

Instituto de Radioproteção e Dosimetria

André Luís Gonzaga Nunes
Samuel Queiroz Pelegrineli

Avaliação Radiométrica de Instalação com Acelerador Cíclotron

Rio de Janeiro

2011

Gonzaga Nunes, André Luis e Pelegrineli, Samuel Queiroz
Avaliação Radiométrica de Instalação com Acelerador
Cíclotron / André Luis Gonzaga Nunes e Samuel Queiroz Pelegrineli. –
Rio de Janeiro: IRD, 2011.

46 f.

Orientador: Manuel Jacinto Martins Lourenço
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de
Radioproteção e Dosimetria.

Referências bibliográficas: f. 45 - 46

1. Introdução. 2. Aplicação do Cíclotron. 3. Principais
Acidentes com Aceleradores. 4. Proteção Radiológica para Acelerador
Cíclotron. 5. Levantamento de Dados sobre o Acelerador CV-28. 6.
Conclusão. I. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. II. Título.

André Luís Gonzaga Nunes
Samuel Queiroz Pelegrineli

Avaliação Radiométrica de Instalação com Acelerador Cíclotron

Trabalho de Conclusão de curso do curso de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativa - IRD/AIEA, apresentado ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD.

Orientador: Manuel Jacinto Martins Lourenço

Rio de janeiro

Novembro de 2011

DEDICATÓRIA DE ANDRÉ

Dedico esse momento de conquista e alegria para meus familiares e amigos em especial para minha querida mãe Ivone G. Nunes, minha esposa Shanna da Silva Carneiro, meus filhos Miguel G. Nunes Carneiro, Isabella G. Nunes Carneiro, que contribuíram diretamente para este projeto de vida, agradeço a Deus por fazerem história em minha vida. Com os contratempos nesta jornada, estiveram sempre dispostos a dividir o precioso tempo que é implacável e com grande dedicação e esforço acreditaram no meu objetivo.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

DEDICATÓRIA DE SAMUEL

Dedico este trabalho a Deus, o senhor de toda ciência, entendimento e conhecimento humano. Aos meus familiares e amigos, em especial à minha esposa Ariane pela paciência, compreensão e força sem ela eu não chegaria onde cheguei. Aos meus pais Pedro e Alzira, meus avós maternos pelo apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Manuel J. M. Lourenço, do IRD, por toda a orientação.

Ao Prof. Dr. João Carlos, do IEN, pelas importantes observações, que foi fundamental para a realização desse trabalho.

Aos meus colegas da pós-graduação do IRD pelo companheirismo.

A toda a equipe do IRD e da secretaria da pós-graduação do Latus Senso, pelo apoio institucional.

À CNEN pelo apoio.

Resumo

Atualmente o ciclotron tem uma aplicação relevante na produção de materiais denominados radiofármacos que auxilia o diagnóstico e tratamento de doenças como o câncer. Portanto, com a crescente demanda na produção deste material, há uma grande preocupação com o indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) que executa esta atividade.

Este trabalho tem como objetivo propor melhorias nas instalações do ciclotron visando minimizar o risco de exposição e contaminação. Para isso foram realizadas visitas e levantamento radiométrico das áreas do ciclotron CV-28, em conjunto com o grupo de Proteção Radiológica do IEN-CNEN. O conjunto de informações obtido permitiu realizar uma avaliação do ponto de vista de segurança radiológica e permitiu evidenciar as adequações e inadequações existentes nas dependências da instalação.

Palavras Chaves: Ciclotron, Proteção Radiológica e Levantamento Radiométrico.

Abstract

Nowadays cyclotron has a potential application in the production of materials called radiopharmaceuticals that helps the diagnosis of diseases such as cancer. So with the increasing demand in the production of this material, there is a big preoccupation with the individual occupationally exposed (IOE).

This work aims to propose improvements in the cyclotron facility to minimize the risk of exposure and contamination. For this, a radiometric survey and visits to the cyclotron CV-28 areas was conducted together with the IEN-CNEN group of radiation protection. The set of information obtained enabled the company to perform an assessment to the point of view of radiation safety and have highlighted the advantages and flaws in the premises of the facility, thus proposing suggestions for improvements.

Keywords: *Cyclotron, Radiation Protection and Radiometric Survey*

Lista de Ilustrações

Figura 3.1.	Planta do Prédio do CV-28	34
Figura 5.1.	Sugestão da Nova Planta para o ponto de Controle	44
Gráfico 4.1.	Doses Integradas no Ponto 8	40
Gráfico 4.2.	Doses Integradas no Ponto 9	40
Gráfico 4.3.	Doses Integradas no Portão	41

Lista de Tabelas

Tabela 3.1.	Pontos Monitorados do Prédio do CV-28	35
Tabela 3.2.	Evento Indicador, Causa e consequência	36

Lista de Abreviaturas e Siglas

IAEA Atômica	“ <i>International Atomic Energy Agency</i> ” Agência Internacional de Energia
ALARA Exequível	“ <i>As Low As Reasonably Achievable</i> ” “Tão Baixo Quanto Razoavelmente
BSS	“ <i>Basic Safety Standards</i> ” Normas Básicas de Segurança
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
EUA	Estados Unidos da América
ICRP Internacional de Proteção Radiológica.	“ <i>International Commission on Radiological Protection</i> ” Comissão
IEN	Instituto de Energia Nuclear
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LIA	Limite de Incorporação Anual
PET-CT	Tomografia Computadorizada por Emissão de Pósitron
TLD	Termoluminescente

Lista de símbolos

m : metro (unidade de comprimento)

