INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Análise dos níveis de radiação nas dependências dos Aceleradores
Cíclotron do IPEN**

Paula Perrucho Nou Silva

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

Orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Janete Cristina Gonçalves
Gaburo Carneiro

*Segunda Edição
Cópia Revisada pelo Autor segundo sugestões da
Banca Examinadora
Setembro/2012*

São Paulo
2012

*Dedico este trabalho a minha
avó Walquíria (in memoriam)
que continua a viver, não
apenas em minhas lembranças.*

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente, eu agradeço a Deus pela minha vida.
- Aos meus pais Ana Maria Perrucho Nou e Itamar de Mecnas Silva e a todos da minha família, por sempre acreditarem no meu potencial.
- Ao meu namorado Raphael, pela atenção e companheirismo.
- À minha orientadora Dr^a. Janete Cristina, pelo apoio prestado.
- Ao Dr. Demerval Leônidas Rodrigues, pela oportunidade e incentivo.
- Ao Dr. Goro Hiromoto pela valiosa ajuda.
- Aos funcionários da Gerência de Radioproteção (GRP) que colaboraram direta e indiretamente para realização deste trabalho.
- Às amigas Amanda e Ivani pela motivação.
- Aos meus amigos de Aracaju, que mesmo distantes nunca se esqueceram de mim.
- À Comissão de Pós-Graduação (CPG) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN-SP pela oportunidade de realização deste trabalho.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.
- E a todos que contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

*“Não me envergonho de mudar de opinião, porque não me
envergonho de pensar”.*

Blaise Pascal

Análise dos níveis de radiação nas dependências dos Aceleradores Cíclotron do IPEN

Paula Perrucho Nou Silva

RESUMO

O objetivo principal deste estudo foi analisar, na Gerência de Aceleradores Cíclotron do IPEN, o controle das doses de radiação ionizante e sua distribuição, comparando seus valores com as exigências regulamentares. A análise do controle das taxas de dose por meio do monitoramento de área foi realizada a partir de dados obtidos durante as produções de Flúor-18 no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011, totalizando 1011 medidas em cada ponto monitorado. A análise das doses provenientes de exposições ocupacionais foi realizada por meio de consulta aos históricos de dose individual. Durante os anos de 2007 a 2011 foram analisados os registros individuais das doses efetivas, totalizando 91 registros e de 2009 a 2011 foram analisados os registros de dose equivalente (nas mãos), totalizando 49 registros. Os indivíduos ocupacionalmente expostos envolvidos no estudo foram classificados, de acordo com a tarefa, em três grupos: alvos, radioproteção e operação e manutenção. Os resultados obtidos dos níveis de exposição ocupacional da radiação foram analisados e comparados com os limites estabelecidos pela autoridade regulatória nacional e com as recomendações internacionais. Com base nos resultados registrados do monitoramento de área e das doses recebidas, os procedimentos de radioproteção aplicados na instalação durante o período estudado foram averiguados e sugestões de melhorias foram dadas sob o ponto de vista da proteção radiológica.

Analysis of the radiation levels at the dependences of the Accelerator Cyclotron of IPEN

ABSTRACT

The main purpose of this study was to analyze, at the *Gerência de Aceleradores Cíclotron* (Management of Cyclotron Accelerators) at IPEN, the control of ionizing radiation doses and their distribution by comparing their values with regulatory requirements. The analysis of the dose rate for the area monitoring was carried out from the data obtained during the production of Fluorine-18 from January 2010 to December 2011, totalizing 1011 measurements at each monitored spot. The doses analysis was performed through consultation of the individual dose records. During the years 2007 to 2011 the records of individual effective doses were analyzed, adding up to 91 records; from 2009 to 2011 the records of equivalent dose (hands) were analyzed, totalizing 49 records. The occupationally exposed individuals involved in the study were classified in three groups according to their task: targets, radioprotection and operation and maintenance. The results of occupational exposure levels of radiation were analyzed and compared with values established in national standards and international recommendations. Based on the results of the area monitoring and the doses received and recorded, radiation protection procedures implemented at the facility during the study period were checked and suggestions for improvements were given from the point of view of radiological protection.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Produção de radioisótopos	2
1.2 Descrição geral de um Cíclotron	3
1.3 Objetivo	6
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 Efeitos biológicos da radiação ionizante	7
2.2 Principais Grandezas e Unidades	7
2.2.1 Atividade	8
2.2.2 Exposição, X	8
2.2.3 Dose absorvida, D	9
2.2.4 Dose equivalente, H_T	9
2.2.5 Dose efetiva, E	10
2.2.6 Dose coletiva	12
2.3 Sistema de proteção radiológica	12
2.4 Níveis de referência	13
2.5 Descrição das funções e dos tipos de monitoramento	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Exposições ocupacionais provenientes de aceleradores de partículas	17
4. MATERIAIS E MÉTODO	21
4.1 Local de estudo	21
4.1.1 Cyclone-30	23
4.1.2 Cyclone-18	23
4.1.3 Radioisótopos produzidos nos cíclotrons do IPEN	24
4.2 Atividades executadas pelos IOE's	25
4.3 Monitoramento de área	26
4.4 Avaliação da dose efetiva e dose equivalente	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33

5.1 Taxas de doses relativas ao monitoramento de área _____	33
5.1.1 <i>Cyclone-18</i> _____	33
5.1.2 <i>Cyclone-30</i> _____	35
5.2 Doses efetivas _____	37
5.2.1 Doses efetivas por grupo de trabalho _____	38
5.3 Dose equivalente nas mãos dos IOE's _____	45
5.4 Análise das medidas de proteção radiológica e sugestão de melhorias _____	46
6. CONCLUSÕES _____	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	49
ANEXO I – FOLHAS DE REGISTRO DO MONITORAMENTO DE ÁREA _____	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Simplificação do interior de um cíclotron.	3
Figura 2: Representação da trajetória e extração dos íons.	4
Figura 3: Planta da Instalação de Aceleradores Cíclotron.	21
Figura 4: Cíclotron <i>Cyclone-30</i> do IPEN.	23
Figura 5: Cíclotron <i>Cyclone-18</i> do IPEN.	24
Figura 6: Contador Geiger-Müller, marca Automess, modelo 6150 AD5 com sonda Teletector.	26
Figura 7: Contador proporcional com BF ₃ e moderador cilíndrico da marca Ludlum, modelo 15.	27
Figura 8: Contador proporcional com ³ He e moderador esférico nomeado Dineutron da marca Camberra, modelo 0.5NH1/1KD.	27
Figura 9: Localização dos pontos monitorados no período entre janeiro de 2010 a julho de 2011: As letras de A-J representam os pontos monitorados durante a operação do <i>Cyclone-18</i> ; as letras de A1-G1 os pontos monitorados durante a operação do <i>Cyclone-30</i> para a produção de Flúor-18; e as letras A2, B2 e C2 os pontos monitorados durante a produção de Iodo-123.	29
Figura 10: Localização dos pontos monitorados no período entre agosto a dezembro de 2011: As letras de A-G representam os pontos monitorados durante a operação do <i>Cyclone-18</i> ; as letras de A1-D1 os pontos monitorados durante a operação do <i>Cyclone-30</i> para a produção de Flúor-18; e as letras A2, B2 e C2 os pontos monitorados durante a produção de Iodo-123.	29
Figura 11: Dose efetiva dos IOE's do grupo Alvos. Cada cor representa um profissional.	40
Figura 12: Dose efetiva dos IOE's do grupo Radioproteção. Cada cor representa um profissional.	42
Figura 13: Dose efetiva dos IOE's do grupo Operação e Manutenção. Cada cor representa um profissional.	44
Figura 14: Média da dose efetiva mensal por grupo de trabalho.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de radioisótopos produzidos em cíclotron, o tipo de reação nuclear, o tempo de meia vida e o tipo de decaimento que cada elemento apresenta.-----	5
Tabela 2: Valores de w_R para cada tipo de radiação. -----	10
Tabela 3: Fatores de ponderação recomendados para tecidos e órgãos. -----	11
Tabela 4: Limites das doses anuais. -----	13
Tabela 5: Exposição ocupacional de trabalhadores em instalações com aceleradores de partículas. -----	18
Tabela 6: Descrição das principais dependências da Gerência de Aceleradores Cíclotron.-----	22
Tabela 7: Descrição dos pontos monitorados na Gerência de Aceleradores Cíclotron durante as produções de Flúor-18 e Iodo-123, antes e após a modificação dos pontos. 30	
Tabela 8: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de janeiro de 2010 a julho de 2011.-----	33
Tabela 9: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de agosto a dezembro de 2011.-----	35
Tabela 10: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de janeiro de 2010 a julho de 2011.-----	36
Tabela 11: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de agosto a dezembro de 2011.-----	37
Tabela 12: Distribuição dos IOE's da instalação por intervalo de dose, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos. -----	38
Tabela 13: Distribuição dos IOE's do grupo Alvos por intervalo de dose, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos. -----	39
Tabela 14: Distribuição dos IOE's do grupo Radioproteção por intervalo de dose efetiva, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos. -----	41
Tabela 15: Distribuição dos IOE's do grupo Operação e Manutenção por intervalo de dose efetiva, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos. -----	43
Tabela 16: Resultados da distribuição dos IOE's por grupo de trabalho por dose equivalente média recebida entre 2009-2011. -----	45

1. INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia nuclear vem crescendo consideravelmente, sendo inúmeras as áreas de aplicação. Desta forma, a produção de fontes de radiação ionizante para uso dessa tecnologia e o número de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) a esta radiação tem aumentado. Entretanto, o crescente emprego da radiação ionizante pode acarretar em um risco potencial à saúde do homem e ao meio ambiente que o cerca, principalmente se for usada de maneira inadequada.

A publicação Fontes e Efeitos da Radiação Ionizante – *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, referente aos estudos sobre exposição às radiações ionizantes, publicado pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica – *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* – UNSCEAR [1] classifica as fontes de exposição à radiação em duas grandes categorias: fontes naturais e fontes artificiais de radiação. Esta última inclui as práticas¹ relacionadas ao ciclo do combustível nuclear, ao uso da radiação para fins médicos, para fins industriais, às atividades militares e a fontes diversas. Todas essas práticas podem aumentar a probabilidade de exposição ocupacional à radiação ionizante.

A exposição ocupacional é definida como a exposição normal ou potencial de um indivíduo em decorrência de seu trabalho ou treinamento em práticas autorizadas ou intervenções, excluindo-se a radiação natural do local [2].

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR [3], fornece recomendações e orientações sobre a proteção e a segurança contra os riscos associados à radiação ionizante, além de estabelecer valores de doses máximas permissíveis tanto para o IOE quanto para o público em geral.

¹ Prática é definida como toda atividade humana que introduz fontes de exposição ou vias de exposição adicionais ou estende a exposição a mais pessoas, ou modifica o conjunto de vias de exposição devida a fontes existentes, de forma a aumentar a probabilidade de exposição de pessoas ou o número de pessoas expostas [2].

