experiência adquirida ajudará na identificação dos bons e maus aspectos dos procedimentos de operação e das características do projeto do programa.

Os resultados do monitoramento podem ser usados para a definição de locais restritos, onde existe a presença de fontes de radiação que provoquem apenas exposição externa à radiação ionizante. Para locais com risco de contaminação de superfícies e do ar, os limites dos locais controlados serão estabelecidos em função da probabilidade de contaminação e não de sua presença real. Nesses casos, a experiência adquirida em monitoramentos anteriores poderá nortear a tomada de decisão.

Como as informações relativas a doses equivalentes, incorporações prováveis e condições gerais do local de trabalho, obtidas por meio de monitoramentos, afetam a forma e a intensidade da supervisão médica dos trabalhadores, elas devem ficar à disposição da supervisão médica.

A finalidade do monitoramento é avaliar o controle das exposições às radiações ionizantes. Desta maneira, a principal justificativa de um programa de monitoramento é mostrar como auxilia na obtenção de um padrão de segurança adequado e comprovar que as condições de trabalho continuam adequadas com o transcorrer do tempo. O monitoramento pode ter outras justificativas secundárias como será visto adiante, mas elas não substituem a justificativa

principal. Como o monitoramento deve ser realizado de maneira eficaz e econômico, se não houver a justificativa principal não deve haver monitoramento, isto é, as justificativas secundárias não podem substituir a justificativa principal.

Existem três tipos de monitoramento de área, a saber:

- a) monitoramento de área para radiação externa;
- b) monitoramento de área para contaminação de superfície; e
- c) monitoramento de área para contaminação do ar.

Existem ainda três tipos de monitoramento individual, a saber:

- a) monitoramento individual para radiação externa;
- b) monitoramento individual para contaminação de pele e roupas; e
- c) monitoramento individual para contaminação interna.

Nem sempre é necessário efetuar todos estes tipos de monitoramentos, como mostra alguns exemplos práticos a seguir.

Se a fonte selada de radiação ionizante for emissora de radiação gama ou raios X, dificilmente conseguirá produzir materiais radioativos e então o monitoramento de área para radiação externa será suficiente. Se os valores das doses individuais previstos forem superiores aos 3/10 dos limites anuais será necessário o monitoramento individual para radiação externa. Se por outro lado os campos de radiação forem constantes, a não ser no caso em que houver grandes modificações de projetos, pode-se prescindir do monitoramento de área para radiação externa e manter o monitoramento individual para radiação externa.

O monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície só se torna necessário em materiais ativados por irradiação e que podem produzir contaminações ou em fontes não seladas. A finalidade do monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície é demonstrar que a contenção primária do material radioativo tem um padrão elevado de segurança e mostrar que há ausência de contaminação acima de um determinado valor. Não existe, também, uma correlação direta entre a contaminação de superfície e a irradiação dos trabalhadores, tornando a avaliação da dose recebida por estes extremamente difícil. Em virtude disto o monitoramento para contaminação de superfície visa demonstrar que há ausência de contaminação interna do trabalhador e que o monitoramento do ar ou individual interno é desnecessário. Portanto, a sua utilidade é a de servir como um indicador da eficácia da contenção do material radioativo, tanto no passado quanto no presente.

O monitoramento do local de trabalho para a contaminação do ar, geralmente, só é necessário quando são manuseados quantidades milhares de vezes superiores aos limites de incorporação anuais. O monitoramento do ar pode ser substituído, dependendo das circunstâncias, pelo monitoramento do local de trabalho para irradiação externa ou para contaminação da superfície ou ainda pelo monitoramento individual interno. A sua finalidade é manter os valores de contaminação do ar ambiente de um local de trabalho inferiores aos padrões de proteção radiológica e valores de referência, visando evitar o monitoramento individual interno. Para atender a esta finalidade, os seus principais objetivos são:

- a) avaliar a maior quantidade de material radioativo provável de ser inalado pelos trabalhadores;

- b) evidenciar as contaminações inesperadas no ar, para proteger o trabalhador e instituir medidas protetoras; e
- c) fornecer informações para planejar o monitoramento individual interno.

A implementação de cada um destes objetivos depende da disponibilidade e extensão do monitoramento individual para a contaminação interna.

O monitoramento do ar, às vezes, pode ser útil unicamente como um aviso antecipado de eventuais contaminações internas.

A contaminação da pele e de roupas contribui para a irradiação do corpo humano pela irradiação externa e irradiação interna se for absorvida abaixo da camada superficial da pele. A determinação das doses resultantes das irradiações externas e internas é muito difícil de ser conseguida pois as contaminações não são uniformes e ocorrem em certas partes do corpo, principalmente, nas mãos. Em virtude disto, procura-se estabelecer limites derivados ou autorizados de contaminação, da pele e das roupas, inferiores ao valor de registro, isto é, para doses individuais inferiores a 1/10 dos limites anuais para a pele. Neste caso, se forem obedecidos os limites derivados ou autorizados não é necessário determinar-se a dose equivalente. As determinações destas doses são pouco precisas e às vezes as incertezas chegam a ser de duas a três ordens de grandeza, principalmente, se a radiação for absorvida abaixo da camada superficial da pele. Neste caso, as estimativas devem ser encaradas como qualitativas e consideradas separadamente do monitoramento convencional para radiação externa.

A avaliação da necessidade de um monitoramento individual interno pode ser obtido pelos resultados do monitoramento do ar e pela experiência anterior, em operações similares. Em virtude destas dificuldades, as normas internacionais da CIPR fornecem em apêndice uma orientação ⁽¹⁰⁾.

Há necessidade de um monitoramento individual interno com função interferente quando os resultados do monitoramento do local de trabalho indicam que pode ter ocorrido incorporações significativas ou quando os trabalhadores forem envolvidos em acidentes com incorporações significativas de material radioativo. Existem testes simples de verificação desta necessidade como a medida da pele, das roupas e do muco nasal.

O monitoramento individual interno com função controladora pode ser dispensado pelo monitoramento do local de trabalho nos seguintes casos:

- a) as condições de trabalho são satisfatórias, confirmadas pelo monitoramento controlador do local de trabalho;
- b) as deteriorações das condições de trabalho são lentas e podem ser detectadas com medidas esporádicas de amostras adequadas. Estas medidas não visam determinar as doses equivalentes individuais e sua frequência é determinada pelas condições de trabalho; e
- c) os materiais possuem meias vidas efetivas muito curtas.

2.5 Descrição dos equipamentos de proteção radiológica utilizados nos vários tipos e funções do monitoramento

Este item será dividido em seis partes de acordo com os três tipos de monitoramento do local de trabalho e os três tipos de monitoramento individual. Além disso, para cada tipo de monitoramento, os equipamentos são construídos especificamente para determinadas funções mesmo que um mesmo equipamento possa ser utilizado para mais de uma função, o que obriga fazer uma distinção, também, quanto a sua função. Por isso, neste item será apresentado apenas um resumo sobre esse assunto, sendo que maiores detalhes podem ser obtidos na literatura existente ^(10, 18, 20, 24 e 25).

2.5.1 Monitoramento do local de trabalho para radiação externa

Se o monitoramento tiver função controladora, geralmente, são utilizados equipamentos portáteis e excepcionalmente equipamentos móveis ou fixos. Os equipamentos móveis ou fixos são indicados quando podem ocorrer variações rápidas e imprevisíveis a valores alarmantes no campo de radiação.

No monitoramento com função operacional acontece o oposto. Geralmente, são usados monitores móveis e fixos; raramente são utilizados monitores portáteis. Estes últimos são utilizados quando as operações do trabalhador não influenciam o campo de radiação.

Os tipos de instrumentos mais utilizados, para radiações X, gama e beta, são os contadores Geiger-Müller e as câmaras de ionização, enquanto que para radiação alfa e feixes de nêutrons são mais utilizados os contadores

proporcionais. Para detecção das radiações alfa são, também, utilizados os contadores Geiger-Müller e detectores de cintilação. Para feixes de nêutrons e todos os outros tipos de radiação, exceto radiação alfa, poderá ser ainda utilizado os dosímetros termoluminescentes.

2.5.2 Monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície

Já foi mencionada a dificuldade de se avaliar a dose dos trabalhadores devido à contaminação de superfície, e também como contornar esse problema. Desta forma, a função controladora deste tipo de monitoramento tem, via de regra, caráter auditor. O equipamento mais utilizado é o detector tipo panqueca, que detecta contaminação de superfície. Neste caso, mede-se uma fração representativa da superfície de uma área supostamente contaminada de forma direta ou ainda empregando o método indireto por meio da técnica do teste de esfregação, supondo a remoção de 10% da contaminação⁽³⁾. Um método complementar é fazer uso de equipamentos de detecção tipo portal, geralmente colocados na entrada dos vestiários para quem sai dos laboratórios. No caso de deteriorações lentas ou pequenos derrames de material radioativo, como método alternativo pode-se analisar os valores de contaminação em panos de chão, sacos de aspiradores, outras superfícies nas áreas de saída, sapatos, luvas, bolsos etc. Este método alternativo não detecta a ocorrência isolada de pequenas quantidades de material radioativo e não permite uma estimativa qualitativa dos valores de contaminação, mas fornece uma indicação genérica dos valores da contaminação.

O monitoramento da contaminação de superfície com função operacional tem como objetivo, durante o desenvolvimento da atividade, evitar a contaminação e no caso de uma ocorrência, limitar a sua dispersão. O monitoramento com função operacional é muito útil em contenções parciais, como por exemplo em capelas. De certo modo, pode-se dizer que o monitoramento com função operacional complementa o monitoramento com função controlador. Para a sua execução deve ser mantida, à disposição do trabalhador, equipamentos de monitoramento como panqueca, que são portáteis, ou equipamentos de bancada, geralmente, móveis. O trabalhador deve inspecionar os itens que saem das áreas restritas.

2.5.3 Monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar

A técnica mais comum para o monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar com função controladora para operações singulares é o uso de amostradores de ar instalados em locais escolhidos e representativos das zonas de respiração dos trabalhadores. Geralmente, o amostrador de ar é constituído por uma bomba aspiradora de ar, com vazão conhecida e um filtro do tipo Millipore capaz de coletar aerossóis até um diâmetro aerodinâmico médio especificado ou um filtro de carvão ativado para gases e vapores. Este filtro deve ser posicionado nas zonas de respiração dos trabalhadores para simular as narinas. A contaminação dos filtros é medida em laboratório. No caso de operações variadas existe a necessidade de se fazer amostragens nas diferentes etapas das operações e fazer a avaliação da incorporação total para cada trabalhador durante um ciclo completo de operações.

No caso da função operacional, a técnica mais comum é o uso de amostrador de ar com detecção contínua, pois fornece um aviso em variações súbitas nos valores da concentração no ar. Diferentemente dos anteriores ele possui, próximo aos filtros um contador que já fornece o acúmulo de material radioativo nos filtros; geralmente possui dois valores de alarme que pode ser ajustado pelo interessado. Este amostrador de ar contínuo deve ser posicionado em locais onde poderá detectar, de forma confiável, uma liberação de material radioativo em grandes quantidades.

Quando existe a possibilidade de ocorrer contaminação inesperada no ar; atípica ao monitoramento da contaminação do ar com função interferente, faz-se uso de amostrador de ar individual portado pelo trabalhador próximo à zona de respiração.

2.5.4 Monitoramento individual para radiação externa

No caso do monitoramento com função controladora deve-se optar por um dosímetro que meça a dose equivalente na superfície e a 1 cm de profundidade no tecido. Para as radiações X, gama e beta a seleção básica recai no dosímetro termoluminescente com e sem a utilização de filtros. Existe uma seleção alternativa de dosímetros capazes de medir a dose equivalente na superfície e a 1cm de profundidade com discriminador para indicar o tipo e a energia da radiação, como exemplos existem os dosímetros termoluminescentes e o histórico fotográfico com multielementos. Deve ser lembrado que estes dosímetros discriminadores para as radiações X e gama são eficientes para energias

inferiores a 300 keV, com utilização do filtro de chumbo e atuam utilizando o efeito fotoelétrico de interação.

Estes dosímetros, também, são úteis para estimar a dose equivalente em caso de acidente, uma vez que eles conseguem medir até cerca de 20 Gy.

No caso do monitoramento com função operacional, indica-se, para radiações X e gama, o uso de medidores de taxa de dose com função integradora ou não, mas com sinais de aviso sonoros ou visuais. Os sonoros são os preferíveis, pois evitam a possibilidade do trabalhador esquecer-se de visualizar os sinais de aviso. Estes medidores possuem pouca exatidão, mas boa confiabilidade e as normas internacionais recomendam que não são necessários outros dosímetros, a não ser que sejam exigidos pelo Plano de Emergência Radiológica, PER. Por isso devem ser justificados^(10,18).

2.5.5 Monitoramento individual para contaminação de pele e roupa

Como exposto anteriormente, é muito difícil estimar a dose externa e interna, resultante da contaminação de pele e roupa. Assim sendo, procura-se manter as doses inferiores aos valores de registro, isto é, inferiores a 1/10 dos limites anuais.