F¹⁸ : Flúor-18

¹⁸FDG: Flúordesoxiglicose

Gy : Gray

MeV : Mega eletrón-volt

mSv : milisievert

¹⁵O : Oxigênio-15

Tl²⁰¹ : Tálíó-201

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1.1. - Breve Histórico	15
1.2. - Finalidade e Objetivo do Presente Trabalho	16
FUNDAMENTO TEÓRICO	17
2.1. - Aplicações do Ciclotron	17
2.2. - Instalações de Pesquisas	18
2.3. - Segurança e Acidente	18
2.4. - Principais Acidentes com Aceleradores	19
2.4.1. - Illinois; Estados Unidos da América; em fevereiro de 1966.	19
2.4.2. - Maryland; Estados Unidos da América; 11 de dezembro de 1991	20
2.4.3. - Hanói; Vietnã; em novembro de 1991.	21
2.5. - Proteção Radiológica para Acelerador Ciclotron	21
2.6. - Princípios Básicos de Proteção Radiológica	22
2.7. - Normas Nacionais e Recomendações Internacionais Pertinentes	23
2.8. - Plano de Radioproteção	24
2.9. - Exposição Ocupacional	25
2.10. - Monitoração Individual	25
2.11. - Monitoração Externa	26
2.11.1. - Monitoração do Local de Trabalho para Avaliação Externa	26
2.11.2. - Monitoração do Local de Trabalho para Avaliação de Superfície	26
2.11.3. - Monitoramento no Local para Avaliação do Ar	27
2.12. - Classificação das Áreas	28
2.12.1. - Área Controlada	28
2.12.2. - Área Supervisionada	30
2.12.3. - Área Livre	30

METODOLOGIA	32
3.1 - Levantamentos de Dados sobre o Acelerador CV- 28	32
3.2. - Descrição das Dependências do Prédio do Acelerador Ciclotron CV-28	33
RESULTADO	37
4.1. - Análise do Cenário	37
4.2. - Levantamento Radiométrico das Áreas de Interesse	39
CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Introdução

Os aceleradores de pesquisa no Brasil estão distribuídos em onze instituições com um total de quinze aceleradores.

Os aceleradores Cíclotrons são utilizados para a produção de radiofármacos, produtos utilizados para obtenção de imagem tanto como agente diagnóstico como agentes utilizados no tratamento de enfermidades.

A técnica mais importante utilizada é denominada de Tomografia Computadorizada por Emissão de Póstron (PET-CT), que auxilia no diagnóstico de doenças como o câncer, patologia que é responsável por expressivo número de óbitos.

A grande demanda na produção de radiofármacos traz uma preocupação devido a possibilidade de aumentar o risco de ocorrência de exposição ou contaminação do Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) na linha de produção. Devido a importantes acidentes envolvendo o uso de aceleradores que já ocorreram, autoridades no mundo todo buscam constantemente uma forma de minimizar estes tipos de ocorrência. Incansavelmente especialistas buscam soluções para o uso deste tipo de tecnologia, sem que traga consequências indesejáveis para a população. Diversas áreas como a das pesquisas, industrial, agricultura, médica e ambiental, trazem grande preocupação na questão da proteção radiológica, pois acidentes que envolvem radiações ionizantes causam detrimento a saúde humana e ao meio ambiente.

1.1. Breve Histórico

A história e concepção dos acelerados tiveram seu início no final do século XIX com Joseph John Thomson, que na época fazia experimentos com tubos de raios catódicos e acabou mostrando que o átomo podia ser dividido. A evolução das pesquisas sobre a constituição do átomo desencadeou a busca por uma máquina que pudesse acelerar partículas e átomos, pois se tinha grande interesse nas investigações nucleares (SUMIYA, 2006).

Robert Van de Graaff construiu um gerador de alta tensão eletrostática. Merle Tuve, experimentou uma bobina de indução de Tesla, com um gerador de Van de Graaff atingindo um milhão de volts. Seguindo ao desenvolvimento desta máquina, surgiram os aceleradores de Van de Graaff Tandem e o acelerador Péletron Tandem e posteriormente os aceleradores circulares.

Hoje, utilizam-se os aceleradores lineares para produção de elétrons de energias variáveis que, dependendo da energia, pode ser destinado a vários usos, tais como: a investigação de física nuclear, médico-biológico, estudo de partículas elementares, de estruturas nucleares e também aplicações industriais.

Os aceleradores lineares, apesar de eficientes, apresentam um problema de ordem estrutural, pois a velocidade adquirida pela partícula é proporcional ao comprimento da máquina, onde ocorre a aceleração. Além disso, para que se possa manter o tamanho do acelerador dentro de parâmetros razoáveis, é necessário que o eletrodo seja pequeno. Isso obriga a utilização de altas frequências, criando-se assim, uma dificuldade de trabalho, que é inerente à máquina. Na tentativa de solucionar tal problema, foram estudados aspectos e parâmetros da máquina. A partir destes estudos nasceu a concepção do acelerador circular, onde a partícula não mais descreve uma órbita linear, mas sim, uma órbita circular (SUMIYA, 2006).

1.2. Finalidade e objetivo do presente trabalho

O presente trabalho tem como objetivo propor melhorias nas instalações do cíclotron visando minimizar o risco de exposição e contaminação na instalação de acelerador Cíclotron - CV 28, do Instituto de Energia Nuclear (IEN), priorizando as condições de proteção radiológica e cultura de segurança, tendo como referência as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, propondo evoluções na avaliação de proteção radiológica para o indivíduo ocupacionalmente exposto e o indivíduo do público.

Fundamento Teórico

2.1. Aplicações do Cíclotron

A maioria dos radionuclídeos é produzida em reatores, como produtos de fissão ou pelo processo de ativação. Entretanto nem todos os radionuclídeos podem ser produzidos em reatores, por exemplo, F^{18} , Tl^{201} , O^{15} e outros. Estes podem ser produzidos somente por reações limiares com partículas carregadas.

Os cíclotrons são aceleradores circulares de partículas que aceleram em vácuo diversas partículas eletricamente carregadas, como elétrons, prótons e íons, além de partículas menos comuns como os pósitrons.