A Publicação 103 da CIPR do ano de 2007 [3] é a versão atualizada da Publicação 60 [4], constando a filosofia internacional com relação às doses recebidas pelos IOE's, além de fazer menção ao sistema de proteção radiológica.

Baseando-se nas recomendações da CIPR, a Agência Internacional de Energia Atômica, AIEA, publica as suas próprias recomendações de proteção e segurança.

No Brasil, o órgão oficial que regulamenta e fiscaliza o uso da radiação ionizante é a Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, que se baseia nas publicações da CIPR e da AIEA para estabelecer normas e regulamentos de proteção radiológica.

1.1 Produção de radioisótopos

Em quase todos os países do mundo pode-se encontrar aplicações para os radioisótopos, contribuindo de forma significativa tanto para a melhoria da produção industrial quanto para a saúde de maneira geral.

Embora os primeiros radioisótopos produzidos de forma artificial tenham sido feitos nos aceleradores cíclotron desenvolvidos por Ernest O. Lawrence e colaboradores na década de 1930, mais de 30 anos se passaram até que radioisótopos produzidos nestes mesmos aceleradores começassem a desempenhar um papel mais importante na medicina, com a produção dos primeiros radiofármacos [5].

A principal vantagem dos aceleradores nas produções de radioisótopos, quando comparados com os reatores nucleares, são o baixo custo de construção, montagem e operação e alta Atividade Específica². Outras vantagens significantes são a pequena quantidade de resíduos radioativos que é gerada das reações com partículas carregadas e a baixa probabilidade de acidentes nas instalações que possuem aceleradores de

²Atividade Específica (AE) é uma medida do número de átomos radioativos ou moléculas quando comparada com o número total destes átomos ou moléculas presentes em uma dada amostra. É expressa em termos de unidade de radiação por unidade de massa (Bq/mol).

partículas.

O número de instalações de aceleradores cíclotrons para produções de radioisótopos assim como o número de IOE's está em constante crescimento.

No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, fazendo parte da Diretoria de Radiofarmácia, DIRF, encontra-se a Gerência de Aceleradores Cíclotron, uma instalação radiativa que produz radioisótopos para uso em diagnóstico na medicina. Nesta instalação, onde foi realizado o presente estudo, operam duas máquinas: *Cyclone-18* e *Cyclone-30*.

1.2 Descrição geral de um Cíclotron

O cíclotron é um equipamento que acelera partículas carregadas para produção de radioisótopos, utilizando diferença de potencial elétrico. O seu funcionamento está relacionado ao uso de duas placas semicirculares ocas, que são montadas com suas extremidades diametralmente adjacentes dentro de um campo magnético uniforme que é normal ao plano das placas e é feito o vácuo. A estas placas são aplicadas oscilações de alta frequência que produzem um campo elétrico oscilante na região diametral entre ambas. Uma simplificação do interior de um cíclotron está apresentada na Figura 1.

Figura 1: Simplificação do interior de um cíclotron.

Dessa forma, o campo elétrico acelera os íons, formados na região diametral, para o interior de um dos dois eletrodos, chamados de “D’s”, descrevendo uma órbita circular mediante um campo magnético. Com o aumento da velocidade da partícula, o raio do feixe aumenta gradualmente, numa trajetória em espiral, até que ele é deslocado em direção ao alvo a ser bombardeado. A energia final resultante é a soma das contribuições individuais do sistema. A trajetória e a extração do feixe estão representadas na Figura 2.

Figura 2: Representação da trajetória e extração dos íons.

A tecnologia envolvida na construção e operação dos ciclotrons tem melhorado significativamente ao longo da última década. Os quais são agora máquinas estáveis, controladas por computadores e que podem produzir uma grande variedade de radioisótopos. A tecnologia ligada a essas máquinas tem se tornado cada vez mais complexa, entretanto o conhecimento básico sobre seus princípios e limitações é de extrema importância para se entender sobre os problemas que podem surgir durante as operações normais [6].

Na interação projétil-alvo, por meio de reações nucleares, os elementos químicos do alvo são transformados em isótopos instáveis e radioativos e, portanto, tornam-se emissores de radiação ionizante. Além disso, há a existência de uma fonte de radiação

proveniente dos nêutrons secundários produzidos pelo feixe principal de partículas ao incidir sobre o alvo e sobre as estruturas do próprio acelerador quando este está em funcionamento, induzindo, desta forma, a radioatividade em componentes internos da máquina e nas paredes do recinto, que, por sua vez, continuam emitindo radiação mesmo quando o ciclotron não está operando [1, 7, 8].

A Tabela 1 apresenta alguns radioisótopos produzidos em ciclotrons, o tipo de reação nuclear, seu tempo de meia vida ($T_{1/2}$) e tipo de decaimento que cada elemento apresenta.

Tabela 1: Tipos de radioisótopos produzidos em ciclotron, o tipo de reação nuclear, o tempo de meia vida e o tipo de decaimento que cada elemento apresenta.

Nuclídeos	Reação Nuclear	$T_{1/2}$ (h)	Decaimento
F-18	$^{18}\text{O} (p,n) ^{18}\text{F}$	1,8	$\beta^+ \rightarrow 2\gamma$
I-123	$^{124}\text{Xe} (p,2n) ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	13,3	γ : CE
Ga-67	$^{68}\text{Zn} (p,2n) ^{67}\text{Ga}$	78,3	γ : CE
Tl-201	$^{203}\text{Tl} (p,3n) ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	73,1	γ : CE
In-111	$^{112}\text{Cd} (p,2n) ^{111}\text{In}$	67,2	γ : CE

Atualmente, na Gerência de Aceleradores Ciclotron, ocorrem produções diárias de Flúor-18 e duas produções semanais de Iodo-123.

Com a finalidade de garantir condições de trabalho satisfatórias aos indivíduos que atuam em instalações que possuem aceleradores de partículas é necessário que se aplique um conjunto de medidas que visam a sua proteção contra possíveis efeitos adversos à saúde, por meio do estabelecimento de um programa de proteção radiológica [2].

O monitoramento de área, o controle individual da dose por meio do uso de dosímetros individuais, bem como a aderência ao princípio de otimização ALARA (*As Low as Reasonably Achievable* – Tão baixas quanto razoavelmente exequível) são medidas essenciais deste programa, pois possibilitam o levantamento preliminar das

taxas de dose na região a ser ocupada pelo IOE, bem como estimar a dose acumulada por ele. De acordo com o Plano de Proteção Radiológica - PPR, são elaborados periodicamente relatórios de atividade com a finalidade de fornecer dados para a tomada de decisão sobre medidas operacionais, proteção dos IOE's e do meio ambiente [9]. Os registros dos resultados de monitoramento são mantidos em concordância com os requisitos regulamentares.

Espera-se que este trabalho contribua de maneira significativa no auxílio das decisões referentes ao PPR das instalações com aceleradores de partículas.

1.3 Objetivo

O objetivo deste estudo foi analisar, na Gerência de Aceleradores Cíclotron do IPEN, o controle das doses de radiação ionizante e sua distribuição, comparando seus valores com as exigências regulamentares. Além disso, descrever como as medidas de radioproteção apresentadas no PPR foram implementadas. Para tanto, foi necessário estabelecer algumas metas:

- ✓ Conhecer a Instalação, os locais sujeitos a exposição tanto normal quanto potencial e as tarefas executadas pelos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE's);
- ✓ Efetuar um levantamento e uma análise das doses individuais recebidas pelos IOE's nos últimos cinco anos (2007-2011) e das taxas de doses obtidas nos locais de trabalho durante o período de dois anos (2010-2011);
- ✓ Sugerir medidas de melhorias no PPR da Instalação estudada, se necessário;
- ✓ Identificar, se possível, os locais de trabalho nos quais deverá ser reintroduzido o princípio da otimização – ALARA.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As exposições prolongadas às radiações ionizantes geram um risco potencial de ocorrência de efeitos biológicos que dependem da quantidade de energia absorvida pelas células e do local da célula em que a energia foi absorvida. Quanto maior a energia absorvida, maior será o dano.

2.1 Efeitos biológicos da radiação ionizante

Os efeitos biológicos das radiações podem ser classificados em efeitos determinísticos (reações danosas do tecido) e efeitos estocásticos.

Efeitos Determinísticos: são aqueles que apresentam dose limiar, ou seja, dose mínima necessária para que certos efeitos ocorram. Além disso, a gravidade do efeito é diretamente proporcional à dose. Para doses acima do limiar, a probabilidade de ocorrência do efeito é de 100%. Exemplos dos efeitos determinísticos são eritema, catarata, síndrome aguda da radiação etc.

Efeitos Estocásticos: são efeitos considerados de natureza randômica, não apresentam dose limiar e a probabilidade de ocorrência é diretamente proporcional à dose. Cânceres sólidos e leucemia são exemplos dos efeitos estocásticos.

Uma das questões iniciais na utilização da radiação ionizante é como realizar uma medição de quantidades utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria [10, 11].

2.2 Principais Grandezas e Unidades

A seguir são apresentados alguns conceitos utilizados neste trabalho:

2.2.1 Atividade

Atividade de um material radioativo é a quantidade de radionuclídeo em um determinado estado de energia em um instante de tempo. Essa grandeza é definida por:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

onde,

dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt [2, 11].

A unidade no Sistema Internacional, SI, é denominada becquerel (Bq).

2.2.2 Exposição, X

A grandeza exposição é definida como o quociente entre dQ por dm , onde dQ é o valor da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons em um volume de ar, de massa dm , são completamente freados neste volume, conforme equação abaixo [10].

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Esta grandeza somente é válida para radiação X e gama e sua unidade no SI é C/Kg [11].

2.2.3 Dose absorvida, D

A grandeza dose absorvida, D , foi proposta para suprir as limitações da grandeza exposição, é válida para todos os tipos de radiação ionizante e para qualquer tipo de material absorvedor. Ela é definida como o quociente de $d\bar{\epsilon}$ por dm , onde $d\bar{\epsilon}$ é a quantidade de energia média depositada num determinado volume de matéria de massa dm pela radiação ionizante, conforme equação abaixo.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

A unidade atual da grandeza dose absorvida é o gray (Gy) que equivale a 1 J/kg [2, 3, 11].

2.2.4 Dose equivalente, H_T

A grandeza dose equivalente, H_T , foi definida para fornecer informações sobre o dano biológico causado no homem por cada tipo de radiação. Ela considera fatores como o tipo de radiação ionizante, a energia e a distribuição da radiação no tecido.

A dose equivalente é expressa por:

$$H_T = D_T W_R$$

onde,

D_T é a dose absorvida média no órgão ou tecido e W_R é o fator de ponderação da radiação [2, 3, 11].

Os valores de W_R foram definidos com base na eficácia biológica relativa (RBE)

dos diferentes tipos de radiação.

A unidade da grandeza dose equivalente no SI é o J/kg, denominada sievert (Sv).

Na Tabela 2 são apresentados os valores de W_R para os diferentes tipos de radiação [3, 12].

Tabela 2: Valores de w_R para cada tipo de radiação.