No caso do monitoramento com função operacional são usados vários equipamentos. Um deles é o detector móvel de bancada para detectar contaminação de superfície, geralmente, utilizado dentro do laboratório. O detector deve ser passado bem próximo à pele e à roupa. Um outro detector

utilizado é o de pés, mãos e roupa. Geralmente, é fixo e colocado em local conveniente. Um terceiro detector é o tipo portal fixo e instalado na entrada dos vestiários, para quem sai do laboratório. Sua função principal é detectar contaminações nos trabalhadores evitando que sejam transferidas para áreas inativas.

2.5.6 Monitoramento individual para contaminação interna

Os métodos para o monitoramento individual para contaminação interna, tanto com função controladora como com função interferente são os mesmos e são descritos a seguir:

- a) medidas in vivo, neste caso a avaliação dos radionuclídeos presentes no corpo é feita por meio de medidas externas, com uso de contadores de corpo inteiro ou de corpo parcial; e
- b) medidas in vitro, neste caso a avaliação é realizada pela análise de excretas ou fluidos do corpo. Geralmente, faz-se a análise de urina e excepcionalmente de fezes.

A escolha do método, in vivo ou in vitro, depende do tipo das radiações emitidas pelo material contaminante. Normalmente, para radiações X e gama, usa-se as medidas in vivo e para os demais tipos de radiações as medidas in vitro. Muitas vezes, a escolha entre os dois métodos depende da facilidade de acesso ao serviço de monitoramento; às vezes pode ser mais fácil enviar amostras para análise do que o trabalhador deslocar-se até o local onde se encontra o equipamento de medida.

2.6 Princípios básicos para a seleção dos pontos de monitoramento e do pessoal que necessita de monitoramento individual e determinação de suas frequências

Este item, também, será dividido em seis partes e deverá ser examinado de forma sucinta cada função do tipo de monitoramento do local de trabalho e os três tipos de monitoramento em exame. Maiores detalhes podem ser obtidos na literatura existente (10, 18, 24, 25).

2.6.1 Monitoramento do local de trabalho para radiação externa

No caso do monitoramento do local de trabalho para radiação externa com função controladora, para a determinação dos pontos de monitoramento deve-se inicialmente realizar um exame completo e detalhado da instalação quando ela é nova; no caso da instalação já existir, quando colocada em funcionamento ou ainda quando qualquer mudança de envergadura possa ter sido ou tenha sido executada.

Deve ser lembrado que os pontos de medida devem ser representativos das posições ocupadas pelos trabalhadores durante as situações normais de operação.

A frequência dos monitoramentos deve ser determinada pela variação dos campos de radiação.

- a) Se as variações do campo de radiação só puderem ocorrer no caso em que haja grandes alterações no equipamento de proteção ou nos procedimentos de trabalho, então o monitoramento raramente é necessário e quando o for, deverá ser efetuado com propósitos de comprovação, isto é, como uma auditoria, como exemplo os medidores de nível ou de espessura.
- b) Quando as variações no campo de radiação são lentas e não são graves, então o monitoramento deverá ser periódico ou mesmo ocasional. Um exemplo típico é uma cela de processamento químico na qual em virtude de ácidos e outros materiais corrosivos, as fugas de radiação aumentam com o transcorrer do tempo.
- c) No caso onde as variações no campo de radiação são rápidas, imprevisíveis e a valores alarmantes, então o monitoramento deverá ser contínuo e tornam-se úteis, na maioria dos casos, equipamentos fixos ou móveis. Um exemplo típico é um reator nuclear.

Para o monitoramento com função operacional deve-se selecionar, cuidadosamente, os pontos que detectam o início de uma situação anormal, tendo em vista que não há a necessidade da presença de trabalhadores nestes pontos.

A complicação que pode existir no monitoramento com função operacional é a presença da radiação beta, pois pode haver uma grande variação na taxa de dose beta sem alteração significativa naquela causada pelas radiações X e/ou gama.

A frequência dos monitoramentos depende da influência das operações a serem realizadas no campo de radiação.

- a) Quando as operações do trabalhador não influenciam o campo de radiação deverá ser realizado um levantamento preliminar da taxa de dose na região a ser ocupada pelo trabalhador, sendo que este levantamento poderá ser repetido antes de cada série de operações, como exemplo tem-se a gamagrafia industrial.
- b) Nos casos onde os campos de radiação são variáveis ou influenciados pelas operações do trabalhador, o monitoramento deverá ser contínuo durante a operação. Exemplos típicos são os reatores nucleares e os laboratórios de reprocessamento químico dos elementos combustíveis do reator.

2.6.2 Monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície

No monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície, tanto para a função controladora, que tem caráter de auditoria, como para a função operacional, que tem função de evitar, detectar e tomar as primeiras medidas a frequência do monitoramento deverá ser estabelecida pela prática e dependerá da frequência de itens que saem do local de possível contaminação, bem como da seleção dos principais itens a serem monitorados.

2.6.3 Monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar

No monitoramento com função controladora em que são utilizados amostradores de ar, instalados em locais representativos das zonas de respiração dos trabalhadores, deverão ser operados sempre que houver a presença de trabalhador e durante todo o tempo de permanência dele no local. Isto vale tanto em operações singulares como em um ciclo completo de operações.

No caso do monitoramento com função operacional os equipamentos de detecção já operam continuamente e portanto a frequência é contínua. Já para o monitoramento com função interferente o trabalhador deverá usar o amostrador individual de ar sempre que adentrar em local que necessite o uso deste equipamento e durante todo o tempo que permanecer nele.

2.6.4 Monitoramento individual para radiação externa

No caso do monitoramento com função controladora a frequência é mensal por exigência das normas nacionais ⁽³⁾. Para o monitoramento com função operacional, se o dosímetro usado for o de aviso tipo visual, o usuário deverá fazer sua leitura antes de entrar na área restrita e durante intervalos definidos, enquanto permanecer no local ou durante e no fim de cada operação crítica em que o campo de radiação possa ter-se alterado. Não é o caso do dosímetro de aviso sonoro, onde ele próprio se encarrega de avisar quando ocorre uma variação no campo de radiação, alterando a velocidade de emissão dos sons.

A CIPR⁽¹⁰⁾ fornece alguns critérios para a seleção dos trabalhadores que necessitam de monitoramento individual para radiação externa, caso só se possua os valores do monitoramento de área, mas não os individuais. Serão expostos resumidamente, a seguir.

2.6.4.1 Emissores de radiação gama - Irradiação de corpo inteiro

Premissas: Limite anual: 50 mSv a^{-1}

Distância entre a fonte e o tronco do corpo: 1 m, pois se supõe 70 cm de comprimento entre braço, antebraço e mão; mais 30 cm fazendo uso de pinças ou garras.

Carga de trabalho anual: 2.000 ha^{-1} .

Como o monitoramento individual é exigido para os valores de doses acima dos 3/10 dos limites anuais tem-se: $(3 \times 50.000 \mu\text{Sv a}^{-1}) + (10 \times 2.000 \text{ ha}^{-1}) = 7,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$. De forma aproximada, a intensidade de uma fonte emissora de radiação gama em unidades de taxa de energia radiante⁽²⁶⁾, os $7,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ correspondem a algo maior do que 50 MBq.MeV (aproximadamente 1 mCi.MeV), exemplos: ^{131}I , energia gama $\bar{E}_\gamma = 0,364 \text{ MeV}$, 100%. A atividade limítrofe para a necessidade do monitoramento individual será: $X.\text{mCi}.0,364\text{MeV}.1 = 1 \Rightarrow X.\text{mCi} = 1/0,364 \cong 3 \text{ mCi}$, ^{60}Co , energia gama $\bar{E}_{\gamma,1} = 1,17 \text{ MeV}$, 100% e $\bar{E}_{\gamma,2} = 1,33 \text{ MeV}$, 100%. A atividade limítrofe para a necessidade de monitoramento individual será: $X.\text{mCi} (1,17 \text{ MeV}.1 + 1,33 \text{ MeV}.1) = 1$ ou $X.\text{mCi}.2,50 \text{ MeV} = 1 \Rightarrow X.\text{mCi} = 1/2,50 = 0,4 \text{ mCi}$.

2.6.4.2 Emissores de radiação gama – Irradiação das mãos

Premissas: Limite anual: $0,5 \text{ Sva}^{-1}$

Distância entre a fonte e as mãos: 30 cm, com comprimento das pinças ou garras.

Solução:

Como a dose varia com o inverso do quadrado da distância, quando é reduzida a distância de 1 m para 30 cm, a dose aumenta de um fator 11, mas o limite anual aumenta de um fator 10; portanto pode ser mantida a mesma regra utilizada para irradiação de corpo inteiro, isto é: 50 MBq.MeV (cerca de 1 mCi.MeV).

2.6.4.3 Emissores de radiação beta, com e sem a presença de radiação gama

A taxa de dose equivalente beta, por unidade de atividade, pode ser algumas dezenas de vezes maiores do que aquela fornecida pela radiação gama. Por outro lado, o limite anual para a pele e as mãos é 10 vezes maior do que para o corpo inteiro. Portanto, a atividade de 50 MBq pode causar doses na pele e nas mãos superiores aos $3/10$ dos limites anuais. Para a radiação beta de energia pequena $\bar{E}_\beta < 0,3 \text{ MeV}$, há maior absorção na própria fonte e no ar e portanto obedece os $3/10$ dos limites anuais.

Portanto a solução é: emissores beta (com ou sem a presença da radiação gama): $\bar{E}_{\beta,\text{max}} > 0,3 \text{ MeV}, 5 \text{ MeV}$ e $\bar{E}_{\beta,\text{max}} \leq 0,3 \text{ MeV}, 5 \text{ MeV}$

2.6.5 Monitoramento individual para contaminação de pele e roupas

No caso do monitoramento com função controladora o que se procura é não ultrapassar o valor de registro para evitar o cálculo, extremamente difícil, das doses externa e interna. Já no caso do monitoramento com função operacional, quando estiver em uso o equipamento móvel de bancada, para contaminação de superfície, o trabalhador deverá monitorar-se de forma similar àquela descrita para o dosímetro de aviso visual. Quando estiver em uso o monitor de pés, mãos e roupas, o trabalhador deverá agir como no caso do dosímetro de aviso visual, tanto para os casos onde o monitor se encontra no ambiente de trabalho ou na entrada e saída deste ambiente, como nos casos onde o monitor se encontra localizado externamente.

Por fim, quando estiver em uso o portal e for colocado na entrada do vestiário para quem sai do local de trabalho, o trabalhador deverá monitorar-se sempre que acessar este vestiário.

2.6.6 Monitoramento individual para contaminação interna

No caso do monitoramento individual para contaminação interna, tanto na função controladora como na função interferente e para os dois métodos de medida, in vivo e in vitro, a frequência da medida é influenciada pelo modelo de distribuição no corpo da substância, que contém o material radioativo com o transcorrer do tempo, com o tempo de residência do agente contaminante

incorporado e pela sensibilidade de detecção com relação aos valores derivados de investigação e de registro pertinentes.

A frequência das medidas controladoras para estimar a incorporação ou a dose deve ser de forma que permita a detecção de todas as incorporações significativas. O maior problema reside nos materiais que possuem meia vida efetiva longa, onde tanto as medidas in vivo como as in vitro não detectam o limite de incorporação anual, LIA. O monitoramento individual interno não permite detectar, antecipadamente, condições insatisfatórias do local de trabalho e então a frequência é ditada pelo crescimento, a longo prazo, do material radioativo incorporado. Até chegar-se ao limiar de detecção o problema deve ser resolvido pelo monitoramento do local de trabalho.

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA DE MONITORAMENTO NO PRÉDIO DO CÍCLOTRON

Para implementar o programa de monitoramento no prédio do ciclotron foi necessário realizar uma análise de cada dependência da instalação, das atividades executadas pelos trabalhadores, do histórico de doses de cada trabalhador e dos radioisótopos produzidos e manuseados na instalação.

3.1 Condições radiológicas ambientais

Para determinar as energias das radiações gama e raios X, existentes em cada uma das 14 dependências do prédio do ciclotron utilizou-se o Analisador Multicanal portátil digital, detector cintilador NaI(Tl), modelo Safespec, marca Eurisy Mesures, Figura 3.1. Possui as seguintes especificações: 2048 canais, com faixas de seleção de 512 a 2048 canais; opera com baterias recarregáveis ou não; com baterias alcalinas tem duração de 36 horas; mede 36 cm de comprimento e pesa 550 g com as baterias.



Figura 3.1: Analisador multicanal portátil digital

Nas dependências I, II, III, IV, V, VI, VIII, XI, XII, XIII e XIV, foi medido um amplo espectro de radiação gama, com um pico não bem definido, em 511 keV, Figura 3.2. Trata-se de radiação gama espalhada pelo efeito Compton originado nos feixes de radiação do próprio cíclotron. Isto ocorre em todas as dependências; os espectros apresentam apenas uma pequena variação na intensidade.