As aplicações dos cíclotrons são muitas, na pesquisa em estudos sobre o comportamento, resistência de matérias aos danos por radiação, no surgimento de novos radionuclídeos com propriedades particulares mais adequadas para utilização na medicina nuclear. Estes novos radionuclídeos possuem algumas propriedades interessantes para medicina nuclear: fótons gama de baixa energia, meia vida curta, produtos de decaimento estáveis, possibilidade de estudos com o ^{18}F FDG e emissão de pósitrons (SUMIYA, 2006).

2.2. Instalações de Pesquisas

O Brasil possui em suas Instituições de pesquisa aceleradores classificados nas categorias I e II, de acordo com a classificação internacional da publicação *Specific Safety Guides* 8 da IAEA (2010)¹, ou nos grupos 7 e 8, segundo Resolução CNEN 112 de 24/08/2011.

Categoria I: consiste em uma unidade integralmente blindada, com intertravamentos, *interlocks*, onde o acesso humano durante a operação não é fisicamente possível, devido à configuração da blindagem. São unidades denominadas auto-blindadas.

Categoria II: consiste em uma unidade alojada em sala blindada de irradiação, que é mantida inacessível durante a operação, por um sistema de controle de entrada.

2.3. Segurança e Acidentes

Todas as possibilidades de acidentes devem ser analisadas antes de se iniciar um trabalho, qualquer evento relevante, não enquadrado no planejamento ou nos procedimentos operacionais, deve ser registrado para correção posterior, no caso de desvio de procedimento técnico envolvendo contaminação ou aumento de dose, o fato deve ser registrado e comunicado ao serviço de proteção radiológica ou de emergência da instalação. No caso de acidente mais grave, com perda de controle da situação, acionar o serviço de proteção radiológica ou de emergência da instalação, ter sempre em mente que o melhor processo de descontaminação consiste em evitar a contaminação. (CNEN NN - 3.01; 2011).

¹A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), serve como fórum mundial intergovernamental para cooperação técnico-científica no campo nuclear, e como o serviço de inspeção internacional para a aplicação de salvaguardas nucleares e verificação das medidas incluindo os programas nucleares civis. Seu objetivo estatutário tem o propósito de acelerar e ampliar o uso da energia atômica para a paz, saúde e prosperidade em todo o mundo.

2.4. Principais Acidentes Com Aceleradores

O ciclotron é uma máquina com a finalidade de acelerar diversas partículas, com várias faixas de energia. Inicialmente era mais utilizado para a pesquisa. Porém, com o decorrer do tempo, a produção de radiofármacos passou a ter um caráter mais amplo, passando de uma condição de pesquisa para uma escala comercial. Desta forma com a maior produtividade de radiofármacos e atividades maiores, a taxa de dose aumentou conseqüentemente, entretanto a cultura de segurança não acompanhou tais mudanças, subestimando assim os possíveis riscos associados às práticas.

Conhecer acidentes típicos ocorridos em aceleradores tem como objetivo compreender os fatores específicos que contribuem para causas de acidentes e obter lições de acidentes ocorridos (LOURENÇO, 2010).

Três importantes acidentes envolvendo o uso de aceleradores já ocorreram no mundo, de acordo com a IAEA (1996), os quais estão resumidos a seguir.

2.4.1 Illinois, EUA, em fevereiro de 1965

Um funcionário entrou em uma sala na qual um acelerador linear de elétrons, com feixe de 10 MeV, estava em operação. Ele entrou rastejando por baixo de uma porta, a qual possuía intertravamentos, mas cuja metade inferior havia sido removida para permitir a instalação de um sistema de esteira. As doses no lado direito do corpo do funcionário foram bastante elevadas. O braço direito dele foi, posteriormente, amputado acima do cotovelo; e a perna direita, acima do joelho. LANZ (1967) descreveu detalhadamente este acidente.

2.4.2 Maryland, EUA, em 11 de dezembro de 1991

Um operador de acelerador foi superexposto em uma instalação industrial, quando o equipamento era operado a 3 MeV, tendo sido projetado para produzir feixes de elétrons para processamento de materiais. Tal tipo de acelerador consistia de um terminal metálico, que era carregado com alta voltagem, e uma fonte de elétrons, em uma torre acima da área de processamento. A fonte de elétrons consistia de um filamento aquecido.

Durante uma manutenção, o operador colocou as mãos, pés e cabeça sob o feixe. O filamento de voltagem da fonte de elétrons encontrava-se desligado, porém, com o potencial de aceleração no terminal de alta voltagem ligado no máximo. O corpo do operador, especialmente as extremidades e a cabeça, foi exposto devido à corrente espúria de elétrons. Três meses após o acidente, quatro dedos da mão direita do operador e a maior parte dos quatro dedos da mão esquerda, foram amputados. Após duas semanas do acidente, foi observada queda de cabelo, a qual não havia regredido após seis meses.

O projeto inicial da instalação incluía intertravamentos redundantes e sistemas para impedir a entrada na sala de irradiação, enquanto o acelerador estivesse operando. Porém, os gerentes e funcionários sistematicamente removiam, desabilitavam ou burlavam os sistemas de segurança. Os operadores pareciam não entender bem o funcionamento da máquina, nem a existência de corrente espúria, mesmo quando o filamento não estivesse energizado. Embora tal corrente espúria tenha sido várias ordens de intensidade mais baixa do que as correntes normais de operação, a mesma foi suficiente para produzir taxas de dose de 0,4 a 13 Gy.s⁻¹, em várias partes do corpo do operador (SCHAUER *et al* 1993). SCHAUER descreveu em profundidade este acidente.