Tipo de Radiação	Fator de Ponderação para Radiação, W_R
Fótons	1
Elétrons e múons ³	1
Prótons e píons ⁴ carregados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão, íons pesados	20
Nêutrons	<p>Função contínua de acordo com a energia do nêutron:</p> $w_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 5,0 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$

*Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

2.2.5 Dose efetiva, E

Com o objetivo de limitar o risco dos efeitos estocásticos, foi introduzido o conceito de dose efetiva. Esta grandeza está baseada no princípio de que para um certo nível de proteção, o risco deve ser o mesmo se o corpo inteiro for irradiado uniformemente, ou se a irradiação é localizada em um determinado órgão [13].

Definida pela equação que segue, a dose efetiva é dada pela soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos.

³ Múons são partículas elementares que decaem formando elétrons e pósitrons.

⁴ Píons são partículas mediadoras da força forte, que é a força responsável pela coesão e estabilidade do núcleo atômico.

$$E = \sum_T W_T H_T$$

onde,

W_T é o fator de ponderação de órgão ou tecido, o qual leva em conta o risco de efeito estocástico e H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão [2, 11].

A unidade da grandeza dose equivalente no SI é o J/kg, denominada sievert (Sv).

Os valores de W_T para cada órgão e tecido são apresentados na Tabela 3 [3].

Tabela 3: Fatores de ponderação recomendados para tecidos e órgãos.

Tecido	W_T
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmões	0,12
Estômago	0,12
Mamas	0,12
Gônadas	0,08
Bexiga	0,04
Esôfago	0,04
Fígado	0,04
Tireoide	0,04
Superfície óssea	0,01
Cérebro	0,01
Glândulas salivares	0,01
Pele	0,01
Restante*	0,12
Total	1,00

* Restante: Adrenais, Região Extratorácica (ET), Bexiga biliar, Coração, Rins, Gânglios Linfáticos, Músculo, Mucosa Oral, Pâncreas, Próstata (♂), Intestino Grosso, Baço, Timo, Útero/ cérvix (♀).

2.2.6 Dose coletiva

A dose coletiva é definida como o produto do número de indivíduos expostos a uma fonte de radiação ionizante, pelo valor médio da distribuição de dose efetiva desses indivíduos. A dose coletiva é expressa em sievert-pessoa (Sv.pessoa), isto é, a dose efetiva total recebida por uma população ou um grupo de pessoas [2, 14].

2.3 Sistema de proteção radiológica

O principal objetivo da proteção radiológica é contribuir para um nível adequado de proteção das pessoas e do ambiente contra os efeitos nocivos da exposição à radiação, sem limitar indevidamente as práticas benéficas advindas desta exposição [3].

O sistema de proteção radiológica, estabelecido pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, CIPR, tem por finalidade principal proteger a saúde do ser humano. Os objetivos referentes à saúde são relativamente direcionados: ao gerenciamento e controle das exposições à radiação ionizante de tal modo que os efeitos determinísticos sejam evitados, e os riscos de ocorrência dos efeitos estocásticos sejam minimizados a valores racionalmente alcançáveis [3, 10].

Princípio da Justificação: qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição à radiação ionizante deve ser justificada com relação a outras alternativas e deve produzir um benefício líquido positivo para a sociedade.

Princípio da Otimização: as doses devem ser mantidas “tão baixas quanto razoavelmente exequível”, filosofia ALARA, levando em conta os fatores sociais e econômicos.

Limitação de dose: os limites de dose representam um valor máximo de dose, abaixo do qual os riscos decorrentes da exposição à radiação são considerados toleráveis, ou seja, são valores de dose aos quais os indivíduos podem ficar expostos, sem que isto resulte em um dano à sua saúde, durante toda sua vida. Para o estabelecimento dos limites de dose para trabalhadores foram considerados os efeitos somáticos tardios,

principalmente o câncer e os efeitos hereditários até a segunda geração.

Segundo as recomendações da CIPR, em sua Publicação 103, o limite de dose efetiva ocupacional é de 20 mSv por ano, resultante da média aritmética em 5 anos consecutivos (100 mSv em 5 anos), desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano [3].

Por meio da norma CNEN NN-3.01 - “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, são apresentados os limites de doses anuais para o público e o indivíduo ocupacionalmente exposto. A exposição dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse excedam os limites de doses anuais estabelecidos, apresentados na Tabela 4. O termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

Tabela 4: Limites das doses anuais [2].

Limites de doses anuais			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto, IOE	Indivíduo do público
Dose Efetiva	Corpo inteiro	*20 mSv	1 mSv
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e Pés	500 mSv	---

*Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

2.4 Níveis de referência [2, 15, 16]

São valores de dose estabelecidos ou aprovados pela CNEN, com a finalidade de determinar ações a serem desenvolvidas quando forem alcançados ou previstos de serem excedidos. Estes níveis incluem:

Nível de registro: valor de dose obtido em um programa de monitoramento, cuja magnitude é relevante para justificar o seu registro. A CNEN estabelece o valor de

0,2 mSv/mês para dose efetiva.

Nível de investigação: valores de dose que quando atingidos ou excedidos torna necessária a investigação de suas causas e consequências, bem como a proposição de ações corretivas necessárias. O nível de investigação para monitoração individual é de 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês para dose efetiva.

2.5 Descrição das funções e dos tipos de monitoramento

A finalidade do monitoramento é avaliar e estimar as exposições às radiações ionizantes, internas e externas, nos indivíduos. É justificado pelo auxílio na obtenção e demonstração de um grau adequado de proteção. Dentro de um programa de proteção radiológica, um programa de monitoramento permite comprovar que os limites de dose estão sendo obedecidos, confirmar os resultados previstos nos processos de otimização e classificar as áreas de trabalho [17, 18, 19, 20].

As funções de um programa de monitoramento podem ser divididas em três categorias [21], a saber:

Monitoramento de rotina: Associado a operações contínuas ou rotineiras. É importante para demonstrar que as condições de trabalho, bem como os valores de doses individuais, permanecem satisfatórios, e também para atender às exigências regulatórias. Este tipo de monitoramento, em geral é de natureza preventiva e confirmatória e atua no controle da exposição ocupacional [22].

Monitoramento relacionado com a tarefa: Aplicado a uma operação (tarefa) específica, fornece dados para auxiliar na tomada de decisão imediata, isto é, no gerenciamento da operação e também auxiliar na otimização da proteção radiológica. É realizada pelo próprio trabalhador.

Monitoramento especial: Possui natureza investigatória e normalmente envolve uma situação no local de trabalho onde as informações são insuficientes para demonstrar um controle adequado. É idealizado para fornecer informações detalhadas de situações no

local de trabalho, que possam ajudar a esclarecer qualquer problema e definir procedimentos futuros. Em situações normais é introduzido para resolver problemas e após a sua solução é eliminado. Em situações acidentais de trabalho ele é introduzido com a finalidade de se voltar à normalidade e é eliminado quando isso ocorre.

O tipo de monitoramento pode ser dividido em dois de acordo com a sua localização:

Monitoramento do local de trabalho: Envolve as medidas realizadas no ambiente de trabalho e tem caráter preventivo. Podendo ser subdividido para:

- Radiação externa: Garante a existência de condições satisfatórias de trabalho analisando o controle das exposições às radiações externas. Além disso, mostra que o ambiente de trabalho é satisfatório para a radiação externa e que não sofreu mudanças que possam exigir uma reavaliação dos procedimentos de operação;
- Contaminação de superfície: Procura mostrar que há ausência de contaminação próxima de um determinado valor de referência;
- Contaminação do ar: Tenta manter os valores de contaminação do ar no ambiente de um local de trabalho inferiores aos padrões de proteção e níveis de referência.

Monitoramento individual: Envolve medidas realizadas por um equipamento portado pelo trabalhador ou pela determinação da quantidade de material radioativo incorporado ou presente sobre o corpo e a interpretação dessas medidas. Apresenta caráter confirmatório e é subdividida para:

- Exposição externa e interna: Obtém uma avaliação da dose efetiva e, onde for adequada, a dose equivalente em tecidos expostos; contribui para o controle de operações e para o projeto da instalação e em caso de acidentes, fornece informações importantes para o tratamento de saúde adequado;
- Contaminação de pele e roupa: Importante para demonstrar concordância com os limites pertinentes, detectar a contaminação que poderia ser transferida para fora de

uma área controlada e em caso de sobre-exposição accidental, fornecer informações importantes para um auxílio médico apropriado;

2.6 Classificação de áreas [15, 16]

De acordo com recomendação internacional [3, 16] e a norma nacional CNEN NN 3.01, as áreas devem ser classificadas sempre que houver previsão de exposição ocupacional e devem ser claramente definidas no PPR. Devendo ser revista, sempre que necessário, em função do modo de operação ou de qualquer modificação que possa alterar as condições de exposição normal ou potencial.

Para fins de gerenciamento da radioproteção, o grupo de proteção radiológica deve classificar as áreas de trabalho com exposição à radiação ionizante ou a material radioativo em área controlada ou área supervisionada.

Área controlada: Uma área deve ser classificada como controlada quando for necessária a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir o controle de exposições normais, evitar a disseminação da contaminação durante condições normais de operação, além de evitar ou limitar a extensão das exposições potenciais. Estas áreas devem estar sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, além disso, é importante afixar instruções pertinentes nos pontos de acesso e em outros locais apropriados no interior dessas áreas.

Área supervisionada: Área supervisionada é qualquer área que não foi classificada como controlada, e onde as condições de exposição ocupacional necessitam ser mantidas sob supervisão. Assim como nas áreas controladas, é obrigatório o uso de sinalização nos pontos de acesso.

As definições das áreas estão baseadas na experiência e em julgamentos operacionais [3].

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Exposições ocupacionais provenientes de aceleradores de partículas

As publicações do UNSCEAR (2000, 2008) [1, 23] fazem a compilação de todos os estudos importantes existentes na literatura mundial e constitui a base de dados utilizada pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica para o cálculo de riscos associados à radiação ionizante e à limitação de doses.

Segundo as publicações UNSCEAR (2000, 2008) e de acordo com o Conselho Nacional de Radioproteção e Medidas (NCRP) [8] a maior parte da exposição causada por aceleradores resultam da radioatividade induzida e ocorre normalmente durante reparos, manutenção e modificação do equipamento. Esta exposição, advinda normalmente da radiação gama, provem de itens do equipamento que foram ativados. O risco de exposição interna quando os aceleradores estão operando é pequeno, portanto, a maior preocupação é com as doses oriundas da irradiação externa [1, 23].

Chowdhury et al. (2008) [24] afirmam que a radiação induzida pode ser produzida em todos os aceleradores capazes de liberar nêutrons e outros hádrons⁵. Os autores concluem que sistemas de blindagem além do monitoramento constante das áreas potencialmente expostas garantem a diminuição da exposição à radiação ionizante.