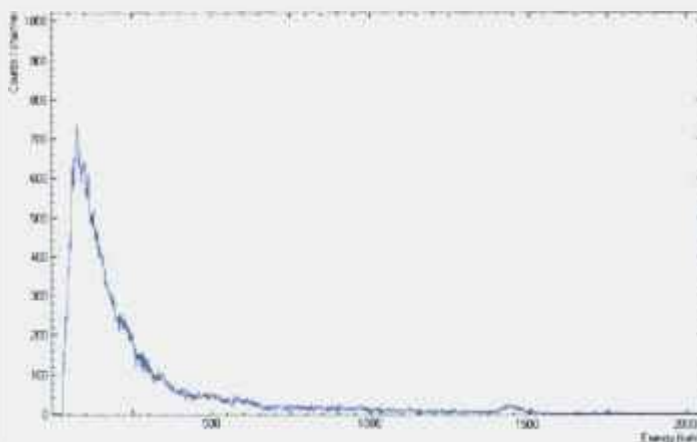


Figura 3.2: Espectro de energias medido nas dependências I, II, III, IV, V, VI, VIII, XI, XII, XIII e XIV

Na dependência VII foi medido um espectro de radiação gama, muito bem definido, em 511 keV, Figura 3.3. Trata-se de radiação beta+ devido ao efeito de produção de pares e este espectro foi obtido com a presença do alvo irradiado e com o cíclotron desligado.

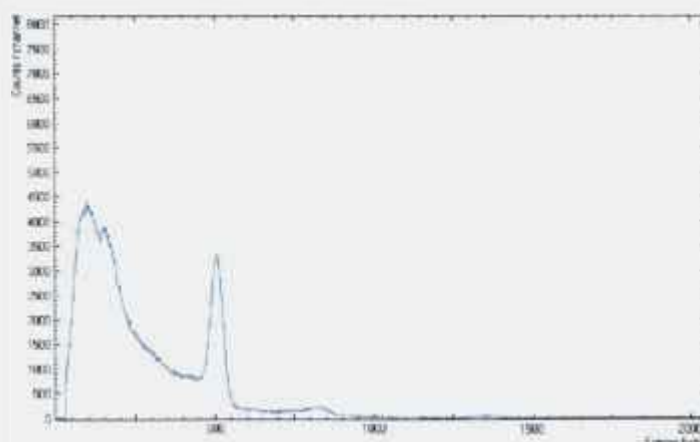


Figura 3.3: Espectro de energias medido na dependência VII

Na dependência X, na posição contígua à dependência VII, foi encontrado um espectro de radiação gama, muito bem definido em 511 keV, Figura 3.4, com o ciclotron em operação.

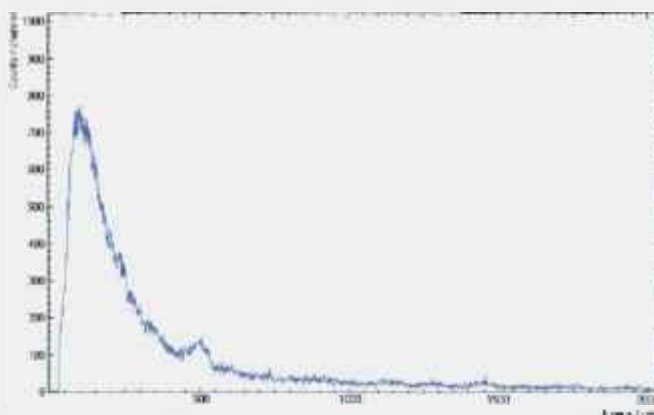


Figura 3.4: Espectro de energias medido na dependência X

Na dependência IX foram medidos dois espectros de radiação gama, sendo um muito bem definido em 511 keV, Figura 3.5, sem a presença de alvos e com o ciclotron operando. Já um outro apresenta quatro picos, Figura 3.6, com 160 keV, 551 keV, 650 keV e 810 keV, não muito bem definidos e com a presença de alvos de I-123 e F-18. As energias dos alvos coincidem com os picos de energias medidos de 160 keV e 511 keV. A energia de 650 keV é devido a presença de Mn-52 que tem uma energia de 648 keV, já a energia de 810 keV é devido a presença de Co-58 que tem energia de 811 keV.

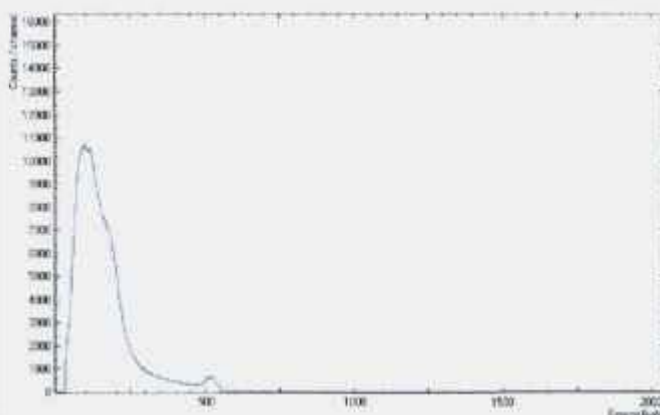


Figura 3.5: Espectro de energias medido na dependência IX, com o ciclotron em operação e sem a presença de alvos

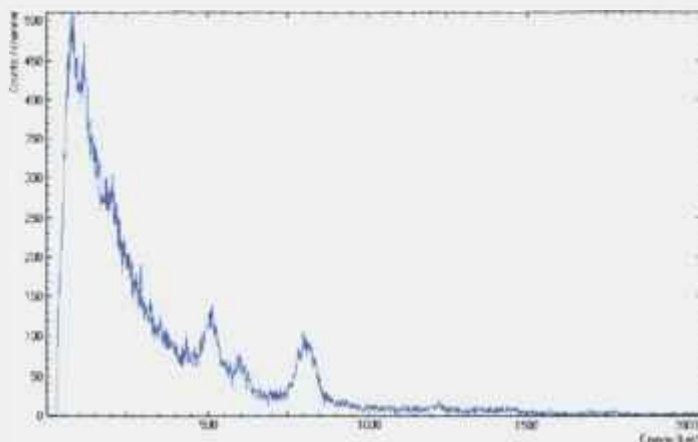


Figura 3.6: Espectro de energias medido na dependência IX, com o cíclotron desligado e com a presença de alvos

Nas dependências IX, XIII e XIV, há possibilidade de ocorrer contaminação radioativa, em virtude do manuseio de materiais radioativos e materiais estruturais ativados que são irradiados, de forma indesejável, em consequência da operação do cíclotron, assim como devido ao processamento de alguns desses materiais e a usinagem de peças metálicas. Mas se ocorrerem, serão contaminações muito pequenas e esporádicas e tenderá a aumentar, um pouco, com o transcorrer do tempo e o aumento das irradiações, razão pela qual está sendo realizada de forma preventiva

Desta maneira, pode-se também excluir o monitoramento para contaminação do ar e o monitoramento individual para pele e roupa. O monitoramento interno só está sendo realizado, devido ao dispositivo normativo⁽²⁷⁾.

Concluindo, nas dependências examinadas, só é necessário efetuar quatro tipos de monitoramento, a saber:

- a) Monitoramento de área para radiação externa;

- b) Monitoramento de área para contaminação de superfície;
- c) Monitoramento individual para radiação externa; e
- d) Monitoramento individual para contaminação interna.

A radiação a ser medida é exclusivamente eletromagnética, isto é, radiação X e gama, num intervalo de energia de cerca de 70 keV a 1.500 keV em virtude dos picos de 121 keV (Co-57) até cerca de 1.4650 keV (Co-58), como pode ser visto pelos espectros apresentados nas Figuras 3.2 a 3.6.

3.2 Descrição dos equipamentos utilizados em cada dependência para o monitoramento de área para radiação externa e contaminação de superfície para cada função

Este item será subdividido em quatro partes. Na primeira parte, será tratado o monitoramento de área para radiação externa com função controladora. Numa segunda parte será tratado o monitoramento de área para radiação externa com função operacional; na terceira parte, será tratado o monitoramento de área para a contaminação de superfície com função operacional e controladora; na última parte, será tratado o monitoramento para feixes de nêutrons.

3.2.1 Função controladora

Fazendo um exame detalhado dos espectros dos raios X e da radiação gama, mostrados no item 3.1, pode-se verificar que na maioria das dependências onde não existe a presença de alvos irradiados, a radiação apresenta um espectro contínuo de pico em 511 keV e energia máxima de cerca de 1.700 keV,

típico de espalhamento Compton e produção de pares. Este espectro, sem sombra de dúvidas, é originado nos feixes do acelerador. Em virtude disso, as variações do campo de radiação são ínfimas a não ser no caso de grandes alterações no equipamento de proteção ou nos equipamentos de trabalho. Nas dependências VI, VII e IX, onde se trabalha com alvos, é evidente que se tem picos de energias produzidos por eles, como foi visto no item 3.1. Mas, também, nota-se que estes picos não influenciam de maneira apreciável o espectro; suas variações não devem ser muito grande ainda que ocorra erro no tempo de irradiação do alvo. Portanto pode-se afirmar que, também, para elas as variações no campo de radiação são pequenas a não ser que existam grandes alterações na atividade do alvo. Resumindo, pode-se dizer que para todas as dependências, exceto as de números X, XI e XII, em obediência ao item 2.6.1-a, o monitoramento raramente é necessário e quando for deverá ser efetuado com propósito de comprovação, isto é, com função de auditoria. Por outro lado, em obediência ao item 2.5.1, no caso deste tipo de campo de radiação, devemos utilizar equipamento portáteis.

Para o monitoramento da radiação X e gama em todas essas dependências são utilizados presentemente dois monitores de radiação: medidor de taxa de exposição, modelo Teletector 6112B, de fabricação Automess, possuindo cada um dois tubos Geiger-Müller acoplados em sonda telescópica, que pode se estender a uma distância de até quatro metros; tem cinco escalas analógicas de 0 a 2 mR/h; de 0 a 5 mR/h; de 0 a 2 R/h; de 0 a 50 R/h e de 0 a 1.000 R/h; medidor de taxa de exposição, modelo IPEN PI – 760, fabricado pelo IPEN, que possui um tubo Geiger-Müller, quatro escalas analógicas de 0 a 0,025 $\mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$; de 0 a 0,25 $\mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$; de 0 a 2,5 $\mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$ e de 0 a 25 $\mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$.

O detector Teletector 6112B é recomendado para uso no intervalo de energia das radiações X e gama, sendo a calibração realizada com fonte de ^{137}Cs e ^{60}Co nas energias de 660 keV, 1,17 MeV e 1,33 MeV, portanto cobrindo os espectros de energias que se tem nas dependências de I a XIV, exceto nas dependências X, XI e XII, onde não se realiza o monitoramento para a função controladora, por não haver permanência de trabalhadores. Estes equipamentos têm, também, sensibilidade suficiente para medir as doses nos pontos escolhidos.

O monitor IPEN PI-760 contém uma sonda com janela de mica e é recomendado no intervalo de energia das radiações X e gama que vai de 7 keV a 3 MeV, sendo a calibração efetuada com fonte de ^{137}Cs e ^{60}Co nas energias de 660keV, 1,17 MeV e 1,33 MeV.

O único cuidado que se deve ter é que o detector tipo Geiger-Müller funciona muito bem no espectro de energia onde ocorre o efeito Compton, sendo a maior parte dos espectros medidos em todas as dependências, mas quando se encontra na zona de influência do efeito fotoelétrico, por causa da probabilidade de interação depender da quarta potência do número atômico de Z^4 a leitura é incorreta. Porém, o erro na leitura é para mais e portanto a dose real é inferior à medida. Se no futuro, com o aumento do tempo de operação do cíclotron e o aumento da quantidade de produção de radioisótopos, as doses aumentarem para um valor apreciável, deverá ser introduzida na rotina da dependência o uso de uma câmara de ionização que é menos sensível do que o Geiger-Müller, mas mais exata quanto às medidas, não sendo influenciada pelo efeito fotoelétrico em suas medidas.

3.2.2 Função operacional

As dependências que necessitam de monitoramento de área para radiação externa X e gama são as de número II, VI, VII, VIII, IX, XIII e XIV. Nas dependências II, VI, VII e VIII são usados equipamentos fixos em obediência ao item 2.5.1, que informa que só são utilizados monitores portáteis quando as operações do trabalhador não influenciam o campo de radiação. Nas dependências IX, XIII e XIV, bem como as de número VI, VII e VIII, quando o cíclotron não estiver em operação, são utilizados detectores portáteis, pois as funções do trabalhador não influenciam o campo de radiação. Em virtude destes fatos, as dependências serão examinadas em grupos.

Dependência II

O monitoramento de área para radiação externa com função operacional tem o objetivo de detectar situações anormais durante a operação do cíclotron, possibilitando a tomada das primeiras medidas. Em obediência ao item 2.5.1, que determina que quando os campos de radiação são variáveis ou influenciados pelas operações dos trabalhadores o monitoramento deverá ser contínuo durante a operação, configura-se exatamente este caso. O detector encontra-se fixado à parede, que separa a dependência do corredor, e próximo à porta de acesso a essa dependência, Figura 3.7.