2.4.3 Hanói, Vietnã, em novembro de 1991

Um físico havia retornado à sala de irradiação de um acelerador linear de elétrons, para reposicionar uma amostra. Outro pesquisador, acreditando que o físico já havia saído da sala, avisou aos operadores que a máquina já poderia ser ligada. A instalação não era equipada com intertravamentos de acesso ou sinais de alerta e o físico continuou a manipular a amostra, enquanto o acelerador começou a operar, com energia de 15 MeV.

O segundo pesquisador ficou preocupado. Chamou o físico, mas este não respondeu. Solicitou então ao operador que desligasse o acelerador. O físico havia colocado as mãos próximas – de 5 a 30 cm – do alvo de tungstênio, por cerca de três vezes, durante os dois a quatro minutos em que o acelerador esteve funcionando. Foi difícil estimar-se as doses nas mãos do físico, já que na época do acidente não havia na instalação aparelhos para se efetuar medidas. O físico apresentou sérias lesões nas mãos, posteriormente, a mão direita e dois dedos da mão esquerda foram amputados. Este acidente foi descrito detalhadamente pela IAEA (1996).

Os casos exemplos de acidentes relatados mostraram a importância de se dispor de uma metodologia para avaliar as instalações com aceleradores, visando à prevenção de acidentes.

2.5 Proteção Radiológica para Acelerador Cíclotron

O cíclotron é um equipamento gerador de radiação e medidas de segurança e de proteção radiológica necessária para as práticas realizadas devem ser obrigatoriamente implementadas (THOMAS *et al*, 1998). Supondo-se que qualquer dose está associada a um aumento do perigo. É imperativo que as doses sejam eficientemente reduzidas.

Neste contexto medidas para redução da dose no início do planejamento de um projeto de uma instalação do ciclotron mesmo antes de iniciar a sua construção tem que ocorrer. Da mesma forma que medidas operacionais e instruções escritas incorporando metodologias processuais têm que se fazer presente. É imprescindível que os trabalhadores sejam treinados sobre os perigos e procedimentos para minimizar sua exposição às radiações ionizantes.

O objetivo principal da proteção radiológica aplicada ao Ciclotron é fornecer um nível adequado de proteção ao IOE. Limitando os efeitos estocásticos a níveis considerados aceitáveis e prevenindo os efeitos determinísticos. Os efeitos estocásticos não podem ser evitados completamente porque não há limiar de dose para que ocorram e mesmo baixa dose de radiação pode produzir efeitos deletérios à saúde. A probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos aumenta com o aumento da dose.

O efeito determinístico é baseado na gravidade, que aumenta com o aumento da dose. Um efeito da radiação para os quais geralmente existe um limiar de dose acima da qual a severidade do efeito é maior quanto mais elevada for à dose. O nível da dose limite é característica do efeito na saúde em particular, mas também pode depender de certa forma do indivíduo exposto.

2.6. Princípios Básicos de Proteção Radiológica

O sistema de proteção radiológica para práticas onde se utiliza o ciclotron é baseado nos seguintes princípios gerais (CNEN NN - 3.01; 2011).

- Princípio da Justificativa - nenhuma prática que envolva exposição a radiação deverá ser aprovada a menos que produza benefício suficiente para os indivíduos expostos ou à sociedade, para compensar o prejuízo causado pela radiação.

- Princípio da Otimização - para qualquer fonte dentro de uma prática, a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de incorrer

em riscos devem ser todos mantidos tão baixos quanto razoavelmente exequível (ALARA), considerando os fatores econômicos e sociais;

- Princípio da Limitação de dose - a exposição dos indivíduos deve estar sujeita a limites de dose, ou a algum controle de risco no caso de exposições potenciais. Isso garante que nenhum indivíduo esteja exposto aos riscos de radiação julgados inaceitáveis de tais práticas em quaisquer circunstâncias normais.

Qualquer sistema de proteção radiológica para o ciclotron deve incluir uma avaliação global da sua eficácia na prática. Este deve ser baseado na distribuição das doses obtidas e na avaliação das medidas tomadas para limitar a probabilidade de riscos potenciais. Os princípios básicos devem ser tratados como um sistema coerente – nenhuma parte deve ser considerada isoladamente.

O mero cumprimento dos limites de dose não é uma demonstração suficiente de desempenho satisfatório. Cuidados especiais devem ser previstos para minimizar as chances de ocorrência de efeitos biológicos causados pelas radiações ionizantes (OKUNO *et al*, 1982).

As Normas Básicas de Segurança da IAEA fornecem detalhes de como implementar o Sistema de Proteção Radiológica descrito na Publicação 60 da ICRP. Lembrando que a ICRP faz recomendações, assim o programa regulador fica responsável a proporcionar um nível adequado de segurança durante o uso de fontes de radiação.

2.7. Normas Nacionais e Recomendações Internacionais Pertinentes ao Ciclotron.

As normas de segurança nacionais e as recomendações internacionais estabelecem os requisitos básicos para a proteção contra os riscos associados à exposição às radiações ionizantes e para a segurança das fontes de radiação que podem produzir tal exposição.

A norma geral utilizada nas práticas de conformidade realizadas pela CNEN nas instalações com aceleradores industriais no país é a norma básica de proteção radiológica (CNEN NN-3.01; 2011).

As normas específicas são:

- Serviços de Radioproteção: CNEN NE-3.02; 1988;
- Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica: Resolução CNEN 111 de 24 de Agosto de 2011;
- Licenciamento de Instalações Radiativas, Resolução CNEN 112 de 24 de Agosto de 2011.

As recomendações internacionais de segurança para proteção contra radiação ionizantes, e para a segurança de fontes de radiação tem o objetivo estabelecer os requisitos básicos para a proteção de pessoas contra exposição à radiação ionizantes e para a segurança de fontes de radiação.

O Brasil segue as recomendações internacionais do *Basic Safety Standards – BSS – 115* da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1996), da publicação 75 do *International Commission on Radiological Protection – ICRP* (1997), da publicação *Specific Safety Guides 8* da IAEA (2010) e entre outras.