A publicação do UNSCEAR 2000 [23] apresenta resultados da exposição ocupacional de trabalhadores em instalações com aceleradores de partículas, ilustrado na Tabela 5. Nos período entre 1990-1994 os dados abrangem apenas cerca de 1300 trabalhadores monitorados de oito países e não são suficientes para permitir uma estimativa confiável da dose proveniente de aceleradores em todo o mundo. A Tabela 5 ilustra ainda os dados compilados pela publicação, para outros três períodos distintos: 1975-1979; 1980-1984; 1985-1989, comparando as médias das doses anuais obtidas

⁵ Hádrons são partículas formadas por quarks (partículas elementares, ou seja, que não possuem estrutura interna). Dentre os mais famosos podem-se citar os prótons e nêutrons.

com o período de 1990-1994. A média de dose coletiva anual para o período de 1990-1994 é cerca de 1,0 Sv.pessoa, em comparação com cerca de 7,4 Sv.pessoa para o primeiro período (1975-1979), 3,7 Sv.pessoa e 3.5 Sv.pessoa para os períodos de 1980-1984 e 1985-1989, respectivamente.

Tabela 5: Exposição ocupacional de trabalhadores em instalações com aceleradores de partículas.^a

País/Área	Período	IOE's monitorados (10 ³)	IOE's mensuráveis (10 ³)	Dose coletiva anual (Sv.pessoa)	Dose efetiva média anual (mSv)	
					IOE's monitorados	IOE's mensuráveis
Argentina	1990-1994	0,03	0,02	0,00	0,09	0,12
Canadá	1975-1979	0,58	0,19	0,17	0,30	0,91
	1980-1984	0,88	0,23	0,40	0,45	1,76
	1985-1989	1,00	0,53	1,06	1,06	2,00
	1990-1994	0,99	0,40	0,77	0,77	1,94
China	1990-1994	0,02	0,00	0,02	1,04	1,71
Equador	1993-1994	0,01	0,00	0,00	-	0,00
Finlândia	1980-1984		0,01	0,01		1,23
	1985-1989		0,01	0,01		1,23
	1990-1994	0,08	0,01	0,01	0,08	1,23
Holanda	1980-1984	0,18	0,01	0,01	0,03	0,67
	1985-1989	0,16	0,01	0,00	0,03	0,46
Polônia	1992-1994	0,14	0,13	0,14	0,95	1,04
Eslováquia	1990-1994	0,02	0,01	0,04	1,68	2,70
Eslovênia	1990-1994	0,01	0,01	0,00	0,51	0,51
África do Sul	1975-1979	0,07	0,03	0,03	0,46	1,00
	1980-1984	0,10	0,04	0,27	2,72	6,59
	1985-1989	0,22	0,07	0,34	1,56	4,76
Reino Unido	1985-1989	0,50		0,25	0,50	
Estados Unidos ^b	1975-1979	3,96	1,73	7,19	1,82	4,16
	1980-1984	3,92	1,44	3,07	0,78	2,12
	1985-1989	4,25	1,66	2,07	0,49	1,24
Total de dados relatados ^c	1975-1979	4,50		7,38	1,62	
	1980-1984	4,93		3,73	0,76	
	1985-1989	5,72		3,52	0,62	
	1990-1994	1,31	0,58	0,98	0,75	1,68

^a Os dados são médias anuais ao longo dos períodos indicados.

^b Os dados são apenas para instalações licenciadas do Departamento de Energia dos Estados Unidos. A dose efetiva inclui a componente dos nêutrons.

^c Estes dados devem ser interpretados com cuidado, pois os países incluídos no somatório para os períodos de cinco anos podem não ser os mesmos, dependendo se os dados foram relatados para o período em questão. Consequentemente, a comparação direta dos dados para diferentes períodos é inválida na medida em que os dados incluem as contribuições de diferentes países.

O conjunto de dados não permite tirar maiores conclusões, apenas que os níveis de dose coletiva anual são consistentes e que a contribuição das doses advindas de todas as utilizações industriais, em todo o mundo, é insignificante [23].

Em 1998, Mukherjee, B. [25] chegou à conclusão que cíclotrons que aceleram íons negativos, como o *Cyclone-30*, apresentam uma eficiência de quase 100% da extração do feixe. Isto permite um alto rendimento na produção do radioisótopo, assim como a ativação do alvo, linhas do feixe e outros auxiliares localizados na caverna. Desta forma há uma maior probabilidade de exposição à radiação ionizante durante manutenção e reparos do equipamento.

Em 2006, Sharma e cols. [26], apresentaram que o desenvolvimento na tecnologia dos cíclotrons e das células quentes bem como a automação dos módulos de síntese de radiofármacos, vem reduzindo significativamente a exposição à radiação dos IOE's e do meio ambiente. Além disso, os autores afirmaram que ao seguir as recomendações de segurança, é possível reduzir a exposição nos laboratórios sem comprometer o rendimento do radiofármaco e o controle de qualidade. Eles também aconselham que em caso de acidente, deve-se esperar pelo menos 24 horas antes de abrir a blindagem para reparar a fonte de íons, janela do alvo, sistema de vácuo, entre outros componentes.

Os autores concluíram que repetidas falhas no funcionamento aumentavam as taxas de dose, conseqüentemente a proteção radiológica depende do controle de qualidade do cíclotron e da habilidade de seus operadores.

Kuo e cols., (2010) [27] realizaram um estudo no Centro de Cíclotron do Hospital Memorial Shin Kong Wu Ho-Su (*SK Cyclotron Center*), onde é produzido ^{18}F -FDG para ser utilizado no Centro de Tomografia por Emissão de Pósitron (*Pet Center*) para fins diagnósticos. Utilizando o método do dosímetro termoluminescente duplo foi estimado que, para todos os trabalhadores do *SK Cyclotron Center*, a dose equivalente média pessoal Hp(10) e a dose equivalente média no dedo Hp(0,07) foram de 10,15 mSv/ano e 288,57 mSv/ano, respectivamente.

Infelizmente, a literatura sobre proteção radiológica em instalações com aceleradores cíclotrons é muito escassa, indicando a necessidade de que sejam realizados mais estudos na área.

4. MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Local de estudo

O estudo foi desenvolvido na Gerência de Aceleradores Cíclotron, localizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) na cidade de São Paulo no período de janeiro/2011 a abril/2012.

A Gerência de Aceleradores Cíclotron é uma instalação radiativa que produz radioisótopos de meia vida curta para uso em diagnóstico na medicina e que faz parte da Diretoria de Radiofarmácia do IPEN-CNEN/SP. Esta instalação possui dois aceleradores cíclotron: Modelo *Cyclone-18* e o Modelo *Cyclone-30*.

A Instalação está representada na Figura 3, onde a cor amarela representa as áreas controladas e a azul as áreas supervisionadas.

Figura 3: Planta da Instalação de Aceleradores Cíclotron.

Na Tabela 6 estão descritas as principais dependências da instalação, representadas na Figura 1 por algarismos romanos.

Tabela 6: Descrição das principais dependências da Gerência de Aceleradores Cíclotron.

Algarismo	Descrição
I	Caverna do Cíclotron <i>Cyclone-18</i>
II	Área de Manutenção das Células Quentes 2
III	Laboratório de Produção de Radiofármacos para PET
IV	Área de Acesso ao <i>Cyclone-18</i>
V	Sala do Sistema de Refrigeração do <i>Cyclone-18</i>
VI	Ponto de Controle Radiológico <i>Cyclone-18</i>
VII	Sala de Fontes do <i>Cyclone-18</i>
VIII	Sala de Controle do <i>Cyclone-18</i>
IX	Sala de Máquinas
X	Sala de Controle do <i>Cyclone-30</i>
XI	Sala de Fontes do <i>Cyclone-30</i>
XII	Ponto de Controle Radiológico <i>Cyclone-30</i>
XIII	Corredor de Circulação
XIV	Área de Manutenção das Células Quentes 1
XV	Laboratório de Manipulação de Alvos Irradiados
XVI	Área de Despacho das Blindagens
XVII	Área de Acesso à Linha de Feixe e ao <i>Cyclone-30</i>
XVIII	Caverna do Cíclotron <i>Cyclone-30</i>
XIX	Sala de Irradiação de Alvos Líquidos e Gasosos
XX	Acesso de Veículos para Transporte de Materiais Radioativos

4.1.1 *Cyclone-30*

O ciclotron de 30 MeV (*Cyclone-30*), ilustrado na Figura 4, foi adquirido da empresa belga *Ion Beam Applications* (IBA) e instalado no IPEN no final da década de 90. Esse equipamento produz feixes acelerados de prótons com energias entre 15 MeV e 30 MeV, apresentando corrente de feixe de até 350 μA [28, 29, 30]. Embora produza prótons acelerados, o ciclotron, na verdade, acelera íons negativos H^- no interior das cavidades de seus *D*'s. Os prótons são extraídos utilizando um dispositivo denominado *stripper*, que em sua extremidade possui uma folha de carbono, cuja função é transformar os íons negativos em prótons ao passarem por ela.

Atualmente, as produções de Flúor-18 e de Iodo-123 são realizadas com o *Cyclone-30*.

Figura 4: Ciclotron *Cyclone-30* do IPEN

4.1.2 *Cyclone-18*

O ciclotron de 18 MeV (*Cyclone-18*), ilustrado na Figura 5 e adquirido também da IBA, foi instalado no IPEN no ano de 2008, iniciando o seu funcionamento em 2009 para produção de Flúor-18. Este radioisótopo é produzido diariamente, atendendo centros de diagnósticos, hospitais e clínicas em, pelo menos, cinco estados brasileiros, podendo atender a uma demanda de até 222 GBq/dia (6 Ci/dia) de

18-fluordesoxiglicose (^{18}F -FDG), que é uma molécula de glicose marcada com flúor radioativo⁶.

Figura 5: Cíclotron *Cyclone-18* do IPEN.

O funcionamento dessa máquina é praticamente o mesmo do *Cyclone-30*. Porém, a energia máxima dos feixes acelerados de prótons é de 18 MeV e a corrente de feixe é em torno de 150 μA [28].

4.1.3 Radioisótopos produzidos nos cíclotrons do IPEN

Flúor-18: O Flúor-18, de meia vida 109 minutos, é obtido pela irradiação da água enriquecida, H_2^{18}O , com prótons de 15 MeV de energia, por meio da reação $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$. O Flúor-18 decai por emissão de pósitrons, e na aniquilação do par elétron-pósitron são emitidos dois fótons γ de 511 keV de energia cada.

⁶ A síntese do ^{18}F -FDG ocorre no laboratório de manipulação de alvos irradiados em um tempo previsto de 27 minutos utilizando o módulo sintetizador da GE (GE TRACERlab MX_{FDG} Synthesizer Module). O produto final é obtido por meio de processos de purificação da solução aquosa de ^{18}F , separação do íon $^{18}\text{F}^-$ e reações químicas para a marcação da molécula de glicose.

Iodo-123: O Iodo-123, de meia vida 13,2 horas é produzido pela irradiação do gás Xenônio-124 com prótons de 30 MeV de energia, por meio da reação $^{124}\text{Xe} (p,2n) ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$. Neste processo, é produzido Césio-123 que decai para Xenônio-123 e após 6 horas decai para Iodo-123. Este radionuclídeo decai por captura eletrônica emitindo um único fóton γ de 159 keV de energia.