O seu módulo de leitura encontra-se num painel localizado na própria dependência, Figura 3.8. Neste painel estão os módulos de leitura de todos os equipamentos fixos, incluindo os de nêutrons, totalizando seis.



Figura 3.7: Monitor Geiger-Müller, modelo 956A, fixado na parede

No caso de ocorrer uma situação anormal, como o aumento de taxa de exposição no detector, a primeira medida será o desligamento automático do ciclotron. O monitor Geiger-Müller é Victoreen, modelo 956A, módulo de leitura digital; mede taxas de dose desde 10^{-4} mGy/h a 10mGy/h na faixa de energia de 100 keV a 2 MeV. Seus alarmes estão ajustados em $2 \mu\text{Gy/h}$ e $7,5 \mu\text{Gy/h}$.



Figura 3.8: Módulo de leitura digital Victoreen dos monitores fixos

Dependências VI, VII e VIII

O monitoramento de área para radiação externa para a função operacional tem o objetivo de detectar situações anormais durante a operação do ciclotron, possibilitando a tomada da primeira medida, que será o desligamento automático do ciclotron. Desta forma, está-se exatamente na mesma situação da dependência II com relação ao uso de equipamentos fixos. Cada uma destas dependências possui uma câmara de ionização Victoreen, modelo 946A, com módulo de leitura digital. Estas câmaras podem medir taxas de dose desde 0,1mSv/h a 9,99 Sv/h; na faixa de energia de 50 keV a 3 MeV e seus alarmes ajustados em 1mSv/h. Estas câmaras de ionização possuem intertravamento para a liberação da porta de acesso às dependências VI e VII e para desligamento automático do ciclotron para a dependência VIII.

A câmara de ionização da dependência VI está localizada no meio da parede que separa esta dependência do corredor XII, Figura 3.9.



Figura 3.9: Câmara de ionização fixada na parede da dependência VI

A câmara da dependência VII está localizada no meio da parede que separa esta dependência do corredor X, Figura 3.10. Esta câmara pode medir taxas de dose desde 0,1 mSv/h a 9,99 Sv/h.

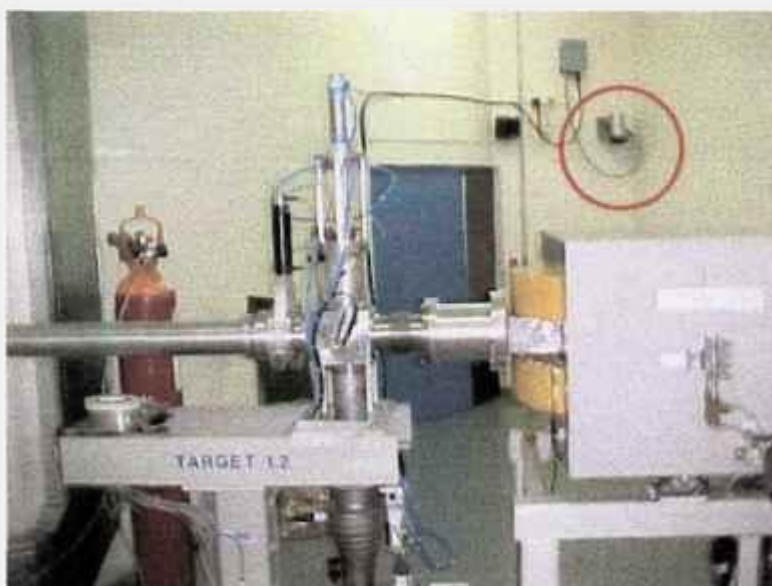


Figura 3.10: Câmara de ionização fixada na parede da dependência VII

A câmara da dependência VIII está localizada no meio da parede que separa a dependência do corredor XI, Figura 3.11. Esta câmara pode medir taxas de dose desde 0,1 mSv/h a 9,99 Sv/h.

Dependências IX, XIII e XIV

Como especificado antes nas dependências VI, VII e VIII, quando o ciclotron não está em operação e nas de números IX, XIII e XIV, são utilizados detectores portáteis, uma vez que se trabalha com alvos e materiais ativados. São utilizados os mesmos detectores portáteis descritos no item 3.2.1, a respeito da função controladora.

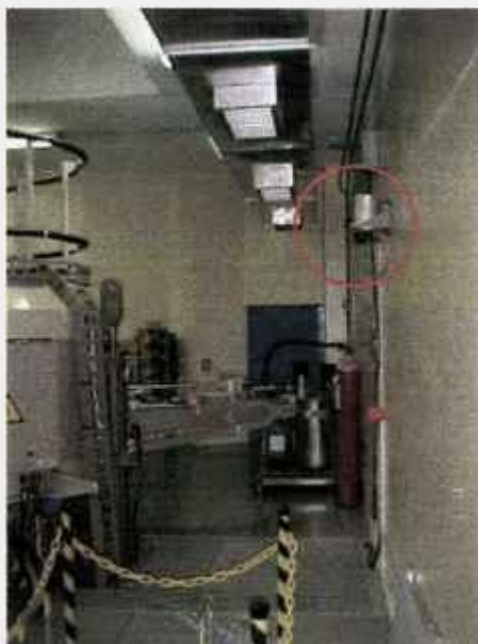


Figura 3.11: Câmara de ionização fixada na parede da dependência VIII

3.2.3 Monitoramento de área para a contaminação de superfície

Este tipo de monitoramento é executado nas dependências IX, XIII e XIV, com o objetivo de evitar a contaminação ou limitar a sua dispersão caso ela ocorra. Na dependência IX as contaminações são raras mas podem ocorrer durante a transferência dos materiais radioativos processados nas celas blindadas para as blindagens de transporte. Operação esta também efetuada dentro da cela.

Nas dependências XIII e XIV são manuseados materiais radioativos e peças ativadas e são realizadas tarefas de usinagens que podem provocar contaminações, porém a probabilidade de ocorrência é pequena. Em virtude destes fatos, são monitorados todos os itens que saem destas dependências, isto é, IX, XIII e XIV, como monitoramento para a função operacional.

Por outro lado, esporadicamente fazemos monitoramento com função controladora pela forma indireta por meio da técnica de esfregaço, pois a radioproteção possui laboratório para este tipo de medida, que tem a vantagem de ser um método mais sensível que o direto que é o método efetuado pelo trabalhador. Para realização do monitoramento com a função operacional são utilizados: dois monitores de área, modelo 190F, de fabricação Victoreen, Inc., com sonda tipo panqueca com escalas nas faixas de 1cpm até 10^6 cpm e um monitor móvel para contagem, modelo MIP 10, de fabricação Nardeux, tipo Geiger-Müller, com janela aberta para radiação beta e fechada para gama, tem quatro escalas nas faixas de 0 a 10 cps, de 0 a 10^2 cps, de 0 a 10^3 cps e de 0 a 10^4 cps.

3.2.4 Monitoramento de nêutrons

Nas dependências X , XI e XII não é efetuado o monitoramento do local de trabalho para radiação externa com função controladora, por tratar-se de corredores de passagens e portanto não existe permanência de trabalhadores.

Em princípio poder-se-ia efetuar o monitoramento para função operacional para a radiação gama, mas neste caso específico o monitoramento dos nêutrons rápidos produzidos pelo cíclotron é mais sensível, mesmo em doses ínfimas.

Em cada uma das dependências X e XII, foi instalado um detector de nêutrons Victoreen, tipo BF_3 , modelo 942A, Figura 3.12; podem medir taxas de dose desde 0,01 mSv/h a 10 mSv/h; na faixa de energias de 0 Mev a 12 MeV, com seus alarmes ajustados em 25 $\mu\text{Sv/h}$; com intertravamento para o desligamento do cíclotron, com módulo de leitura digital, Figura 3.8. Existem,

também, com a finalidade remota de função interferente dois detectores portáteis de nêutrons da Ludlum, modelo 15, possui quatro escalas analógicas com faixas de 0 cpm a 5 00 cpm com múltiplos de X1, X10, X100 e X1000.



Figura 3.12: Detector de nêutron modelo 942A fixado na parede das dependências X e XII

3.3 Escolha inicial dos pontos de monitoramento de área para cada tipo e função

3.3.1 Dependências I e II

Os pontos selecionados para o monitoramento de área para radiação externa com função controladora são apresentados na Figura 3.13 e justificados, sucintamente, a seguir:

No ponto AA, os operadores executam todos as atividades que envolvem a condução segura de operação do ciclotron. Em AB, os operadores executam as leituras dos painéis das fontes elétricas que alimentam o ciclotron.

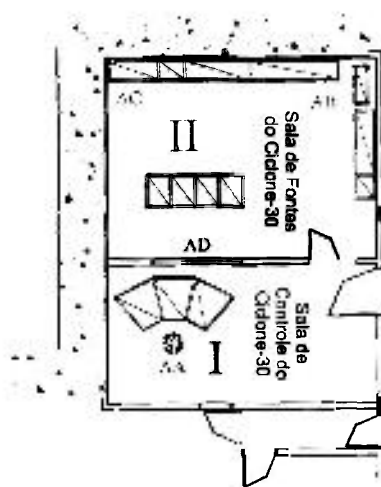


Figura 3.13: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa nas dependências I e II

Em AC, os operadores controlam as botoeiras para ligar e desligar, as bombas de vácuo, e em AD, os operadores controlam as botoeiras das fontes elétricas que podem ser desligadas no caso de necessidade de intervenção.

A permanência dos operadores na posição do ponto AA é cerca de 8 horas por semana. A permanência nas demais posições é de cerca de 01 hora por semana no total e aproximadamente 20 minutos em cada posição.

Como foi visto no item 2.6.1-a, o monitoramento raramente é necessário e quando o for deverá ser efetuado com propósitos de comprovação. Portanto, pode ser determinado, de início, a frequência de uma vez por semana ou menos. Mas pelo fato do ciclotron estar em fase de certificação e necessitar de dados operacionais numéricos de dose, bem como para que os trabalhadores adquiram confiabilidade na operação do ciclotron e nos valores das doses encontradas nos ambientes de trabalho, decidiu-se, por bem, realizar o monitoramento a cada operação do ciclotron. Isto vale, também, para as demais dependências. Atualmente, são efetuadas duas operações por semana.

Como foi visto no item 3.2, o monitoramento para a função operacional é efetuada com o detector Geiger-Müller Victoreen, modelo 956A, fixado na dependência II, com painel de leitura digital na própria dependência. Como as leituras de todos os detectores fixos, a saber, o Geiger-Müller, as três câmaras de ionização e os dois detectores de nêutrons encontram-se no mesmo painel de leitura, não será mais mencionado o fato da leitura e o exposto a seguir nos próximos itens, mas será informado, unicamente, o valor de dose representativo de cada um deles.

Os operadores do cíclotron que permanecem na posição AA da dependência I, conseguem observar, através da janela de vidro, as leituras destes seis detectores fixos. Como todos eles estão ligados diretamente à operação do cíclotron, no caso de uma variação na dose ocorre o desligamento automático do cíclotron evitando assim, que os trabalhadores que se encontram nas demais dependências venham receber doses, desnecessariamente.

3.3.2 Dependências III e IV

Os pontos selecionados para o monitoramento de área para radiação externa para a função controladora são apresentados na Figura 3.14 e justificados, sucintamente, a seguir:

No ponto BA, os operadores executam todas as atividades que envolvem a condução segura de operação do cíclotron de 28 MeV. Na posição BC, Os operadores executam as leituras dos painéis das fontes elétricas que alimentam o cíclotron e em BB os operadores controlam as botoeiras para ligar e desligar as

bombas de vácuo, bem como as botoeiras das fontes elétricas que podem ser desligadas no caso de necessidade de intervenção.

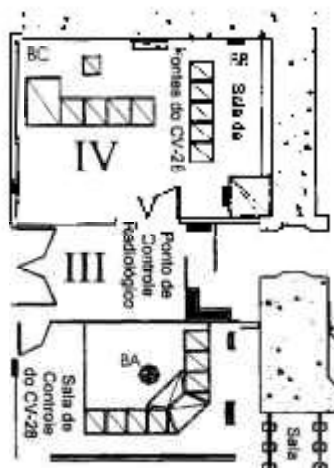


Figura 3.14 – Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa nas dependências III e IV.

A permanência dos operadores na posição do ponto BA é cerca de 8 horas por mês.

A permanência nas demais posições é de cerca de 0,5 hora por mês no total e aproximadamente 15 minutos em cada posição.

O ciclotron de 28 MeV opera esporadicamente com o intuito de mantê-lo ativo para futuras necessidades, principalmente, de caráter acadêmico. Este ciclotron, ainda que pudesse ser operado com o ciclotron de 30 MeV, ao mesmo tempo, até a presente data nunca foi feita operações simultâneas, pois existe muito espaço de tempo e evita a soma das doses causadas pelo espalhamento Compton, resultante da operação de ambos.