2.8. Plano de Radioproteção

Toda instalação que opera com material radioativo deve preparar um documento descrevendo as diretrizes de operação radiológica que serão adotadas pela instituição. Tal documento recebe o nome de Plano de Radioproteção (TAUHATA *et al* 2006).

2.9. Exposição Ocupacional

Definição de exposição ocupacional:

- Toda exposição dos IOE'S sofrida no decorrer do seu trabalho, com exceção das exposições excluídas pelo "BSS - 115" e das devidas a práticas ou fontes isentas pelo mesmo documento.
- 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, (CNEN NN-3.01; 2011).

2.10. Monitoração individual

Os titulares, em cooperação com o empregador, devem estabelecer e implementar um programa de monitoração individual e de área, conforme aplicável, levando-se em conta a natureza e intensidade das exposições normais e potenciais previstas.

Os titulares e empregadores são responsáveis pela avaliação da exposição ocupacional dos IOE. Essa avaliação deve estar baseada na monitoração individual e de área, conforme aplicável.

A monitoração individual é em proteção radiológica, a verificação de que um padrão preestabelecido de segurança referente à exposição das radiações ionizantes, e é realizada por meio de programas de monitoração que dependendo da via de exposição pode ser realizada por monitoração externa e monitoração interna. A principal função da monitoração individual é a de fornecer informações sobre a exposição de pessoas à radiação. A avaliação da exposição ocupacional é um elemento chave para alcançar efetivamente a otimização e a limitação de dose.

2.11. Monitoração externa

O objetivo é avaliar a dose recebida por cada indivíduo durante o período específico, permitindo assim avaliação das condições de trabalho, e a comparação com os limites de dose (padrões) estabelecidos conforme Norma CNEN-NN 3.01.

2.11.1. Monitoração do local de trabalho para Avaliação Externa

Geralmente, são utilizados equipamentos portáteis e excepcionalmente equipamentos móveis ou fixos. Estes equipamentos são indicados quando podem ocorrer variações rápidas e imprevisíveis a valores alarmantes no campo de radiação.

Os tipos de instrumentos mais utilizados, para radiações x, gama e beta, são os contadores Geiger-Muller e as câmaras de ionização, enquanto para radiação alfa e feixes de nêutrons são mais utilizados os contadores proporcionais. Para feixe de nêutrons e todos os outros tipos de radiação, exceto radiação alfa, poderão ser ainda utilizados os dosímetros termoluminescentes. (LEONIDAS, IPEN 2002).

2.11.2. Monitoração no local de trabalho para Avaliação de Superfície

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 de técnica de esfregaço, supondo a remoção de 10% da contaminação (LEONIDAS, IPEN 2002).

Um método complementar é fazer o uso de equipamento de detecção do tipo portal, geralmente colocado na entrada de vestiários para quem sai dos laboratórios. Como método alternativo pode-se avaliar 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 ocorrências isoladas de pequenas quantidades de material radioativo e não permite uma estimativa qualitativa dos valores de contaminação, mais fornece uma indicação genérica dos valores de contaminação.

2.11.3. Monitoramento no Local para Avaliação do Ar

A técnica mais comum para o monitoramento do local de trabalho para contaminação do ar 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 de uma bomba aspiradora de ar, com vazão conhecida e com um filtro tipo Millipore capaz de coletar aerossóis até um diâmetro aerodinâmico médio específico ou um filtro de carvão ativado para gases e vapores. Este tipo de filtro deve ser posicionado nas zonas de respiração dos trabalhadores para simular as narinas. A contaminação dos filtros é medida em laboratório.

O amostrador de ar, com detecção contínua, fornece um aviso em variações súbitas nos valores da concentração no ar. Diferentemente dos anteriores ele possui, próximo ao filtro um contador que já fornece o acúmulo de material radioativo nos filtros. 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. (LEONIDAS, IPEN 2002).

2.12. Classificações das Áreas

Para fins de gerenciamento da proteção radiológica, os titulares devem classificar as áreas de trabalho com radiação ou material radioativo em áreas controladas, áreas supervisionadas ou áreas livres, conforme Norma CNEN NN-3.01; 2005.

2.12.1. Área Controlada

De acordo com a Norma CNEN NN-3.01, uma área deve ser classificada como área controlada quando for necessária a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das exposições potenciais.

Medidas específicas de proteção radiológica são ou podem ser necessárias para:

- Controlar as exposições de rotina e evitar a disseminação da contaminação durante as condições normais de operação; ou
- Evitar ou limitar a extensão das exposições potenciais.

Na determinação da delimitação física de qualquer área controlada, devem ser consideradas a magnitude das exposições normais esperadas, a probabilidade e magnitude das exposições potenciais e o tipo e extensão dos requisitos de proteção e segurança necessários.

O trabalho com fontes radioativas não seladas está sempre associado à possibilidade de incorporação de radionuclídeos, sendo, portanto, necessária à avaliação específica da necessidade de delimitação de áreas controladas, levando em conta as características radiológicas dessas fontes.

Em relação às áreas designadas como controladas, os titulares devem:

- Sinalizar a área com o símbolo internacional de radiação ionizante, bem como afixar instruções pertinentes nos pontos de acesso e em outros locais apropriados no interior dessas áreas;
- Implementar as medidas de proteção ocupacional estabelecidas no Plano de Proteção Radiológica, incluindo regras internas e procedimentos apropriados a essas áreas;
- Restringir o acesso por meio de procedimentos administrativos e por meio de barreiras físicas. O grau de restrição de acesso deve ser adequado à magnitude e à probabilidade de ocorrência das exposições esperadas;
- Manter disponíveis, nas entradas dessas áreas, conforme apropriado, equipamento, vestimenta de proteção e instrumento de monitoração; e manter disponíveis nas saídas dessas áreas, quando apropriado:
 - ✓ Instrumentação para monitoração de contaminação de pele e de vestimenta;
 - ✓ Instrumentação para monitoração da contaminação de qualquer objeto ou substância sendo retirada da área;
 - ✓ Meios para descontaminação, como chuveiro ou pia;
 - ✓ Local adequado para coleta de equipamentos e vestimentas de proteção contaminados.