4.2 Atividades executadas pelos IOE's

Os profissionais que exercem atividades na instalação estudada estão expostos ocupacionalmente à radiação ionizante e de acordo com as tarefas executadas, foram classificados em três grupos, como consta no PPR da instalação:

Grupo Alvos: Este grupo é responsável pela manutenção, preparação e troca de alvos e pela intervenção nas linhas de feixe no ciclotron de 18 MeV e 30 MeV. Esta intervenção ocorre obrigatoriamente com o ciclotron desligado para que possíveis falhas sejam corrigidas, tais como: escape de mangueiras conectadas à linha do feixe; reparo ou troca da janela de refrigeração da frente do alvo; colocação de hélio para refrigeração do alvo. Além disso, este grupo realiza as etapas de recolhimento e envio do Iodo-123; preparação e processamento do ^{18}F -FDG e limpeza e manutenção das celas blindadas.

Grupo Operação e Manutenção: A principal tarefa deste grupo é a operação dos ciclotrons, realizando manutenções nas máquinas quando necessário. Esses profissionais permanecem a maior parte do tempo nas salas de controle, sendo que, eventualmente, entram nas salas de fontes, onde realizam as leituras dos painéis das fontes elétricas que alimentam os ciclotrons. Nestas salas estão localizados os comandos liga/desliga da bomba de vácuo e das fontes elétricas, que podem ser desligadas em caso de intervenção. Além disso, em caso de manutenção, esses operadores desempenham suas tarefas na caverna do ciclotron [31].

Grupo Radioproteção: Este grupo realiza um conjunto de medidas que visam à proteção do indivíduo exposto às radiações ionizantes contra possíveis efeitos indesejados [2]. É responsável pela classificação e sinalização das áreas de trabalho; segurança física; controle de acesso de cargas e de pessoal; medidas de controle para a

liberação de materiais radiativos; controle, identificação e liberação de rejeitos radiativos; monitoramento da contaminação; descontaminação; monitoramento dos níveis de radiação [32].

4.3 Monitoramento de área

O monitoramento de área possui função rotineira e tem como objetivo controlar a exposição ocupacional. É realizado sempre que há operação do ciclotron para produção de radioisótopos. As medidas das taxas de dose foram realizadas por meio de detectores portáteis e os valores obtidos foram anotados em uma folha de registro⁷ desenvolvida pelo supervisor da instalação e específica para cada radioisótopo produzido.

Para medir a radiação gama proveniente do decaimento dos radioisótopos produzidos, foi utilizado um contador Geiger-Müller, marca Automess, modelo 6150 AD5 com sonda Teletector, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Contador Geiger-Müller, marca Automess, modelo 6150 AD5 com sonda Teletector.

⁷ As folhas de registro estão apresentados em anexo.

Durante a operação do ciclotron *Cyclone-18*, para medir os nêutrons provenientes das reações nucleares na produção de radioisótopos, foi utilizado um contador proporcional com BF_3 e moderador cilíndrico da marca Ludlum, modelo 15. Na Figura 7 está representado este equipamento.

Figura 7: Contador proporcional com BF_3 e moderador cilíndrico da marca Ludlum, modelo 15.

Na operação do *Cyclone-30*, o monitoramento de nêutrons foi efetuado utilizando um contador proporcional com ^3He e moderador esférico nomeado Dineutron da marca Camberra, modelo 0.5NH1/1KD. Este detector está representado na Figura 8.

Figura 8: Contador proporcional com ^3He e moderador esférico nomeado Dineutron da marca Camberra, modelo 0.5NH1/1KD.

Após um processo de otimização, efetuado durante o período estudado, o monitoramento de área ficou sendo realizado em 14 pontos da instalação.

Os pontos de monitoramento são determinados pelo supervisor de radioproteção da instalação para garantir a segurança dos trabalhadores, bem como demonstrar qualquer falha eventual no sistema. Estes pontos foram escolhidos a partir da análise dos resultados das taxas de dose obtidas em diversos locais de interesse durante a operação dos cíclotrons.

Os dados analisados foram referentes às medidas realizadas durante as produções de Flúor-18 no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2011. Até o mês de julho de 2011, os pontos de monitoramento eram de A-J para o *Cyclone-18* e de A1-G1 para o *Cyclone-30*.

Após uma análise da equipe de radioproteção da instalação e com o intuito de otimizar a proteção radiológica do local, esses pontos de monitoramento foram modificados e reduzidos de 20 para 14 pontos.

Nas Figuras 9 e 10 são ilustradas a representação esquemática da instalação com a demarcação dos pontos monitorados, durante a produção de Flúor-18 e Iodo-123 antes e depois do processo de otimização, respectivamente. A descrição dos pontos é mostrada na Tabela 7.

Figura 9: Localização dos pontos monitorados no período entre janeiro de 2010 a julho de 2011: As letras de A-J representam os pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-18*; as letras de A1-G1 os pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-30* para a produção de Flúor-18; e as letras A2, B2 e C2 os pontos monitorados durante a produção de Iodo-123.

Figura 10: Localização dos pontos monitorados no período entre agosto a dezembro de 2011: As letras de A-G representam os pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-18*; as letras de A1-D1 os pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-30* para a produção de Flúor-18; e as letras A2, B2 e C2 os pontos monitorados durante a produção de Iodo-123.

Tabela 7: Descrição dos pontos monitorados na Gerência de Aceleradores Cíclotron durante as produções de Flúor-18 e Iodo-123, antes e após a modificação dos pontos.

Pontos		Descrição
Antigos	Atuais	
A	-	Área de manutenção das células quentes 2 – Parede externa à Caverna do <i>Cyclone-18</i>
B	-	Porta de acesso à Caverna do <i>Cyclone-18</i>
C	A	Sala do sistema de refrigeração do <i>Cyclone-18</i>
D	B	Corredor de circulação – Porta de acesso ao piso superior da instalação
E	C	Sala de máquinas – Parede externa à Caverna do <i>Cyclone-18</i>
F	D	Sala de controle do <i>Cyclone-30</i> – Parede externa à Caverna do <i>Cyclone-18</i>
G	E	Sala de fontes do <i>Cyclone-30</i> – Parede externa à Caverna do <i>Cyclone-18</i>
H, C1*, E1	F, C1	Laboratório de manipulação de alvos irradiados
I, F1	-	Filtros de exaustão
J, D1*, G1	G, D1	Área de manutenção das células quentes 1
A1, A2	A1, A2	Corredor de circulação da área controlada – Porta
B1, B2	B1, B2	Porta de acesso à Caverna do <i>Cyclone-30</i>
C2		Corredor de circulação da área controlada – Parede externa à Caverna do <i>Cyclone-30</i>

*Anteriormente, as medidas eram realizadas antes da síntese do ^{18}F -FDG. A partir de agosto de 2011 as medidas passaram a ser realizadas aproximadamente 17 minutos, após o início da síntese.

Na produção de Flúor-18 o monitoramento acontece em duas etapas:

Primeira etapa: É realizado o monitoramento dos níveis de radiação gama e nêutrons durante a operação do cíclotron quando a água enriquecida (H_2^{18}O) está sendo irradiada. Os pontos A-E são monitorados quando o *Cyclone-18* está em operação. Já os pontos A1 e A2, quando o *Cyclone-30* está em funcionamento.

Segunda etapa: os pontos F e G (*Cyclone-18*) e C1 e D1 (*Cyclone-30*) são monitorados aproximadamente 17 minutos após o início da síntese do ^{18}F -FDG na célula quente, pois é quando o Flúor-18 começa sua fase de evaporação. Desta forma, é possível garantir

que os trabalhadores presentes no Laboratório de Manipulação de Alvos Irradiados e na Área de Manutenção das Células Quentes 1 permaneçam em condições de trabalho satisfatórias.

Durante a produção de Iodo-123 são monitorados os pontos A2-C2. Entretanto, a atividade produzida semanalmente deste radioisótopo é em média 74 GBq (2 Ci), enquanto para o Flúor-18 a atividade produzida semanalmente é em média 1,1 TBq (30 Ci). Além disso, a energia proveniente do decaimento deste último é mais elevada. Sendo assim, os resultados obtidos com os monitoramentos das produções de Flúor-18 apresentam maior significância para este estudo, quando comparados com os resultados dos monitoramentos das produções de Iodo-123.

4.4 Avaliação da dose efetiva e dose equivalente

As estimativas de dose efetiva e dose equivalente são realizadas de acordo com o programa de monitoramento estabelecido pelo PPR local, aprovado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Os IOE's são controlados para a radiação externa por meio do uso de um dosímetro termoluminescente, TL, composto por três cristais de Sulfato de Cálcio dopado com Disprósio ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$) e de um dosímetro eletrônico, Dosicard. Ambos posicionados na região do tórax.

Além disso, os IOE's da Gerência de Aceleradores Cíclotron utilizam, rotineiramente, outro dosímetro TL, tipo pulseira, posicionado no punho durante a realização das atividades de cada grupo de trabalho, com a finalidade de estimar as doses equivalentes nas mãos.

O controle da incorporação do material radioativo pelos trabalhadores é realizado por meio de medidas in vivo (contador de corpo inteiro e de tireoide) com frequência semestral.

O levantamento das doses dos IOE's foi realizado a partir da consulta aos históricos de dose individual. De 2007 a 2011, foram analisados os registros individuais das doses efetivas, totalizando 91 registros; de 2009 a 2011 foram analisados os registros de dose equivalente (nas mãos), totalizando 49 registros.

As doses acumuladas em função do tempo foram analisadas e comparadas com os seguintes valores estabelecidos pela norma CNEN-NN-3.01 [2, 15].

- Nível de registro: 0,2 mSv/mês;
- Nível de investigação para dose efetiva: 6 mSv/ano;
- Dose efetiva anual média em 5 anos consecutivos para o IOE: 20 mSv;
- Limite de dose efetiva anual (valor máximo) para o IOE em um único ano: 50 mSv;
- Nível de investigação para dose equivalente: 150 mSv/ano;
- Limite de dose equivalente anual nas extremidades: 500 mSv.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Taxas de doses relativas ao monitoramento de área

5.1.1 *Cyclone-18*

Em cada ponto, durante o período estudado (2010-2011), foi obtido um total de 800 medidas para radiação gama e 762 para nêutrons.

Os resultados referentes às taxas de dose média para radiação gama e nêutrons dos pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-18*, no período de janeiro de 2010 a julho de 2011, são apresentados na Tabela 8. As incertezas foram calculadas a partir da combinação das incertezas do tipo A e do tipo B.

Tabela 8: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de janeiro de 2010 a julho de 2011.