3.3.3 Dependência V

Os pontos selecionados para o monitoramento de área para radiação externa para a função controladora são apresentados na Figura 3.15 e justificados, sucintamente, a seguir:

No ponto BF, os operadores executam, em bancada de trabalho, alguns serviços de reparos, preparação e manutenção de alvos. Na posição BG, Os operadores executam todas as atividades de controle dos rejeitos radioativos sólidos e em BI os operadores executam as atividades de manutenção do ciclotron.

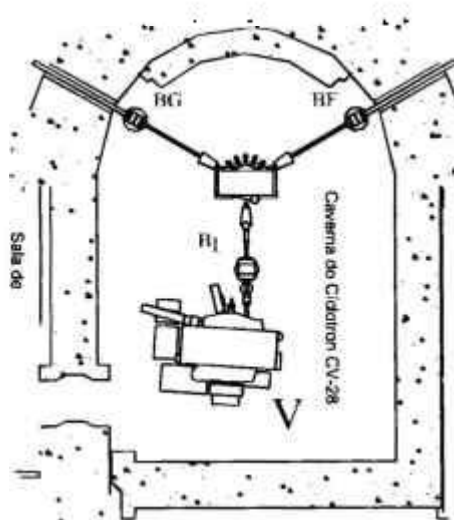


Figura 3.15 Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa nas dependências V

Na posição do ponto BF os trabalhadores permanecem cerca de 02 horas por semana, na posição BG os trabalhadores permanecem cerca de 0,5 hora por mês e na posição BI os trabalhadores permanecem cerca de 02 horas por mês.

3.3.4 Dependências VI, VII e VIII

Os pontos selecionados para o monitoramento de área para radiação externa para a função controladora são apresentados nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18. Note-se que a primeira letra que representa o ponto de monitoramento identifica a dependência correspondente.

A seguir são justificados, sucintamente, os pontos selecionados.

A posição do ponto CA, é o local de monitoramento, espera e observação do técnico de radioproteção durante as tarefas de trocas e intervenções nos alvos. Na posição CB os operadores executam as tarefas de troca de alvos e intervenções e na posição CC os operadores executam as tarefas de manutenção do cíclotron.

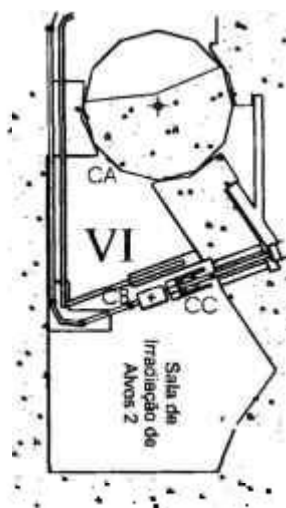


Figura 3.16: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa na dependência VI

A posição do ponto DA, é o local de monitoramento, espera e observação do técnico de radioproteção durante as tarefas de trocas e intervenções nos

alvos. Na posição DB os operadores executam as tarefas de troca de alvos e intervenções e na posição DC os operadores executam as tarefas de manutenção do ciclotron.

Todas as posições EA, EB, EC e ED são locais onde os operadores executam manutenções no ciclotron. Durante o período de operação não é permitido a presença de trabalhadores nestas posições.

Os pontos selecionados para o monitoramento operacional por meio de detectores portáteis coincidem com os pontos CB, CC, DB, DC, EA, EB, EC e ED do monitoramento para a função controladora, pois nestas posições podem ocorrer situações anormais, como as que serão expostas, a seguir.

Nas posições CB, CC, DB e DC podem ocorrer contaminações e altos valores de taxa de dose, resultante da fusão ou fragmentação dos alvos durante a irradiação.

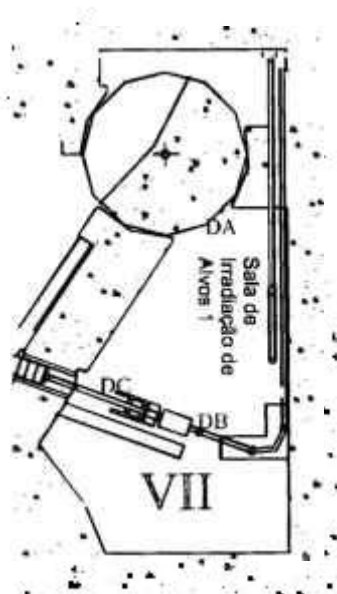


Figura 3.17: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa na dependência VII

Nas posições EA, EB, EC e ED pode haver peças ou partes de estruturas do ciclotron muito ativadas devido a um período maior de irradiação.

Na posição do ponto CA os trabalhadores permanecem cerca de 1 hora por semana; na posição CB os trabalhadores permanecem cerca de 0,5 hora por semana; na posição CC os trabalhadores permanecem cerca de 1 hora por semana.

Na posição do ponto DA os trabalhadores permanecem cerca de 3 horas por semana; na posição DB os trabalhadores permanecem cerca de 3 horas por semana; na posição DC os trabalhadores permanecem cerca de 1 hora por semana.

Nas posições dos pontos EA, EB, EC e ED os trabalhadores permanecem cerca de 03 horas por semana no total, isto é, 45 minutos em cada posição.

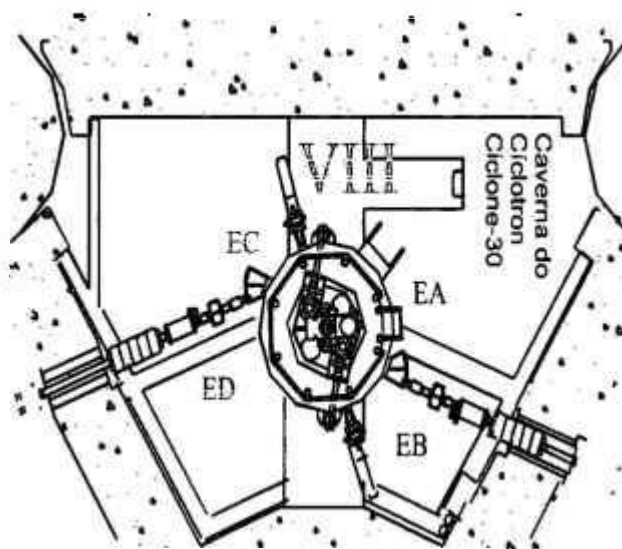


Figura 3.18: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa na dependência VIII

3.3.5 Dependências IX, XIII e XIV

Os pontos selecionados para o monitoramento de área para radiação externa com função controladora são apresentados nas Figuras 3.19, 3.20 e 3.21. Note-se que a primeira letra que representa o ponto de monitoramento identifica a dependência correspondente.

A seguir são justificados, sucintamente, os pontos selecionados.

Na posição do ponto FB, os operadores executam as etapas de controle dos rejeitos radioativos sólidos. Na posição FC os operadores executam as tarefas de recolhimento e envio de I-123, na posição FD os operadores executam as etapas de recolhimento e processamento do F-18 e na posição FE os operadores executam as desmontagens do Ga-67 e TI-201.

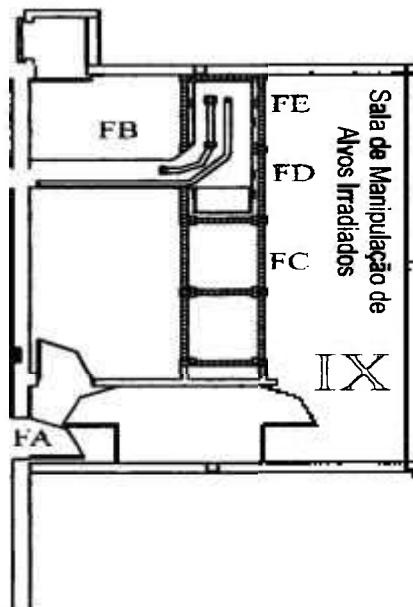


Figura 3.19: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa na dependência IX

Na posição do ponto HA, os operadores executam as tarefas do armazenamento temporário dos rejeitos radioativos gerados na instalação e de

algumas peças ativadas, dos cíclotrons, para decaimento. Nas demais posições, HB, HC, HD, IA, IB, IC e ID os operadores executam pequenas tarefas de laboratório, usinagens de peças metálicas e manutenções.

Os pontos selecionados para o monitoramento operacional por meio de equipamentos portáteis coincidem com os pontos FC, FD, FE, HB, HD, IB e IC do monitoramento para a função controladora, pois nestas posições podem ocorrer situações anormais como as que serão expostas a seguir.

Na posição do ponto FC pode ocorrer derramamento do material radioativo (I-123), dentro da cela blindada, durante a fase de recolhimento e envio.

Na posição FD, também, pode ocorrer derramamento do F-18 durante as etapas de processamento.

Na posição FE os alvos de Ga-67 e Tl-201 podem apresentar valores elevados de taxa de dose, no caso de serem irradiados por um tempo maior do que o planejado.

Na posição HB pode haver valores de taxa de dose elevados causados pelo armazenamento de peças ativadas.

Nas demais posições pode haver o manuseio inadvertido de peças ativadas com valores elevados de taxa de dose e resultar em doses nos trabalhadores.

O monitoramento do local de trabalho para contaminação de superfície, tanto para função controladora (esfregaços) como para a função operacional

(panqueca e detector móvel) são realizados nos seguintes pontos: FA, FB, FC, FD, FE, HA, HB, HC, HD, IA, IB, IC e ID.

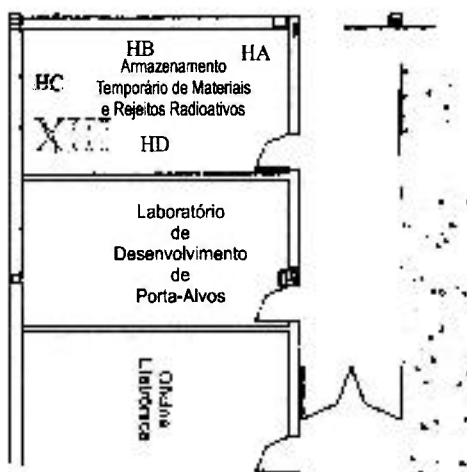


Figura 3.20: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa e para contaminação de superfície na dependência XIII

Os tempos de permanência, dos trabalhadores, em cada um destes locais são:

Na posição do ponto FA os trabalhadores permanecem cerca de 30 minutos por semana; na posição FB os trabalhadores permanecem cerca de 1 hora por semana; na posição FC os trabalhadores permanecem cerca de 3 horas por semana, na posição FD os trabalhadores permanecem cerca de 7,5 horas por semana e na posição FE os trabalhadores permanecem cerca de 3 horas por semana.

Nas posições HA, HB, HC, HD, IA, IB, IC e ID os trabalhadores permanecem cerca de 06 horas por semana no total e aproximadamente 45 minutos em cada posição.

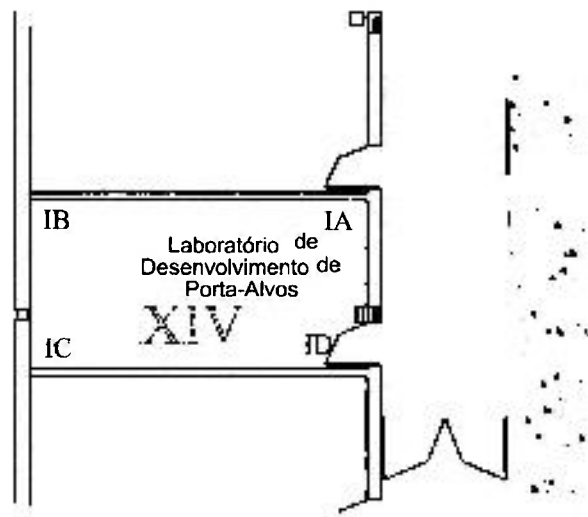


Figura 3.21: Localização dos pontos de monitoramento de área para radiação externa e para contaminação de superfície na dependência XIV

3.4 Tipos de monitoramentos e suas funções para os trabalhadores

Das condições radiológicas ambientais descritas em 3.1 e da experiência adquirida no passado, bem como pelo fato das operações, nas diferentes dependências da instalação do ciclotron, se situarem na condição a, do item 6.2.1, que diz: "Quando as operações do trabalhador não influenciam o campo de radiação" constatou-se que os campos de radiação existentes são resultantes, em grande parte, pela radiação espalhada advinda da operação do próprio ciclotron. Como a autoblindagem do ciclotron satisfaz as novas regulamentações internacionais^(1, 2) espera-se que raramente os três décimos dos limites anuais seja ultrapassados.

Desta forma, em princípio, o monitoramento individual para radiação externa não seria necessário. Por outro lado, por ser um ciclotron novo que entrou em funcionamento há pouco tempo, poderia existir doses limítrofes entre as condições de trabalho A e B.

Por causa deste fato e também da necessidade de inculcar nos trabalhadores confiança, optou-se por realizar o monitoramento individual em todos os trabalhadores, inclusive, os de proteção radiológica.