No estabelecimento das áreas controladas, o titular pode utilizar as barreiras físicas existentes, tais como paredes de salas ou prédios. Isso pode acarretar áreas maiores do que as estritamente necessárias com base apenas nas considerações de proteção radiológica. (Norma CNEN NN-3.01; 2011).

2.12.2 Área Supervisionada

Uma área deve ser classificada como área supervisionada quando, embora não requeira a adoção de medidas específicas de proteção e segurança, devem ser feitas reavaliações regulares das condições de exposições ocupacionais, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada.

As áreas supervisionadas devem ser indicadas como tal, em seus acessos (Norma CNEN NN-3.01; 2011).

2.12.3. Área Livre

Deve ser classificada como área livre qualquer área da instalação que não seja classificada como área controlada ou área supervisionada.

Em condições normais de operação, a dose para indivíduos nas áreas livres não deve ultrapassar o limite previsto para indivíduos do público, isto é, 1 mSv/ano ou fração proporcional ao tempo de permanência na área.

O titular e eventuais empregadores são responsáveis pelo controle dessas áreas, de modo a garantir sua classificação como área livre. Para tal, deve ser estabelecido um programa de monitoração adequado, abrangendo todas as possíveis vias de exposição (Norma CNEN NN -3.01; 2011).

Metodologia

3.1. Levantamento de Dados Sobre o Acelerador CV-28

Através da coleta de dados realizada durante visitas a instalação foram obtidas informações que possibilitaram classificar a instalação segundo a Resolução CNEN 112 de 24/08/2011, e a publicação *Specific Safety Guides* 8 da IAEA; 2010, observando os aspectos de proteção e segurança radiológica.

Neste trabalho avaliam-se os riscos no sistema de controle de acesso, do controle de radiação e controle de efluentes radioativos da sala de irradiação do acelerador de partículas (ciclotron), tomando-se como referência os documentos citados no próximo paragrafo.

As medidas de segurança e de proteção radiológica para as práticas realizadas, no CV-28, estão descritas no RAS²/IEN do ciclotron, no programa de monitoração ambiental (GOUVÊA e SILVA, 2003), no plano de emergência (SANTOS e SANTOS, 2003), no plano de radioproteção do IEN e nas normas (CNEN NN-3.01; 2011) e (CNEN NE - 3.02; 1988)³.

A Instalação possui um Titular e especialistas qualificados com graduação superior, treinados em proteção radiológica. Existe sistema de alarme e sinalização (luminosa e sonora) de advertência na instalação. O serviço de radioproteção é certificado e autorizado. O projeto inicial da Instalação foi aprovado pela CNEN, mas a instalação apresenta modificações em relação ao projeto inicial, ainda não aprovadas pela CNEN.

² RAS - Relatório de Análise e Segurança

³ Norma CNEN para Serviço de Radioproteção

Quando das visitas, foram verificados e analisados os levantamentos radiométricos de 2011, tomando-se como referência a norma CNEN NN-3.01; 2011. Os resultados assim obtidos são apresentados no presente trabalho.

3.2 Descrição das dependências do prédio do Acelerador ciclotron CV-28

As áreas são classificadas, segundo os níveis de exposição esperados, como áreas livres e restrita, sendo esta última subdividida em: controlada e supervisionada, conforme determinado na norma CNEN-NN-3.01 (2011). A Figura 3.1., mostra as áreas mencionadas na Tabela 3 .1.

Essa classificação só é válida com o ciclotron em operação “a dose nestas regiões só é relevante quando ocorrem irradiações no alvo”. Logo, cessando a irradiação o nível de exposição é considerado de áreas livres. Apenas as áreas onde a risco inerente de contaminação como, por exemplo, a área de manutenção do ciclotron, onde peças e materiais ativados são retirados da caverna, e na área de processamento de radiofármaco onde há risco de contaminação, são mantidas as classificações dadas.

As áreas do segundo piso não foram consideradas neste trabalho “estas áreas são de baixa frequência de permanência de pessoas e consideradas áreas livres por apresentarem nível de referência abaixo de $0,5\mu\text{Sv/h}$ ”.

A classificação de área tem como objetivo fornecer subsídio para a monitoração pessoal e também para caracterizar as áreas onde será imprescindível o uso de monitores individuais (dosímetros) e ainda, para gerar parâmetros que servirão para cálculo de dose num individuo ocupacionalmente exposto em uma determinada prática (SANTOS, 2004).