Ponto	Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)					
	Gama			Nêutron*		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
A	0,7	$2,85 \pm 0,07$	20,7	3,1	$11,67 \pm 0,19$	35,2
B	0,3	$0,71 \pm 0,01$	2,1	3,1	$3,53 \pm 0,04$	9,6
C	0,2	$0,82 \pm 0,04$	14,6	3,1	$3,55 \pm 0,05$	19,2
D	0,2	$1,15 \pm 0,03$	14,2	3,1	$6,31 \pm 0,13$	41,6
E	0,4	$11,59 \pm 0,21$	121,7	6,4	$43,47 \pm 0,49$	73,6
F	0,2	$1,23 \pm 0,07$	22,0	3,1	$12,04 \pm 0,15$	25,6
G	0,3	$1,41 \pm 0,04$	15,0	1,9	$11,09 \pm 0,15$	22,4
H	0,3	$9,9 \pm 2,9$	1860	-	-	-
I	2,5	1245 ± 46	10400	-	-	-
J	2,3	$56,1 \pm 9,3$	5790	-	-	-

*Não há monitoramento de nêutrons nos pontos “H”, “I” e “J”.

O ponto B, apesar de ser posicionado junto à porta da caverna do ciclotron, foi o que apresentou menor influência da radiação tanto para gama quanto para nêutron. Isso ocorre por que a direção do feixe não é voltada diretamente para o ponto e quando o ciclotron está em funcionamento a porta mantém-se fechada.

O ponto E apresentou maior taxa de dose com relação a nêutrons. A direção do feixe de radiação e uma menor espessura da parede com relação aos outros pontos fazem com que a taxa de dose seja mais alta nesse local. Esse ponto localiza-se dentro da sala de máquinas, portanto há apenas permanência eventual de pessoas (fator de ocupação $\frac{1}{4}$ [8]).

Nos pontos H, I e J não são realizados monitoramentos de nêutrons, pois a liberação destes só ocorre enquanto o ciclotron está ligado, durante a produção do radioisótopo. Desta forma, não há influência de nêutrons nas dependências de manutenção e manipulação das células quentes.

A variação significativa entre os valores mínimos e máximos das medidas nos pontos H e J está relacionada ao número de produções realizadas no dia, ao tempo de irradiação, à atividade do material irradiado e ao rendimento da síntese.

Observa-se que o ponto I, mostrado na Tabela 8, apresentou valores de taxa de dose consideravelmente elevados para radiação gama quando comparados com os outros pontos. Isso está relacionado com a influência da evaporação do Flúor-18 durante a síntese do ^{18}F -FDG. Este ponto localiza-se no teto da instalação, mais precisamente nos filtros de exaustão, desta forma não há permanência de trabalhadores no local. Este ponto era monitorado apenas para o controle do processo.

A partir de agosto de 2011 foi realizada uma otimização do monitoramento de área, resultando na exclusão dos pontos A, B e I por não haver permanência de trabalhadores nestes locais. Além disso, os pontos A e B apresentavam valores de taxa de dose muito baixos e o ponto I era operacional, cuja finalidade era apenas verificar o rendimento da produção de ^{18}F -FDG.

A Tabela 9 apresenta os resultados das taxas de dose média para radiação gama e nêutrons, após a otimização realizada a partir de agosto até dezembro de 2011. As incertezas foram calculadas a partir da combinação das incertezas do tipo A e do tipo B.

Tabela 9: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de agosto a dezembro de 2011.

Ponto	Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)					
	Gama			Nêutron*		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
A	0,4	$0,64 \pm 0,01$	1,2	3,1	$3,51 \pm 0,08$	9,4
B	0,5	$1,05 \pm 0,02$	1,9	3,1	$6,02 \pm 0,19$	15,6
C	1,6	$12,67 \pm 0,83$	143	9,4	$42,22 \pm 0,62$	62,4
D	0,5	$1,13 \pm 0,07$	11	6,2	$13,83 \pm 0,18$	18,7
E	0,3	$1,41 \pm 0,03$	2,7	6,2	$11,89 \pm 0,22$	15,6
F	0,1	$7,32 \pm 0,53$	49,8	-	-	-
G	0,2	$34,8 \pm 1,5$	155	-	-	-

* Não há monitoramento de nêutrons nos pontos “F” e “G”.

O ponto A, antigo ponto C, localiza-se na sala do sistema de refrigeração do *Cyclone-18*, onde qualquer vazamento de material radioativo na água que refrigera a máquina pode ser detectado por meio do monitoramento. O ponto B, antigo ponto D, apesar de apresentar baixa taxa de dose para as duas radiações existentes, é necessário que haja o monitoramento, pois foi constatado ser o local, da região do corredor de circulação, onde a taxa de dose é mais significava.

O ponto C corresponde ao antigo ponto E, citado anteriormente. Os pontos D e E, antigos F e G, estão nas paredes externas da caverna do cíclotron e são influenciados pela radiação gama e por nêutrons. Os pontos F e G correspondem aos antigos pontos H e J, também citados anteriormente.

5.1.2 *Cyclone-30*

Durante o período estudado, entre janeiro de 2010 a julho de 2011, foi obtido um total de 211 medidas em cada ponto. Os resultados referentes às taxas de dose média para radiação gama e nêutrons dos pontos monitorados durante a operação do *Cyclone-30* podem ser observados na Tabela 10. As incertezas foram calculadas a partir da combinação das incertezas do tipo A e do tipo B.

Tabela 10: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de janeiro de 2010 a julho de 2011.

Ponto	Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)					
	Gama			Nêutron*		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
A1	0,1	$0,53 \pm 0,03$	2,7	< LD**	< LD**	< LD**
B1	0,4	$3,22 \pm 0,20$	13,1	0,1	$0,61 \pm 0,02$	1,8
C1	0,1	$18,1 \pm 3,2$	378,0	-	-	-
D1	0,1	$6,2 \pm 2,8$	438,0	-	-	-
E1	0,2	30 ± 18	2790	-	-	-
F1	1,3	1244 ± 87	4610	-	-	-
G1	2,0	92 ± 17	1340	-	-	-

* Não há monitoramento de nêutrons nos pontos de C1-G1;

**LD: Limite de detecção do contador Dineutron, modelo 0.5NH1/1KD ($0,025 \mu\text{Sv/h}$).

Os pontos A1 e B1, apesar de apresentarem valores baixos de taxa de dose para radiação gama, são os dois principais pontos de monitoramento que indicam a segurança do trabalhador e ajudam a detectar alguma falha no sistema quando o *Cyclone-30* está operando.

Os pontos C1-G1 estão localizados nas dependências de manutenção e manipulação das células quentes, onde não há influência de nêutrons, apenas da radiação gama proveniente do radioisótopo produzido.

O antigo módulo de produção do ^{18}F -FDG não apresentava uma boa eficiência, gerando grande evaporação do Flúor-18. Desta forma, o monitoramento era realizado antes do início da síntese, nos pontos C1 e D1, e durante a síntese, nos pontos E1- G1.

Com o processo de otimização, a partir de agosto de 2011, os pontos C1 e D1 foram excluídos, pois os antigos módulos para a síntese do ^{18}F -FDG foram substituídos, e o monitoramento passou a ser realizado somente durante a síntese, aproximadamente 17 minutos após seu início. O ponto F1 também foi excluído pelo mesmo motivo do ponto I, ou seja, por se tratar apenas de um ponto de controle de processo.

A Tabela 11 apresenta os resultados das taxas de dose média após a otimização do monitoramento de área, realizada a partir de agosto de 2011. As incertezas foram calculadas a partir da combinação das incertezas do tipo A e do tipo B.

Tabela 11: Resultados das taxas de dose para radiação gama e nêutrons de agosto a dezembro de 2011.

Ponto	Taxa de dose ($\mu\text{Sv/h}$)					
	Gama			Nêutron*		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
A1	0,1	$0,51 \pm 0,05$	2,1	< LD**	< LD**	< LD**
B1	0,4	$3,36 \pm 0,63$	33,4	0,3	$1,04 \pm 0,30$	12,5
C1	0,1	$6,89 \pm 0,88$	23,5	-	-	-
D1	0,2	114 ± 30	1070	-	-	-

* Não há monitoramento de nêutrons nos pontos “C1” e “D1”.

** LD: Limite de detecção do contador Dineutron, modelo 0.5NH1/1KD ($0,025 \mu\text{Sv/h}$).

No decorrer do período estudado, o ponto A1 apresentou taxa de dose de nêutrons abaixo do limite de detecção do aparelho, isto é, menor que $0,025 \mu\text{Sv/h}$. Entretanto, é importante que este ponto continue sendo monitorado como medida de segurança, pois o feixe de radiação é voltado diretamente para ele. Além disso, possibilita a identificação de qualquer situação anormal que venha ocorrer neste local.

5.2 Doses efetivas

A Tabela 12 apresenta o número de IOE's monitorados, bem como sua distribuição em seis intervalos de dose, para cada ano do período estudado. A incerteza apresentada na dose efetiva média foi obtida a partir do desvio padrão das medidas.

A distribuição das doses recebidas pelos IOE's mostra que 81,3% deles receberam uma dose efetiva maior que $2,4 \text{ mSv/ano}$, isto é, acima do nível de registro especificado na norma nacional [2, 15].

No ano de 2007, um IOE foi exposto à dose de $25,8 \text{ mSv}$, que foi atribuída à manutenção no sistema porta alvos e à radiação residual ali presente. É importante destacar que, apesar de ter sido ultrapassada a dose anual média em cinco anos, nenhum dos profissionais excedeu o limite de dose estabelecido em norma em um único ano [2].

Tabela 12: Distribuição dos IOE's da instalação por intervalo de dose, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos.

<i>Intervalo de dose efetiva (mSv)</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
0 – 2,4*	2	5	1	9	0
2,4 – 6,0	4	6	10	5	15
6,0 – 10,0	4	3	5	4	2
10,0 – 15,0	2	2	2	0	3
15,0 – 20,0	2	1	1	1	0
20,0 – 50,0	1	0	0	0	1
Nº total de indivíduos monitorados	15	17	19	19	21
Dose coletiva (mSv.pessoa)	130,5	92,0	110,8	76,7	141,4
Dose efetiva média (mSv)	8,7 ± 1,7	5,4 ± 1,1	5,83 ± 0,92	4,0 ± 1,0	6,7 ± 1,1

* O valor de 2,4 mSv é resultante da soma do valor do nível de registro (0,2 mSv/mês) em 12 meses.

Comparando o comportamento das doses coletivas entre o primeiro e o último ano observa-se um aumento de 8,4%. Isto ocorreu devido ao aumento do número de funcionários no ano de 2011 e ao aumento da produção de radioisótopos. Apesar da produção em 2011 ter diminuído quando comparada ao ano de 2010, ela ainda foi maior do que no ano de 2007.

Observando a dose efetiva média em cada ano, verifica-se que, apesar da implantação de outro ciclotron (*Cyclone-18*) em 2009, houve uma diminuição significativa da mesma no ano de 2010. Entretanto, em 2011 observou-se que houve um aumento de 67,5% da dose efetiva média em função do aumento no número de manutenções nos aceleradores, porém ainda é um valor abaixo do obtido em 2007.

5.2.1 Doses efetivas por grupo de trabalho

Alvos

Os IOE's que fazem parte deste grupo apresentaram a maior dose efetiva ao longo dos anos. Este resultado está relacionado à manutenção de componentes ativados e à radiação induzida proveniente destes, e ao manuseio de materiais radioativos [1, 8].