Com os dados dosimétricos adquiridos durante o desenvolvimento do presente trabalho, numa primeira otimização da proteção radiológica, que será deixada para futuro trabalho, poderá ser feita uma seleção confiável daqueles trabalhadores que realmente necessitam do monitoramento individual.

Em obediência ao que foi exposto no item 2.5.4, elegeu-se como dosímetro individual a opção básica, isto é, o dosímetro termoluminescente, pois um dosímetro alternativo, com discriminador de energia, não melhorará a detecção já que a energia de pico está muito próxima da energia média, que é de 511 keV, conforme visto no item 3.1 e portanto fora da faixa de medida da energia.

Com respeito ao monitoramento individual para radiação externa para a função operacional existem disponíveis 6 dosímetros de aviso sonoro, marca Rados , modelo RAD-50S, mas realmente não são utilizados, pois o monitoramento de área para radiação externa para a função operacional é muito confiável e elimina a necessidade deste tipo de monitoramento.

Com respeito ao monitoramento individual para contaminação de pele e roupa, em obediência ao exposto no item 2.5.5, estão sendo usados os mesmos

equipamentos que são utilizados no monitoramento para contaminação de superfície, isto é, monitores com sonda panqueca e o detector móvel MIP 10 digital da Nardeux. No momento de finalização do presente trabalho, estava sendo instalado um detector tipo Portal, na entrada dos vestiários, para quem sai das áreas restritas.

Como foi explicado no item 2.4, o monitoramento do ar só se justifica quando se manuseia materiais que podem migrar para o ar e em quantidades, milhares de vezes superiores aos limites de incorporação anuais. Além disso, ele pode ser substituído, dependendo das circunstâncias, pelo monitoramento do local de trabalho para radiação externa ou para contaminação de superfície ou ainda pelo monitoramento individual interno.

Pelos valores presumidos de serem encontrados no monitoramento de área para radiação externa com função controladora e pelos valores do monitoramento de contaminação de superfície, tanto com função controladora como operacional, pode-se intuir de antemão, aliada a nossa experiência anterior no campo, da não necessidade deste tipo de monitoramento e conseqüentemente da não necessidade do monitoramento individual interno. No entanto, em obediência a norma nacional a respeito de Serviços de Radioproteção⁽²⁷⁾ que determina em seu item 3.11.3 intitulado: "Contaminação interna":

- A monitoração individual e os cuidados relativos à contaminação interna devem atender aos seguintes requisitos:

- d) Obrigatoriedade dos trabalhadores sujeitos ao risco de contaminação, de utilizar máscaras específicas e/ou outros equipamentos protetores adequados, se assim exigido pelo

Serviço de Radioproteção, em função dos correspondentes níveis de atividades da contaminação. Estes trabalhadores devem ser examinados, no mínimo, uma vez por ano, ou sempre após a ocorrência ou suspeita de ocorrência de contaminação interna acidental.”

está sendo efetuado o monitoramento individual interno pela técnica in vivo, pelo menos uma vez por ano, de todos os trabalhadores citados no item 2.2. O equipamento utilizado é um contador de corpo inteiro com os seguintes detectores: 1 cristal NaI(Tl) BICRON, 8” x 4”, mede radiação gama com energia na faixa de 50 keV a 3 MeV; um outro cristal NaI(Tl), 2” x 2” Quartz-Silice para tireóide e mede radiação gama com energia na faixa de cerca de 100 keV a 3 MeV.

Estas medidas de corpo inteiro visam, também, comprovar o que asserimos acima, isto é, da não necessidade de efetuar este tipo de monitoramento, além de dar credibilidade ao sistema de segurança implementado, mostrando que é eficaz e portanto não existe incorporação de material radioativo por parte dos trabalhadores.

4. RESULTADOS DOS MONITORAMENTOS DOS LOCAIS DE TRABALHO

Nas Tabelas 4.1 a 4.10 são apresentados os valores das medidas dos monitoramentos realizados, no período de junho a dezembro de 2001, nas dependências do ciclotron. As medidas apresentadas representam a média aritmética de 20 medidas de taxa de dose equivalente e já está subtraída das medidas, a radiação natural de fundo. A adoção da média aritmética foi decidida após análise das medidas e a constatação de que os valores obtidos durante o período estão bem próximos e que por isso a média dos valores é o que melhor se adapta para a demonstração do uso laboral das dependências.

Nas Tabelas 4.11 a 4.13 são apresentadas, também, as doses recebidas pelos trabalhadores nos anos de 2000 e 2001.

Tabela 4.1: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente nas dependências I e II, com o ciclotron de 30 MeV em operação

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|---|-----------------------------------|---------------|-----|
| | | Min | Média | Max |
| AA | Mesa de controle do ciclotron de 30 MeV | 4,0 | 6,0 \pm 1,0 | 7,0 |
| AB | Sala de fontes elétricas, lado direito ao fundo | 5,0 | 6,0 \pm 0,7 | 7,0 |
| AC | Sala de fontes elétricas, lado esquerdo ao fundo | 5,0 | 6,0 \pm 1,0 | 8,0 |
| AD | Sala de fontes elétricas, atrás da mesa de controle | 5,0 | 6,0 \pm 0,9 | 8,0 |

Min: Mínimo; Max: Máximo

Tabela 4.2: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente nas dependências III e IV com o ciclotron de 30 MeV em operação

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|--|-----------------------------------|---------------|-----|
| | | Min | Média | Max |
| BA | Mesa de controle do ciclotron CV-28 | 5,0 | 6,0 \pm 0,8 | 7,0 |
| BB | Sala de fontes elétricas, lado direito ao fundo | 5,0 | 6,0 \pm 0,9 | 8,0 |
| BC | Sala de fontes elétricas, lado esquerdo ao fundo | 5,0 | 6,0 \pm 0,7 | 7,0 |

Tabela 4.3: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência V com o ciclotron de 30 MeV em operação

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|--|-----------------------------------|---------------|-----|
| | | Min | Média | Máx |
| BF | Lado direito ao fundo, bancada de trabalho | 5,0 | 6,0 \pm 0,8 | 7,0 |
| BG | Lado esquerdo ao fundo, no ponto de coleta de rejeitos | 5,0 | 6,0 \pm 0,9 | 8,0 |
| BJ | Posição onde é feita a manutenção do CV-28 | 5,0 | 6,0 \pm 0,8 | 7,0 |

Tabela 4.4: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência VI com o ciclotron de 30 MeV desligado

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|---|-----------------------------------|---------------|-----|
| | | Min | Média | Máx |
| CA | Logo após a porta de entrada da sala de alvos | 5,0 | 6,0 \pm 0,8 | 8,0 |
| CB | Posição em que é feita a troca de alvos | 5,0 | 6,0 \pm 0,8 | 8,0 |
| CC | Posição em que é feita a manutenção | 5,0 | 6,0 \pm 0,7 | 7,0 |

Tabela 4.5: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência VII com o ciclotron de 30 MeV desligado

| Ponto | Descrição | Taxa de dose (mSv/h) | | |
|-------|---|----------------------|------------------|-------|
| | | Min | Média | Máx |
| DA | Logo após a porta de entrada da sala | 0,17 | 0,20 \pm 0,02 | 0,23 |
| DB | Posição em que é feita a troca de alvos | 280,0 | 300,0 \pm 29,0 | 370,0 |
| DC | Posição em que é feita a manutenção | 0,60 | 0,80 \pm 0,13 | 0,95 |

Tabela 4.6: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência VIII com o ciclotron de 30 MeV desligado

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|--|-----------------------------------|------------------|-------|
| | | Min | Média | Máx |
| EA | Lado direito logo após a entrada, posição de manutenção do ciclotron de 30 MeV | 270,0 | 300,0 \pm 24,5 | 360,0 |
| EB | Lado direito ao fundo em relação à entrada, posição de manutenção do ciclotron | 28,0 | 30,0 \pm 2,2 | 35,0 |
| EC | Lado esquerdo logo após a entrada, posição de manutenção do ciclotron | 2,0 | 2,0 \pm 0,0 | 2,0 |
| ED | Lado direito ao fundo em relação à entrada, posição de manutenção do ciclotron | 2,0 | 2,0 \pm 0,0 | 2,0 |

Tabela 4.7: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência IX com o cíclotron de 30 MeV desligado

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|---|-----------------------------------|----------------|------|
| | | Min | Média | Máx |
| FB | Atrás das celas, ao lado do ponto de coleta de rejeitos | 18,5 | 20,0 \pm 1,3 | 22,7 |
| FC | Em frente à cela de recolhimento de I-123 | 2,0 | 2,0 \pm 0,0 | 2,0 |
| FD | Em frente à cela de preparação e processamento do F-18 | 2,0 | 2,0 \pm 0,0 | 2,0 |
| FE | Em frente à cela de desmontagem do Ga-67 e Tl-201 | 2,0 | 2,0 \pm 0,0 | 2,0 |

Tabela 4.8: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência XIII com o cíclotron de 30 MeV em operação

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|---|-----------------------------------|-----------------|------|
| | | Min | Média | Máx |
| HA | Próximo ao local de armazenamento de rejeitos | 1,2 | 1,5 \pm 0,1 | 1,8 |
| HB | Ao lado direito, na bancada de trabalho | 3,6 | 4,0 \pm 0,2 | 4,3 |
| HC | Em frente a pia, na bancada de trabalho | 40,0 | 60,0 \pm 12,6 | 80,0 |
| HD | Ao lado esquerdo, na bancada de trabalho | 5,0 | 6,0 \pm 0,7 | 8,0 |

Tabela 4.9: Resultados das medidas de taxa de dose equivalente na dependência XIV com o cíclotron de 30 MeV em operação

| Ponto | Descrição | Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$) | | |
|-------|---|-----------------------------------|---------------|-----|
| | | Min | Média | Máx |
| IA | Próximo ao canto direito na entrada da sala | 6,0 | 6,0 \pm 0,0 | 6,0 |
| IB | Ao lado direito no fundo, na bancada de trabalho | 6,0 | 6,0 \pm 0,0 | 6,0 |
| IC | Ao lado esquerdo no fundo, na bancada de trabalho | 6,0 | 6,0 \pm 0,0 | 6,0 |
| ID | Entrada da dependência | 6,0 | 6,0 \pm 0,0 | 6,0 |

Tabela 4.10: Resultados das medidas dos detectores fixos, com o cíclotron de 30MeV desligado e em operação, sem subtração da radiação natural de fundo

| Dependência | Tipo de detector | Cíclotron desligado | Cíclotron ligado |
|-------------|----------------------------|---------------------|------------------|
| | | Máxima | Máxima |
| II | Geiger-Müller | 0,06 mR/h | 0,66 mR/h |
| VI | Câmara de ionização | 0,06 mR/h | 0,132 R/h |
| VII | Câmara de ionização | 32,0 mR/h | Sem medida |
| VIII | Câmara de ionização | 14,0 mR/h | 0,198 R/h |
| X | BF ₃ (nêutrons) | BG | BG |
| XII | BF ₃ (nêutrons) | BG | BG |

Tabela 4.11: Doses dos trabalhadores do grupo de alvos

| Trab | Ano | Doses mensais (mSv) | | | | | | | | | | | | Dose Total (mSv) |
|------|------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez | |
| A1 | 2000 | 0,36 | 2,30 | 0,47 | M | ND | 5,11 | 5,28 | ND | ND | 2,54 | 1,76 | 0,74 | 18,56 |
| | 2001 | 0,80 | 4,85 | M | 2,13 | 3,29 | 1,02 | 0,70 | 1,04 | 0,66 | 0,77 | 1,02 | 1,36 | 17,64 |
| A2 | 2000 | 1,79 | 1,62 | 1,30 | 0,49 | ND | 2,37 | 1,66 | ND | ND | 2,38 | 1,30 | 1,86 | 14,77 |
| | 2001 | 0,23 | 3,20 | M | 1,05 | 2,19 | 1,10 | 0,64 | 1,87 | 1,06 | 1,50 | 3,27 | 1,77 | 17,88 |
| A3 | 2000 | M | 0,51 | M | M | ND | 0,57 | M | ND | ND | M | 0,20 | 0,33 | 1,61 |
| | 2001 | M | 0,38 | M | M | M | M | 0,20 | 0,40 | M | 0,20 | 0,42 | 0,26 | 1,86 |

Trab: Trabalhador M: Menor que nível de registro (< 0.2mSv); ND: Dosímetro não devolvido