guarita

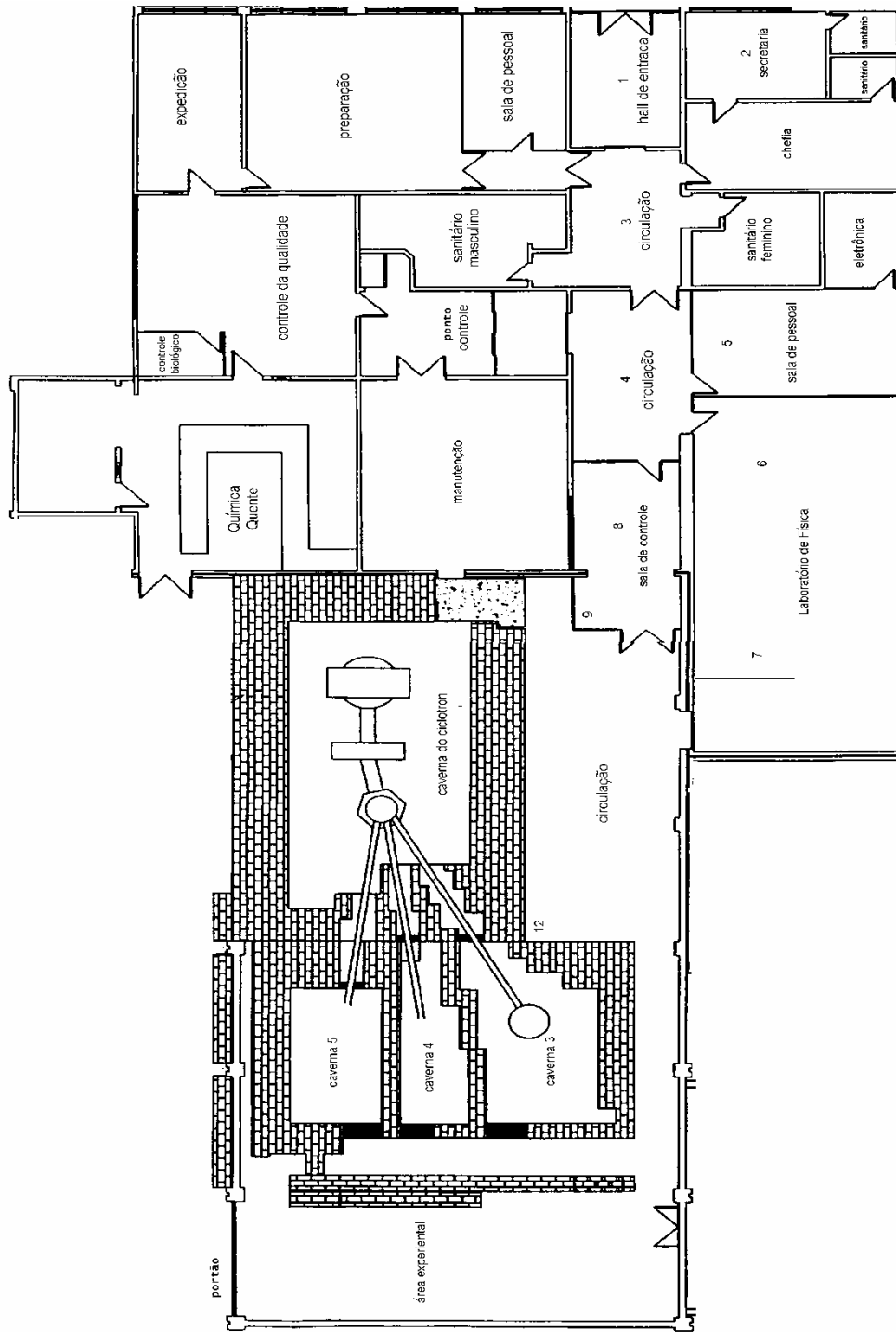


Figura 3.1. Planta do prédio do CV-28.

Tabela 3.1. Pontos Monitorados do prédio do CV-28

Ponto	Área	Descrição
Ponto 1	Área Livre	Situado na entrada do prédio do ciclotron.
Ponto 2	Área Livre	Secretaria.
Ponto 3 e 4	Área Livre	Corredor de circulação entre a entrada principal e a sala de controle.
Ponto 5	Área Livre	Sala de pessoal.
Ponto 6 e 7	Área Supervisionada	Laboratório de física
Ponto 8 e 9	Área controlada	Sala de controle (operador da máquina “ponto 8” e operador do alvo “ponto 9”); sala de maior taxa de permanência dos operadores.

Na área externa, existe um ponto de interesse (o portão) mostrado na Figura 3.1., onde é registrado o maior valor de dose integrada, acima do valor permitido para o público, ver gráfico 4.3.

A Tabela 3.2. foi montada a fim de uma melhor visualização dos eventos indicadores, com causa e consequência. Apresentando cenários que tem como objetivo evidenciar pontos de não conformidade, identificados como evento indicador.

Tabela 3.2. Evento Indicador, Causa e Consequência

Evento indicador		Causa e Consequência
Cenário 1	Abertura fácil da porta da caverna do cíclotron	Falha no sistema de controle de acesso
		Consequência: exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna
Cenário 2	Abertura fácil das portas das salas de alvos	Falha no sistema de controle de acesso (não possui intertravamento)
		Consequência: exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da caverna
Cenário 3	Contaminação radioativa no ar da instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão
		Consequência: contaminação de pessoas por inalação
Cenário 4	Contaminação do local da sala de alvos	Falha no sistema de monitoração de radiação (não tem monitoração)
		Consequência: contaminação de IOE por contato
Cenário 5	Presença não detectada de pessoas na caverna do cíclotron	Falha ao armar sistema de segurança de intertravamento
		Consequência: exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna
Cenário 6	Ocorrência de fenômenos naturais, incêndios ou explosões	Falha no procedimento de levantamento radiométrico (se chover não se faz monitoração externa)
		Consequência: exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da instalação
Cenário 7	Monitor portal da sala do ponto de controle	Mal posicionado, sofrendo influência de exposição dos radiofármacos ao passar
		Consequência: contaminação de pessoas
Cenário 8	Monitor de pés e mãos	Mal posicionado e bem antigo
		Consequência: Eventual espalhamento de contaminação
Cenário 9	Portas de entrada e saída	Sistemas de Entrada e Saída Inadequado
		Consequência: Eventual espalhamento de contaminação

Resultados

4.1. Análise dos cenários

O primeiro cenário se refere à abertura fácil da porta da caverna do ciclotron, uma falha nesse sistema causará exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna.

Sugestão: Pela importância do sistema, ele precisa ser intertravado, acionando automaticamente o desligamento total do acelerador. Outra sugestão é a colocação de um tapete capacitivo, redundante a existente.