Na Tabela 13 é apresentado o número de IOE's monitorados do grupo Alvos, bem como sua distribuição de acordo com os intervalos de dose efetiva, para cada ano

do período estudado. Além disso, é apresentada a dose coletiva e dose efetiva média recebida pelos IOE's. A incerteza apresentada na dose efetiva média foi obtida a partir do desvio padrão da média.

Tabela 13: Distribuição dos IOE's do grupo Alvos por intervalo de dose, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos.

<i>Intervalo de dose efetiva (mSv)</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
0 – 2,4	0	0	0	1	0
2,4 – 6,0	1	0	1	1	2
6,0 – 10,0	0	2	2	3	1
10,0 – 15,0	0	2	2	0	3
15,0 – 20,0	2	1	1	1	0
20,0 – 50,0	1	0	0	0	1
Nº total de indivíduos monitorados	4	5	6	6	7
Dose coletiva (mSv.pessoa)	62,9	55,6	56,6	44,3	80,0
Dose efetiva média (mSv)	15,7 ± 4,3	11,1 ± 1,5	9,4 ± 1,9	7,4 ± 2,1	11,4 ± 2,5

Os IOE's do grupo Alvos receberam, no período estudado, doses anuais médias no intervalo de $(7,4 \pm 2,1)$ mSv a $(15,7 \pm 4,3)$ mSv, sendo que a dose anual máxima recebida foi de 25,8 mSv, por um IOE no ano de 2007.

Observou-se que dos 28 registros de dose analisados ao longo dos anos, 96,4% apresentaram dose acima de 2,4 mSv/ano, sendo que 78,6% permaneceram acima do nível de investigação. Apenas 2 registros apresentaram dose acima de 20 mSv nos anos de 2007 e 2011. Estas doses foram recebidas pelo mesmo IOE durante a manutenção no sistema porta alvos.

Na Figura 11 estão ilustradas as doses efetivas destes IOE's. Somente foram apresentados os valores acima de 2,4 mSv/ano (valor referente à soma do valor do nível de registro em 12 meses).

Figura 11: Dose efetiva dos IOE's do grupo Alvos. Cada cor representa um profissional.

Radioproteção

A Tabela 14 apresenta o número de IOE's monitorados do grupo Radioproteção, sua distribuição de acordo com os intervalos de dose efetiva, bem como a dose efetiva média para cada ano do período estudado. A incerteza apresentada na dose efetiva média foi obtida a partir do desvio padrão da média.

Tabela 14: Distribuição dos IOE's do grupo Radioproteção por intervalo de dose efetiva, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos.

<i>Intervalo de dose efetiva (mSv)</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
0 – 2,4	0	0	0	1	0
2,4 – 6,0	1	3	2	2	4
6,0 – 10,0	2	1	2	1	0
10,0 – 15,0	1	0	0	0	0
15,0 – 20,0	0	0	0	0	0
>20,0	0	0	0	0	0
Nº total de indivíduos monitorados	4	4	4	4	4
Dose coletiva (mSv.pessoa)	27,9	20,9	24,5	15,6	20,2
Dose efetiva média (mSv)	$7,0 \pm 1,7$	$5,22 \pm 0,58$	$6,1 \pm 1,2$	$3,9 \pm 1,6$	$5,04 \pm 0,44$

Os IOE's do grupo radioproteção receberam, no período estudado, doses efetivas anuais médias no intervalo entre $(3,9 \pm 1,6)$ mSv e $(7,0 \pm 1,7)$ mSv, sendo que a dose anual máxima recebida foi de 11,2 mSv por um IOE em 2007. Observou-se que dos 20 registros de dose analisados, 35% das doses apresentaram valores acima do nível de investigação. As doses estão relacionadas principalmente com as tarefas rotineiras do grupo.

As doses efetivas dos IOE's do grupo Radioproteção são mostradas na Figura 12, na qual cada cor representa um profissional. Somente foram apresentados os valores de dose acima de 2,4 mSv/ano.

Figura 12: Dose efetiva dos IOE's do grupo Radioproteção. Cada cor representa um profissional.

Operação e Manutenção

Os IOE's deste grupo operam os ciclotrons, sendo assim, não ficam expostos diretamente à radiação ionizante de componentes ativados ou dos radioisótopos produzidos. Entretanto, podem vir a realizar manutenções nas máquinas quando necessário. Estes IOE's potencialmente poderiam receber doses maiores que o grupo Radioproteção, porém foi o grupo que recebeu as menores doses.

Na Tabela 15 são apresentados o número de IOE's do grupo Operação e Manutenção monitorados e sua distribuição de acordo com os intervalos de dose efetiva, para cada ano do período estudado, além da dose coletiva e da dose efetiva média. A incerteza apresentada na dose efetiva média foi obtida a partir do desvio padrão da média.

Tabela 15: Distribuição dos IOE's do grupo Operação e Manutenção por intervalo de dose efetiva, dose coletiva e dose efetiva média recebida ao longo dos anos.

<i>Intervalo de dose efetiva (mSv)</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>
0 – 2,4	2	5	1	7	0
2,4 – 6,0	2	3	7	1	9
6,0 – 10,0	2	0	1	1	1
10,0 – 15,0	1	0	0	0	0
15,0 – 20,0	0	0	0	0	0
>20,0	0	0	0	0	0
Nº total de indivíduos monitorados	7	8	9	9	10
Dose coletiva (pessoa.mSv)	39,7	15,5	29,7	16,7	41,2
Dose efetiva média (mSv)	5,7 ± 1,4	1,94 ± 0,54	3,30 ± 0,60	1,86 ± 0,85	4,12 ± 0,64

As doses efetivas médias recebidas pelos IOE's encontram-se no intervalo entre $(1,86 \pm 0,85)$ mSv e $(5,7 \pm 1,4)$ mSv, sendo que a dose efetiva máxima foi de 10,2 mSv recebida por um IOE em 2007. Observou-se que 34,9% das doses, dos 43 registros analisados, estão abaixo de 2,4 mSv/ano e 14 % apresentam valores acima do nível de investigação. Este último percentual foi justificado pela exposição à radiação induzida decorrente dos materiais ativados durante as manutenções das máquinas.

Os IOE's do grupo Operação e Manutenção receberam as menores doses quando comparados com os IOE's dos outros dois grupos, observado nas Tabela 13 e Tabela 14. Este fato pode estar relacionado com a eventualidade com que os IOE's do grupo Operação e Manutenção permanecem em locais onde há presença de itens ativados e radioisótopos.

As doses efetivas dos IOE's são ilustradas na Figura 13, na qual cada cor representa um IOE e somente são apresentados os valores de dose acima de 2,4 mSv.

Figura 13: Dose efetiva dos IOE's do grupo Operação e Manutenção. Cada cor representa um profissional.

Na Figura 14 está apresentado um exemplo da média da dose efetiva mensal por grupo de trabalho no ano de 2011.

Figura 14: Média da dose efetiva mensal por grupo de trabalho.

Observa-se, como já esperado, que a dose recebida pelo grupo Alvos foi maior que a dos outros dois grupos em todos os meses, alcançando um valor de dose média de 1,8 mSv no mês de outubro. Durante este mês, o *Cyclone-18* ficou inoperante por oito

dias e o *Cyclone-30* passou a produzir Flúor-18 e Iodo-123, acarretando, assim, em uma maior probabilidade de exposição aos IOE's do grupo Alvos.

Uma possível explicação é pelo fato de que os dois ciclotrons apresentam diferenças no que diz respeito ao carregamento de alvos. Enquanto o *Cyclone-18* possui um sistema automatizado, o IOE precisa adentrar na caverna do *Cyclone-30* e efetuar o carregamento para que se dê início à radiação.

Quando apenas o *Cyclone-30* está em funcionamento, os IOE's do grupo Alvos acabam sendo mais exposto à radiação, pois precisam fazer o carregamento do alvo para cada produção de Flúor-18 e de Iodo-123.

5.3 Dose equivalente nas mãos dos IOE's

A Tabela 16 apresenta os resultados da dose equivalente média para os três grupos de trabalho durante os anos de 2009 a 2011. A incerteza apresentada na dose equivalente média foi obtida a partir do desvio padrão da média.

Tabela 16: Resultados da distribuição dos IOE's por grupo de trabalho por dose equivalente média recebida entre 2009-2011.

Grupo de trabalho	2009			2010			2011		
	Alvos	RP*	O M**	Alvos	RP*	O M**	Alvos	RP*	O M**
Número de IOE's	5	2	8	5	2	9	5	2	11
Dose equivalente média (mSv)	6,4 ± 1,7	6,2 ± 3,4	2,7 ± 1,5	8,0 ± 2,2	3,4 ± 1,5	1,26 ± 0,61	9,1 ± 3,8	4,3 ± 1,4	0,50 ± 0,26

*RP: Radioproteção; **O M: Operação e Manutenção.

O grupo Alvos apresentou a maior dose equivalente média ao longo dos anos, por ser o grupo mais exposto às radiações ionizantes. O grupo Radioproteção obteve a segunda maior dose equivalente média nos três anos estudados pelo fato de sempre acompanhar as tarefas executadas pelos trabalhadores, efetuar monitoramentos tanto de

rotina quanto operacionais, além de auxiliar na expedição do radioisótopo produzido.

Todos os IOE's monitorados receberam doses equivalentes entre 0-25 mSv, isto é, valores menores que o nível de investigação de 150 mSv/ano ou 20 mSv em qualquer mês [15].

5.4 Análise das medidas de proteção radiológica e sugestão de melhorias

Os valores apresentados nas Tabelas de 8 a 11, referentes ao monitoramento de área, atendem a critérios baseados na experiência operacional. Valores fora dessa faixa são facilmente detectados pela equipe de radioproteção, que poderá determinar se haverá ou não a necessidade de uma intervenção⁸. Portanto, é importante que o monitoramento ocorra sempre que há operação do ciclotron para que se tenha o devido controle da exposição ocupacional.

Outro fato que deve ser levado em consideração é a reavaliação constante dos locais monitorados, verificando a necessidade de adicionar ou excluir pontos de monitoramento em concordância com o processo de otimização.

Como sugestão de melhoria, poderiam ser instalados detectores fixos nos locais definidos para o monitoramento de modo que suas leituras fossem realizadas em um monitor localizado em um ponto de fácil acesso. Assim, os IOE's que fazem parte do grupo Radioproteção não precisariam ir de ponto em ponto portando dois detectores e uma folha de registro, precisariam apenas ir até o monitor para anotar os valores das taxas de dose.

Os resultados das doses efetivas mostrados nas Tabelas de 12 a 15 estão de acordo com a literatura, no entanto, de acordo com o princípio ALARA, sempre há a necessidade de reduzir as doses recebidas pelos IOE's.

⁸ Intervenção: Toda ação adotada com o objetivo de reduzir ou evitar a exposição ou a probabilidade de exposição a fontes que não façam parte de uma prática controlada, ou que estejam fora de controle em consequência de um acidente, terrorismo ou sabotagem [2].