Tabela 4.12: Doses dos trabalhadores do grupo de operação

| Trab | Ano | Doses mensais (mSv) | | | | | | | | | | | | Dose Total (mSv) |
|------|------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez | |
| O1 | 2000 | 0,46 | 0,86 | 0,40 | 0,43 | ND | M | M | ND | ND | 0,33 | M | M | 2,48 |
| | 2001 | M | M | 0,2 | 0,44 | 0,31 | M | M | M | M | M | M | M | 0,95 |
| O2 | 2000 | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M |
| | 2001 | M | M | M | M | M | M | M | M | 0,21 | M | M | M | 0,21 |
| O3 | 2000 | M | 1,41 | M | M | M | 1,89 | 1,00 | ND | ND | 0,30 | 0,20 | M | 4,80 |
| | 2001 | M | 0,35 | M | M | 0,47 | 0,20 | M | M | M | M | M | M | 1,02 |
| O4 | 2000 | M | 0,55 | M | M | M | M | M | ND | ND | M | M | 0,30 | 0,85 |
| | 2001 | M | M | M | M | M | 0,29 | M | M | M | M | M | M | 0,29 |
| O5 | 2000 | M | 0,55 | M | M | M | 2,06 | M | ND | ND | M | M | M | 2,61 |
| | 2001 | M | M | M | M | M | M | M | 0,34 | 0,41 | M | M | M | 0,75 |
| O6 | 2000 | M | M | M | M | M | M | M | ND | ND | M | M | 0,40 | 0,40 |
| | 2001 | M | 0,71 | M | 0,34 | 0,32 | 0,29 | M | 0,34 | M | 0,21 | M | 0,28 | 2,49 |

Trab: Trabalhador; M: Menor que nível de registro(< 0.2mSv); ND: Dosímetro não devolvido

Tabela 4.13: Doses dos trabalhadores do grupo de proteção radiológica

| Trab | Ano | Doses mensais (mSv) | | | | | | | | | | | | Dose Total (mSv) |
|------|------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | | jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez | |
| P1 | 2000 | 0,37 | 2,87 | M | 0,37 | M | 3,11 | 3,32 | ND | ND | 1,19 | 0,30 | 0,57 | 12,10 |
| | 2001 | M | 1,28 | M | M | 1,12 | 0,3 | 0,41 | 0,40 | 0,29 | 0,25 | 0,36 | 0,35 | 4,76 |
| P2 | 2000 | M | 1,41 | 0,75 | M | M | M | M | ND | ND | M | 0,27 | M | 2,43 |
| | 2001 | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | 0,22 | 0,22 |
| P3 | 2000 | M | M | 0,47 | M | M | M | M | M | M | M | M | M | 0,47 |
| | 2001 | M | M | M | M | M | M | M | 0,49 | M | M | M | M | 0,49 |

Trab: Trabalhador; M: Menor que nível de registro (< 0.2mSv); ND: Dosímetro não devolvido

Não foram encontrados valores de contaminação, nos materiais radioativos que saíram das dependências IX, XIII e XIV, durante o período de acompanhamento do presente trabalho, ainda que, como se afirmou anteriormente, possa acontecer.

5.DISSCUSSÃO

Reportando-se aos objetivos do presente trabalho, item 1.8, uma das principais tarefas deste Capítulo será a execução daqueles de número 5, 6, 11, 12 e 13, além de outras discussões que os resultados dos Capítulos 3 e 4 proporcionaram.

5.1 Classificação das áreas

Para classificação das áreas de trabalho, utilizou-se como base a Tabela 1.2 e os resultados dos monitoramentos dos locais de trabalho apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.9. Considerando que o cíclotron em sua carga máxima deverá operar 100 horas por semana e os trabalhadores serão divididos em três turnos, então, estima-se que cada turno cumprirá 33 horas por semana. Considerando que o ano é de 50 semanas, a carga máxima anual, em tempo, para cada trabalhador será de: $33 \times 50 = 1650 \text{ h/a}$.

Evidentemente, que nas dependências onde o acesso só é permitido com o cíclotron desligado, o tempo de permanência será no máximo de: $(2000 \text{ h/a} - 1650 \text{ h/a} = 350 \text{ h/a})$. Nas demais dependências, onde os valores de radiação presente independem da operação do cíclotron, deverá ser considerado às 2000 horas anuais de trabalho.

5.1.1 Dependências I, II, III, IV e V

Pelos valores das doses apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.3, a dose acumulada em um ano será de $6 \times 1650 = 9900 \mu\text{Sv/a}$ ou $9,9 \text{ mSv/a}$. Portanto, de acordo com a Tabela 1.2 estas dependências foram classificadas como áreas supervisionadas.

Na dependência V as doses são relativamente pequenas, mesmo existindo um ponto de coleta de rejeitos sólidos. Isso ocorre porque a geração de rejeitos radioativos é muito pequena e com valores de radiação desprezíveis, quase iguais aos valores da radiação natural de fundo do local.

5.1.2 Dependência VI

O maior tempo de permanência nesta dependência ocorre com o regime atual de operação do cíclotron, que opera em média de 8h/semana e portanto os trabalhadores poderão permanecer até 32 h/semana ou $32 \times 50 = 1600 \text{ h/a}$, recebendo uma dose acumulada de $1600 \times 6 = 9600 \mu\text{Sv/a}$ ou $9,6 \text{ mSv/a}$. Assim, esta dependência é, também, classificada como área supervisionada, durante a permanência dos trabalhadores. Só seria controlada durante a operação do cíclotron, mas esta dependência permanece hermeticamente fechada.

As doses nesta dependência são relativamente pequenas e isto, devido ao fato de que até o presente momento as irradiações foram apenas de caráter experimental e esporádica, sendo que as medidas foram realizadas sem a presença de alvos.

5.1.3 Dependência VII

O tempo de permanência nesta dependência quando o ciclotron estiver operando com sua carga máxima de 100 h/semana será no máximo de 350 h/a, já que o acesso só é permitido com o ciclotron desligado e de acordo com os valores das doses apresentados na Tabela 4.5, a dose acumulada em um ano poderá ser de $300 \text{ mSv/h} \times 350 \text{ h/a} = 105000 \text{ mSv/a}$ ou 105 Sv/a . Assim, esta dependência é, também, classificada como área controlada. As doses em que os trabalhadores estão sujeitos nesta dependência são extremamente altas, devido às operações de trocas de alvos e principalmente devido às intervenções na linha de feixe. Por isso, esta dependência é monitorada continuamente e as tarefas são executadas em frações de segundos.

A dose na posição DB localiza-se na posição do corpo dos trabalhadores do grupo de alvos. Não é feito o monitoramento na posição das mãos porque o seu limite anual é 10 vezes maior do que aquele para o corpo inteiro e a relação das distâncias mostra que as doses nas mãos com relação ao seu limite é inferior ao do corpo com relação ao seu limite.

5.1.4 Dependência VIII

O tempo de permanência nesta dependência será, também, no máximo de 350 h/a, já que o acesso só é permitido com o ciclotron desligado e de acordo com os valores das doses apresentados na Tabela 4.6, a dose acumulada em um ano poderá ser de $300 \mu\text{Sv/h} \times 350 \text{ h/a} = 105.000 \mu\text{Sv/a}$ ou 105 mSv/a . Assim, esta dependência é, também, classificada como área controlada.

5.1.5 Dependência IX

A princípio, o tempo de permanência nesta dependência poderá ser de até 2000 h/a, já que o acesso é permitido com o ciclotron ligado e de acordo com os valores das doses apresentados na Tabela 4.7, a dose acumulada em um ano poderá ser no máximo de $20 \mu\text{Sv/h} \times 2000 \text{ h/a} = 40000 \mu\text{Sv/a}$ ou 40 mSv/a . Assim, esta dependência é, também, classificada como área controlada.

5.1.6 Dependências X, XI e XII

Para estas dependências, a princípio, o tempo de permanência, também, poderá ser de até 2000 h/a, já que o acesso é permitido com o ciclotron ligado e pelos valores das taxas de doses medidas durante a fase de certificação da instalação, que foram em média $2 \mu\text{Sv/h}$, a dose acumulada em um ano poderá ser de $2 \mu\text{Sv/h} \times 2000 \text{ h/a} = 4000 \mu\text{Sv/a}$ ou 4 mSv/a . Além disso, esses locais são corredores de acesso e por isso deve ser atribuído um fator de ocupação de 1/16.

Conforme informado, anteriormente, os valores de dose resultantes dos feixes de nêutrons são muito pequenos e portanto considerados desprezíveis. Em virtude destes fatos estes locais são considerados áreas de acesso livre.

5.1.7 Dependência XIII

A princípio, o tempo de permanência nesta dependência poderá ser de até 2000 h/a, já que o acesso é permitido com o ciclotron ligado e de acordo com os valores das doses apresentados na Tabela 4.8, a dose acumulada em um ano

poderá ser no máximo de $60 \mu\text{Sv/h} \times 2000 \text{ h/a} = 120000 \mu\text{Sv/a}$ ou 120 mSv/a . Assim, esta dependência é classificada como área controlada.

5.1.8 Dependência XIV

Nesta dependência, também, o tempo de permanência poderá ser de até 2000 h/a, já que o acesso é permitido com o ciclotron ligado e de acordo com os valores das doses apresentados na Tabela 4.9, a dose acumulada em um ano poderá ser de $6 \mu\text{Sv/h} \times 2000 \text{ h/a} = 12000 \mu\text{Sv/a}$ ou 12 mSv/a . Assim, esta dependência é, também, classificada como área supervisionada.

5.2 Classificação dos trabalhadores

A classificação dos trabalhadores de cada um dos grupos, abrangidos por este trabalho, foi feita tendo como base a Tabela 1.3 e as doses recebidas pelos trabalhadores, nos anos de 2000 e 2001, apresentadas nas Tabelas 4.11 a 4.13.

Dentro de cada grupo existem algumas diferenças nas tarefas executadas pelos trabalhadores e existem ainda trabalhadores que executam tarefas em mais de um grupo, o que complica sobremaneira a avaliação das doses recebidas a partir do monitoramento de área para radiação externa.

5.2.1 Grupo de alvos

A classificação das condições de trabalho dos trabalhadores do Grupo de Alvos foi feita tomando como base as doses recebidas nos anos de 2000 e 2001. Neste período, este grupo contou com os serviços dos trabalhadores A1, A2 e A3.

A Tabela 5.1 mostra as doses médias anuais dos trabalhadores A1, A2 e A3 e a classificação desses trabalhadores em função de suas doses médias anuais.

Tabela 5.1: Classificação das condições de trabalho do Grupo de Alvos

| Trabalhador | Dose Média Acumulada (mSv.a⁻¹) | Classificação |
|--------------------|--|----------------------|
| A1 | 18,10 | A |
| A2 | 16,32 | A |
| A3 | 1,73 | B |

5.2.2 Grupo de operadores

A classificação das condições de trabalho dos trabalhadores do Grupo de Operadores foi feita tomando como base as doses recebidas nos anos de 2000 e 2001. Neste período, este grupo contou com os serviços dos 06 trabalhadores (Op1, Op2, Op3, Op4, Op5 e Op6).

A Tabela 5.2 mostra as doses médias anuais dos trabalhadores Op1, Op2, Op3, Op4, Op5 e Op6 e a classificação desses trabalhadores em função de suas doses médias anuais.

Tabela 5.2: Classificação das condições de trabalho do Grupo de Operadores

| Trabalhador | Dose Média Acumulada (mSv.a⁻¹) | Classificação |
|--------------------|--|----------------------|
| O1 | 1,71 | B |
| O2 | M | B |
| O3 | 2,91 | B |
| O4 | 0,71 | B |
| O5 | 1,68 | B |
| O6 | 1,44 | B |

M: Menor que nível de registro (< 0.2mSv.m⁻¹ ou 2,4mSv.a⁻¹).

Os trabalhadores Op2 e Op4 têm doses médias anuais inferiores ao limite primário para indivíduo do público (1mSv.a^{-1}) e poderiam ser classificados como tais.

5.2.3 Grupo de proteção radiológica

A classificação das condições de trabalho dos trabalhadores do Grupo de Proteção Radiológica foi feita tomando como base as doses recebidas nos anos de 2000 e 2001. Neste período, este grupo contou com os serviços dos 03 trabalhadores (P1, P2 e P3). A Tabela 5.3 mostra as doses médias anuais dos trabalhadores P1, P2 e P3 e a classificação desses trabalhadores em função de suas doses médias anuais.

Tabela 5.3: Classificação das condições de trabalho do Grupo de Proteção Radiológica

| Trabalhador | Dose Média Acumulada (mSv.a^{-1}) | Classificação |
|-------------|--|---------------|
| P1 | 8,43 | B |
| P2 | 1,32 | B |
| P3 | 0,48 | B |

Consultando a Tabela 4.13, nota-se que o trabalhador P1, no ano de 2001, teve uma sensível diminuição no valor da dose acumulada anual e isso foi resultante de uma mudança de procedimento, sugerida durante o transcorrer deste trabalho, na execução das tarefas realizadas na dependência VII. Desta forma, considerando apenas as doses a partir do ano de 2001 todos os três trabalhadores estão abaixo do valor de 1/10 dos limites anuais, que é o objetivo

da proteção radiológica. O trabalhador P3 tem dose média anual inferior ao limite primário para indivíduos do público (1mSv/a) e poderia ser classificado como tal.

5.3 Estabelecimento dos valores de referência

5.3.1 Dependências I, II, III, IV, V, VI e XIV

Nestas dependências poderá ser adotado como valor de registro, algo inferior aos valores normalmente medidos, que poderá ser cerca de 20% a menos, isto é, 5 $\mu\text{Sv/h}$. Como as doses, nestes locais, são predominantemente advindas da radiação espalhada produzida pela operação do cíclotron, qualquer variação detectável será resultante de uma anormalidade no cíclotron e portanto um valor aceitável, seria o erro mínimo de medida, isto é, 20%, o que forneceria um valor de 7,2 $\mu\text{Sv/h}$, que seria tanto o limite de investigação como o limite de intervenção, pois denunciariam uma anormalidade do cíclotron que provavelmente acionaria os monitores fixos, principalmente, aquele da dependência VIII e os de nêutrons. Com relação ao limite de registro estabelecido aqui, ele será válido também para as demais dependências.

5.3.2 Dependências VII, VIII, IX e XIII

Para as dependências VII e VIII poderá ser adotado como valor de investigação, algo superior aos valores normalmente medidos, que poderá ser cerca de 10% acima da maior medida obtida na dependência; de acordo com as Tabelas 4.5 e 4.6, para as dependências VII e VIII os valores de investigação serão, respectivamente, 407 mSv/h e 396 $\mu\text{Sv/h}$. O valor máximo que limita

intervenção, para as duas dependências será o valor da dose anual permitida para o trabalhador, ou seja, 50 mSv.

Para as dependências IX e XIII, onde as taxas de doses são mais amenas poderá ser adotado como valor de investigação, algo superior aos valores normalmente medidos, que poderá ser cerca de 20% acima da maior medida obtida em cada dependência; de acordo com as Tabelas 4.7 e 4.8, para as dependências IX e XIII os valores de investigação serão 27 $\mu\text{Sv/h}$ e 96 $\mu\text{Sv/h}$, respectivamente. O valor para intervenção nas duas dependências será o valor da dose anual permitida para o trabalhador, ou seja, 50 mSv.

5.4 Aplicação do princípio ALARA

A aplicação do princípio ALARA para a categoria de trabalhadores, segundo a norma brasileira⁽³⁾, tem o objetivo de abaixar os valores de doses anuais de 50mSv/ano para os 3/10 dos limites anuais, numa primeira etapa, e para 1/10 dos limites anuais, numa segunda etapa. Assim sendo, dos 12 trabalhadores acompanhados, apenas 02 deles encontram-se acima dos 3/10, considerando que o trabalhador P1, do grupo de proteção radiológica, teve em 2001 dose inferior aos 5 mSv e também considerando o que foi exposto no parágrafo posterior à Tabela 5.3, do item 5.2.3.

Como a soma da dose média acumulada por ano dos três trabalhadores, A1, A2 e A3, é 36,15 $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ correspondendo a uma média de 12,05 $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$. Isto indica que uma nova distribuição das doses, que pode ser obtida por meio de uma melhor distribuição de tarefas, implicaria na redução das doses para valores inferiores aos 3/10 dos limites anuais, levando esses trabalhadores a serem

classificados na condição de trabalho B. Desta forma, estaria alcançado a otimização em uma primeira instância, restando a otimização em segunda instância, que seria reduzir doses a valores abaixo de 1/10 do limite anual.

5.5 Locais onde deverão ser aplicado o princípio ALARA

No item anterior, verificou-se que por meio de uma melhor distribuição nas tarefas desenvolvidas pelos 12 trabalhadores, deixaria todos com doses inferiores aos 3/10 dos limites anuais. Mas os integrantes do grupo de alvos permaneceriam com doses superiores a 1/10 dos limites anuais.

Fazendo uma análise minuciosa das Tabelas 4.5, 4.6 e 4.11 e das tarefas executadas pelos trabalhadores, verifica-se que as maiores frações de doses recebidas são nas dependências VII e VIII.

Neste caso, para diminuir as doses a valores aceitáveis de 5 mSv/a deverão ser introduzidas algumas melhorias nos procedimentos operacionais para execução das tarefas ou ainda, por exemplo, pelo uso de blindagens e manipuladores mecânicos, bem como por meio de treinamentos específicos dos trabalhadores para agilizar as operações.

5.6 Discussões genéricas

1. A avaliação das doses dos trabalhadores do cíclotron, que seria uma das funções do monitoramento controlador, não pode ser realizada em virtude das diversidades dos locais em que todos eles trabalham, como se informou neste trabalho, por exemplo: os

operadores do cíclotron substituem os trabalhadores do grupo de alvos em várias situações.

2. Se houvesse uma distribuição bem definida de tarefas em algumas dependências como as de números I a VI e XIV, a avaliação da dose nestas dependências seria simples e direta, já que foi encontrada uma constância dos valores medidos, pois seria baseada unicamente em função do tempo de permanência dos trabalhadores nestes locais. O fator de calibração seria dado pelas doses nestas dependências, que são iguais, mais as doses advindas do retroespalhamento do próprio trabalhador que também são próximas, como pode ser verificado pelos espectros de energias apresentados em 3.1, multiplicados pelos tempos de permanência em cada dependência. Já nas demais dependências, isto é, VII, VIII, IX e XIII existe primeiro a necessidade de se determinar uma dose média ponderada pelo tempo médio em cada local ocupado para cada uma das permanências, para depois proceder conforme apresentado para as dependências de I a VI e a XIV.
3. Nas posições de monitoramento das dependências VII, VIII, IX e XIII onde as doses forem inferiores a 1/10 daquela de maior dose poderão ser eliminadas. Mas para se realizar este cálculo deve-se levar em conta a permanência do trabalhador em cada posição e fazer uma média ponderada.

Na dependência VII a dose individual semanal nas posições ocupadas pelo trabalhador será em função de seus tempos de permanência citados no item 3.3:

$(0,2 \text{ mSv/h} \times 1 \text{ h/sem}) + (300 \text{ mSv/h} \times 0,5 \text{ h/sem}) + (0,8 \text{ mSv/h} \times 1 \text{ h/sem}) = 151 \text{ mSv/sem}$. Assim 1/10 deste valor é 15,1 mSv/sem. As doses por semana nas posições DA e DC são respectivamente $(0,2 \text{ mSv/h} \times 1 \text{ h/sem}) = 0,2 \text{ mSv/sem}$ e $(0,8 \text{ mSv/h} \times 1 \text{ h/sem}) = 0,8 \text{ mSv/sem}$ e, portanto são eliminados sendo mantida apenas a posição DB.

Nas demais dependências VIII, IX e XIII como os tempos em cada posição, de cada uma delas, são iguais basta eliminar todos os pontos de medida que são iguais ou inferiores a 1/10 daquela posição de maior dose. Pela tabela 4.6 da dependência VIII, pode-se verificar que devem ser eliminadas as posições EB, EC e ED, sendo mantida a posição EA; pela Tabela 4.7 da dependência IX, pode-se verificar que devem ser eliminadas as posições FC, FD e FE, sendo mantida a posição FB; já pela Tabela 4.8 da dependência XIII, pode-se verificar que devem ser eliminadas as posições HA, HB e HD, sendo mantida a posição HC.

4. Nas dependências I a VI e XIV os valores das doses são constantes e iguais nas diferentes posições em cada dependência e são resultantes da radiação de espalhamento oriundas do cíclotron. Portanto, basta escolher uma posição representativa de cada dependência. Foram escolhidas as seguintes posições.

Nas dependências I e II é mantida apenas a posição AA, pois os trabalhadores permanecem cerca de 95% do tempo nesta posição; nas

dependências III e IV, será mantida a posição BA pelas mesmas justificativas apresentadas para as dependências I e II.

Na dependência V, será mantida apenas a posição BF, pois é a posição onde os trabalhadores permanecem o maior tempo; na dependência VI será mantida apenas a posição CC, pelas mesmas justificativas apresentadas para a dependência V.

Por último, na dependência XIV será mantida apenas a posição IA, pois é a posição onde os trabalhadores permanecem o maior tempo

6.CONCLUSÕES

1. Foram alcançados os 13 objetivos descritos no Capítulo 1, item 1.8 que era a proposta do presente trabalho.
2. Das 32 posições de monitoramento do local de trabalho para radiação externa com função controladora, conseguiu-se eliminar 23 posições, portanto cerca de 72% do total.
3. Só há necessidade de monitoramento individual para radiação externa em dois trabalhadores; para radiação interna não há necessidade do monitoramento, segundo as normas internacionais.
4. Quando a dependência VI começar a operar rotineiramente com a irradiação de alvos, será necessário realizar um novo estudo pois os valores de doses devem ser do tipo demonstrado as dependências VII e IX.
5. Se o regime de operação do cíclotron for alterado com um aumento de tempo de irradiação, deverá ser efetuado um estudo, já que é difícil prever os novos valores de dose em cada dependência, isto é, não é unicamente um fator multiplicativo.

7. FUTUROS TRABALHOS

1. Efetuar um estudo a respeito de uma melhor distribuição das tarefas entre os trabalhadores do cíclotron, do ponto de vista de segurança e radioproteção, conforme mostrado no item 5.4.
2. Efetuar as otimizações de projeto e procedimentos incluindo o treinamento de pessoal nas dependências VII e VIII, conforme sugerido no item 5.5, para diminuir as doses dos trabalhadores do grupo de alvos.
3. Efetuar um trabalho semelhante a este para exposições potenciais, isto é, aquelas exposições que podem ser previstas com probabilidade de ocorrência, mas que nem sempre ocorrem; são consideradas condições anormais.
4. Se no futuro forem detectadas as contaminações previstas, deverá ser realizado um estudo a respeito de seus valores, providências e futuras tendências.
5. Quando a irradiação de alvos na dependência VI for rotineira, será necessário realizar um novo estudo, pois os valores das doses deverão ser alterados para mais.
6. Quando houver demanda para o aumento do tempo de operação do cíclotron, deverá ser realizado também um novo estudo verificando a alteração das doses e, se possível, a tendência para quando o cíclotron estiver operando com sua carga máxima de 100 horas por semana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** ICRP, Vienna, 1991 (Publication 60).
- 2 - 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).
- 3 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de radioproteção - CNEN-NE – 3.01.** Rio de Janeiro: 1988.
- 4 - CLAUS, W. D. **What is health physics?** Health Physics Journal, 1: 56-61, 1958.
- 5 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas - CNEN-NE – 6.02.** Rio de Janeiro: 1984.
- 6 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações nucleares - CNEN-NE – 1.04.** Rio de Janeiro: 1984.
- 7 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas - CNEN-NE – 6.05.** Rio de Janeiro: 1985.
- 8 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** ICRP, Vienna, 1977 (Publication 26).
- 9 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic safety standards for radiation protection.** ICRP, Vienna, 1982 (Safety Series No. 9).

- 10 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles for monitoring of radiation protection of workers.** ICRP, Vienna, 1982 (Publication 35).
- 11 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de materiais radioativos - CNEN-NE – 5.01.** Rio de Janeiro: 1988.
- 12 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Policy for the disposal of radioactive waste.** ICRP, Vienna, 1998 (Publication 77).
- 13 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations as applied to the disposal of long lived solid radioactive waste.** ICRP, Vienna, 2000 (Publication 81).
- 14 - ATTIX, F.H.; ROESCH, W. C. AND TOCHILIN, E. **Radiation dosimetry,** New York, Academic Press, 1978.
- 15 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Implications of commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable.** ICRP, Vienna, 1973 (Publication 22).
- 16 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection.** ICRP, Vienna, 1983 (Publication 37).
- 17 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Optimization and decision-making in radiological protection.** ICRP, Vienna, 1989 (Publication 55).
- 18 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic requirements for personnel monitoring.** IAEA, Vienna, 1980 (Safety Series No. 14).
- 19 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources.** ICRU, Bethesda, 1985 (Publication 39).

- 20 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Principles for the radiation protection of workers**. ICRP, Vienna, 1997 (Publication 75).
- 21 - RIBEIRO, M.S.; SANCHES, M.P.; SANCHEZ, A.S.; RODRIGUES, D.L. Radiation exposure to workers at cyclotron facilities. In V CONGRESSO REGIONAL EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E SEGURANÇA, **Anais**, 29 abr.- 04 mai., 2001, Recife, CD-ROM.
- 22 - RIBEIRO, M.S.; SANCHES, M.P.; RODRIGUES, D.L. Cálculo de blindagem para nêutrons em acelerador cíclotron. In: V ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, **Anais**, outubro 16-20, 2000, Rio de Janeiro, CD-ROM.
- 23 - CAMBISES, P.B.S.; SANCHEZ, A.S.; ALMEIDA, C.C.; RODRIGUES, D.L. Proposta para um programa de classificação e sinalização de áreas restritas. In: VII CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Anais**, 31 ago.-3 set.,1999, Belo Horizonte, CD-ROM.
- 24 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic principles for occupational radiation monitoring**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No. 84).
- 25 - KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurements**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- 26 -INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Fundamental quantities and units for ionizing radiation**. ICRU, Bethesda, 1988 (Publication 60).
- 27 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Serviço de radioproteção - CNEN-NE – 3.02**. Rio de Janeiro: 1988.