Como sugestão, visando à diminuição das doses, o grupo Radioproteção, que recebeu a segunda maior dose, deve apenas exercer as tarefas de radioproteção conforme estabelecidos em procedimentos [2, 7, 32].

Os valores de dose equivalente, apresentados na Tabela 16, podem não refletir as doses reais recebidas pelos IOE's. Isso ocorre, pois nem sempre o uso das pulseiras é feito de maneira correta durante o desempenho das atividades, devido a problemas referentes à fixação destas no pulso do IOE. Como sugestão de melhoria, dosímetros do tipo anel poderiam ser adquiridos em substituição das pulseiras para que todos os profissionais, que necessitem do monitoramento das extremidades, utilizem este tipo de dosímetro.

Os dosímetros pessoais para medir a dose de nêutrons não são utilizados, uma vez que a contribuição destes para a dose efetiva é pequena quando comparada aos fótons. Um dos métodos empregados é o monitoramento do local de trabalho considerando o fator de ocupação [23].

É importante que se faça o controle de qualidade da máquina para evitar falhas e, consequentemente, aumento da dose do IOE designado para o reparo e manutenção.

O treinamento e reciclagem dos IOE's são realizados conforme descrito no PPR da instalação, de modo que os IOE's continuem a desenvolver suas funções em condições seguras de trabalho.

6. CONCLUSÕES

Uma vez que a aderência ao princípio ALARA constitui um dos principais objetivos no gerenciamento da Gerência de Aceleradores Cíclotron do IPEN, norteadas pela equipe de Radioproteção, tornou-se imperativo avaliar os níveis de exposição à radiação tanto individual como de área.

A exposição ocupacional está normalmente sujeita a controle regulamentar que está em acordo com as normas nacionais e internacionais de proteção radiológica. A Equipe de Radioproteção local estabeleceu e vem conduzindo de maneira eficaz o programa de controle e monitoramento da Instalação. Com base nos resultados dos níveis de exposição, observou-se um maior enfoque sobre as práticas ALARA e consequentemente na redução de risco para o IOE.

Baseado nos resultados disponíveis de dosimetria externa observou-se que as doses recebidas pelos IOE's são resultantes, em sua maioria, das exposições advindas da radioatividade induzida dos componentes internos da máquina e ocorrem principalmente durante atividades de manutenção, reparo e modificação na estrutura do equipamento.

De acordo com a tarefa dos IOE's, o grupo Alvos foi o que recebeu a maior dose efetiva, seguidos pelo grupo Radioproteção e grupo Operação e Manutenção.

Para o período estudado, não houve exposição acima de 50 mSv, em um único ano.

O treinamento constante, o uso regular dos dosímetros e a implementação de procedimentos ALARA são medidas que resultarão em um controle adequado da exposição à radiação ionizante.

Espera-se com este estudo contribuir para o programa de licenciamento de outras instalações com aceleradores de partícula e poder ajudar na manutenção de controle de qualidade e desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report Vol. I, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. New York, 2010.
- [2] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. CNEN-NN-3.01. CNEN, Rio de Janeiro, 2005. Resolução CNEN 114/2011 (Alteração do item 5.4.2.1). Publicação D.O.U. em 01.09.2011.
- [3] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **The 2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection**. Publication 103, Oxford, 2007.
- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publication 60. Oxford, 1991..
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Directory of Cyclotrons Used for Radionuclide Production in Member States**. Non-serial Publication. Vienna, 2006.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice**. Technical Reports Series No. 465. IAEA, Vienna, 2008.
- [7] RAS/IPEN, **Relatório de Análise de Segurança da Instalação de Aceleradores Cíclotron**. pp. 09, São Paulo, 1997.
- [8] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, **Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities**. NCRP Report No. 144, Maryland, 2005.
- [9] Silva, P.P.N.; Fernandes, I.M.; Silva, A.J.; Romero Filho, C.R.; Rodrigues, D.L. , **Neutron and gamma radiation levels analysis for 18 MeV Cyclotron operation at IPEN/CNEN-SP**, in *International Nuclear Atlantic Conference - INAC*, Oct. 24-28, Belo Horizonte, 2011.
- [10] Tahuata, L.; Salati, I.P.A.; Prinzio, R.Di.; Prinzio, A.R.Di, **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS, **Fundamental quantities and units for ionizing radiation**. ICRU, Pub.60, Bethesda, 1998.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards**. Safety

- Standards. General Requirements No. GSR Part 3 (Interim). IAEA, Vienna 2011.
- [13] Mazzili, B.P.; Kodama, Y.; Suzuki, F.F.; Dellamano, J.C.; Marumo, J.T.; Sanches, M.P.; Vicente, R.; Bellintani, S.A.; Romero Filho, C.R., **Noções básicas de proteção radiológica**. IPEN/CNEN. São Paulo, 2002.
 - [14] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS, **Fundamental quantities in radiation protection dosimetry**. ICRU, Pub. 51, Maryland, 1993.
 - [15] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Restrição de dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas**. Posição Regulatória 3.01/004:2011. CNEN, Rio de Janeiro, 2010.
 - [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Occupational Radiation Protection. Safety Guide**. Safety Standards Series No. RS-G-1.1, IAEA, Vienna, 1999.
 - [17] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Principles for the radiation protection of workers**. Publication 75. Vienna, 1997.
 - [18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **General principles of monitoring for radiation protection of workers**. Publication 35. Oxford, 1982.
 - [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Basic principles for occupational radiation monitoring**. Safety Series 84, IAEA. Vienna, 1987.
 - [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Basic requirements for personnel monitoring: a code of practice**. Safety Series 14, IAEA. Vienna, 1980.
 - [21] Fonseca, L.P.S., **Contribuição para otimização das doses individuais dos trabalhadores no processo de expedição do gerador de tecnécio-99m**. [dissertação de mestrado]. Mestrado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2010.
 - [22] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, UNSCEAR 2008 Report Vol. I, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. Anexo E. New York, 2010.
 - [23] United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report Vol I, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. New York, 2001.
 - [24] Chowdhury, L. M.; Sarkar, P. K., **Radiological risk analysis of particle accelerators**. Reliability Engineering System Safety, Vol. 93, pp. 1250-1256, 2008.
 - [25] B. Mukherjee, **Important Radiation Protection Aspects of the Operation of a Commercial Medical Cyclotron**. ANSTO, Safety Division, Radiation Protection

- R&D Section. Australia, 1998.
- [26] Sharma, S.; Krause, G; Ebadi, M., **Radiation Safety and Quality Control in the Cyclotron Laboratory**, Radiation Protection Dosimetry, Vols. 118, No. 4, pp. 431-439, February 2006.
- [27] Kuo, M.-J.; Hsu, F.Y.; Hsu, C.-H.; Lo, C.-H.; Chen, C.-M.; Chang, Y.-L.; Chao, J.-H; Yin, K.-W., **Dose estimation of the radiation workers in the SK cyclotron center using dual-TLD method**. Radiation Measurements, Vol. 45 pp. 691-693, 2010.
- [28] Oliveira, H.B., **Modelos analíticos para o desenvolvimento de alvos metálicos de alta performance irradiados nos ciclotrons Cyclone 30 e Cyclone 18 do IPEN-CNEN/SP**. [dissertação de doutorado]. Doutorado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2009.
- [29] Sumiya, L.C.A., **Estudos de parâmetros relevantes na irradiação de ^{124}Xe , visando à otimização na obtenção de ^{123}I ultra puro no ciclotron Cyclone-30 do IPEN-CNEN/SP**. [dissertação de doutorado]. Doutorado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2006.
- [30] ION BEAM APPLICATIONS, **Cyclone 30 Technical Information**. Belgium, Sept. 21, 1994.
- [31] Rodrigues, D.L., **Otimização no controle dos valores de radiação nas dependências do ciclotron de 30 MeV do IPEN**. [dissertação de mestrado]. Mestrado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2002.
- [32] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Serviços de Radioproteção**. CNEN-NE-3.02. Rio de Janeiro, 1998.
- [33] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Recommendations of the international commission on radiological protection**. ICRP Publication 1. Pergamon Press, London, 1959.

ANEXO I – FOLHAS DE REGISTRO DO MONITORAMENTO DE ÁREA

GERÊNCIA DE RADIOPROTEÇÃO

**MONITORAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO EXTERNA
NAS ÁREAS DE TRABALHO NO CAC – PRODUÇÃO DE ^{18}F
CYCLONE - 18**

DATA	Nº CAC	IRRADIAÇÃO Nº	RADIOISÓTOPO	FEIXE Nº	ENERGIA DO FEIXE (MeV)	CORRENTE (μA)
			^{18}F		18	

PONTOS	NÍVEIS DE RADIAÇÃO GAMA $\mu\text{Sv.h}^{-1}$	NÍVEIS DE RADIAÇÃO NEUTRÔNICA		DOSE TOTAL gama + nêutrons $\mu\text{Sv.h}^{-1}$
		$\text{N.cm}^2.\text{s}^{-1}$	$\mu\text{Sv.h}^{-1}$	
A				
B				
C				
D				
E				
F		-----		
G		-----		

Observações: _____

Monitor	Leitura
Nêutrons Ciclone 18 (cpm)	
Caverna Ciclone 18 (R/h)	
Lab. FDG 01 (mR/h)	
Ponto de Controle C-18 (cpm)	
Controle Ciclone 30 (mR/h)	
Chaminé (cpm)	
Chaminé das Células (cpm)	
Bancada Células (cpm)	
Corredor de Acesso (cpm)	

*Equipamento em manutenção **Sistema Fora de uso

DETECTORES		
HORA	Modelo	Nº Série
	6150 - AD-5	
	Ludlum - 15	
Equipe de Radioproteção:

DATA	SUPERVISOR

GERÊNCIA DE RADIOPROTEÇÃO

MONITORAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO EXTERNA NAS ÁREAS DE TRABALHO NO CAC – PRODUÇÃO DE ^{18}F CYCLONE - 30

DATA	Nº CAC	IRRADIAÇÃO Nº	RADIOISÓTOPO	ENERGIA DO FEIXE (MeV)	CORRENTE (µA)
			^{18}F	19	

PONTOS	NÍVEIS OBSERVADOS $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$		
	RADIAÇÃO GAMA	RADIAÇÃO NEUTRÔNICA	DOSE TOTAL
A1			
B1			
C1		-----	
D1		-----	

Observações: _____

Monitor	Leitura
Nêutrons 1.2 (cpm)	
Nêutrons 2.2 (cpm)	
Controle Ciclone 30 (mR/h)	
Chaminé (cpm)	
Chaminé das Células (cpm)	
Bancada Células (cpm)	
Corredor de Acesso (cpm)	
Ponto de Controle C-30 (cpm)	

* Equipamento em manutenção **Sistema Fora de uso

DETECTORES		
HORA	Modelo	Nº Série
	6150 AD 5	
	Dineutron	
Equipe de Radioproteção:

DATA	SUPERVISOR