O Segundo cenário é abertura fácil das portas das salas de alvos, uma falha nesse sistema causará exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da sala de alvos.

Sugestão: Este cenário possui sistema de controle de acesso idêntico ao cenário anterior e as sugestões referentes ao primeiro cenário são aqui adotadas.

O terceiro cenário é a falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão, podendo ocasionar contaminação de pessoas por inalação, este sistema é muito importante porque visa proteger indivíduos do público. Ele é responsável pelo controle de emissão de efluentes radioativos para a atmosfera. Caso ocorra falha neste sistema, o ar será contaminado podendo causar contaminação interna quando inalado, ingestão (poeira através da respiração ou hábito de levar mão à boca) e absorção pela pele (ferimento ou pele íntegra) o que é extremamente danoso para o indivíduo.

Sugestão: Adicionar monitor de ar com detecção contínua.

O quarto cenário é a contaminação do local da sala de alvos, falha no sistema de monitoração de radiação, este sistema visa proteger indivíduos ocupacionalmente expostos de uma possível contaminação externa por contato.

Sugestão: Adotar o uso de monitores individuais com alarme.

O quinto cenário se refere à falha ao armar sistema de segurança de intertravamento, que pode ter como consequência exposição do IOE a altas taxas de irradiação no interior da sala de alvos. Essa falha pode ser causada por erro de procedimento ou por falha do switch de desarme, são estes eventos que estão sendo considerados para esse cenário.

Sugestão: Instalação de sensor de presença no interior da sala de alvos e da caverna, fazendo com que diminua a taxa de falha desse sistema.

O sexto cenário é provocado pela ocorrência de fenômenos naturais, incêndios ou explosões, isto pode provocar falha na blindagem, que resulta em exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da instalação. Uma falha no procedimento de levantamento radiométrico pode levar a esta consequência.

Sugestão: Instalação de monitores de área fixos, fazendo com que diminua a taxa de falha desse sistema.

O sétimo cenário apresenta o monitor portal da sala do ponto de controle onde esta mal posicionada sofrendo influencia de exposição, principalmente quando a porta da área de manutenção esta aberta em alguma manutenção.

Sugestão: Uma sala de controle onde o portal esteja melhor posicionado garantindo uma melhor leitura no portal, em condições de detectar, com confiança, uma possível contaminação.

O oitavo cenário apresenta monitores de contaminação de pés e mãos mal posicionados na área de controle e o equipamento é antigo possibilitando, falha no sistema de monitoração de radiação, este sistema visa proteger indivíduos ocupacionalmente expostos de uma possível contaminação externa por contato.

Sugestão: A implantação de uma nova sala de controle garantindo que tais monitores estejam posicionados em condições de detectar, com confiança, as taxas de exposição nas áreas. Outra sugestão é a aquisição de um novo monitor de contaminação.

O nono cenário apresenta uma mesma entrada e saída para a área de manutenção e a área de fármacos. Estas duas áreas estão sujeitas a contaminação do local e dos profissionais envolvidos no trabalho.

Sugestão: Criar saídas e entradas independentes para estas áreas.

4.2. Levantamento Radiométrico das Áreas de Interesse

Nos gráficos a seguir, apresentamos os valores das doses integradas para os pontos 8, 9 e no portão, no período de 01/01/2011 a 21/10/2011.

Esta análise do levantamento radiométrico nas áreas do cíclotron CV-28, tem como objetivo o controle das condições radiológicas. Todos estes levantamentos, os gráficos foram feitos em conjunto com o grupo de proteção radiológica do IEN e utilizados para estudo.

O eixo vertical apresenta os valores de dose integrada e o eixo horizontal o número do feixe utilizado. A energia do feixe é constante e inerente ao acelerador.

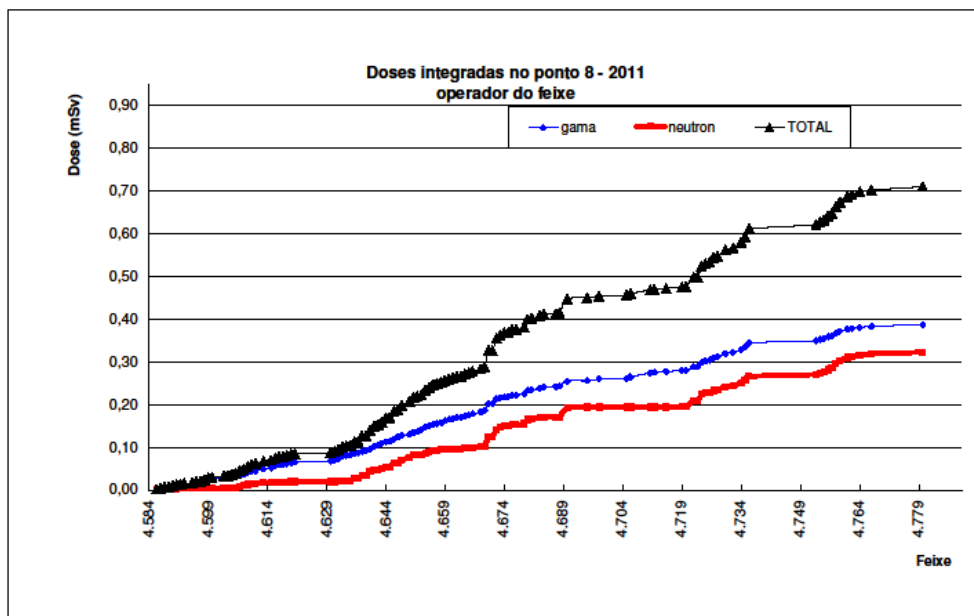


Gráfico 4.1. Doses Integradas no Ponto 8 no período de 01/01/2011 a 21/10/2011
(Operador do Feixe)

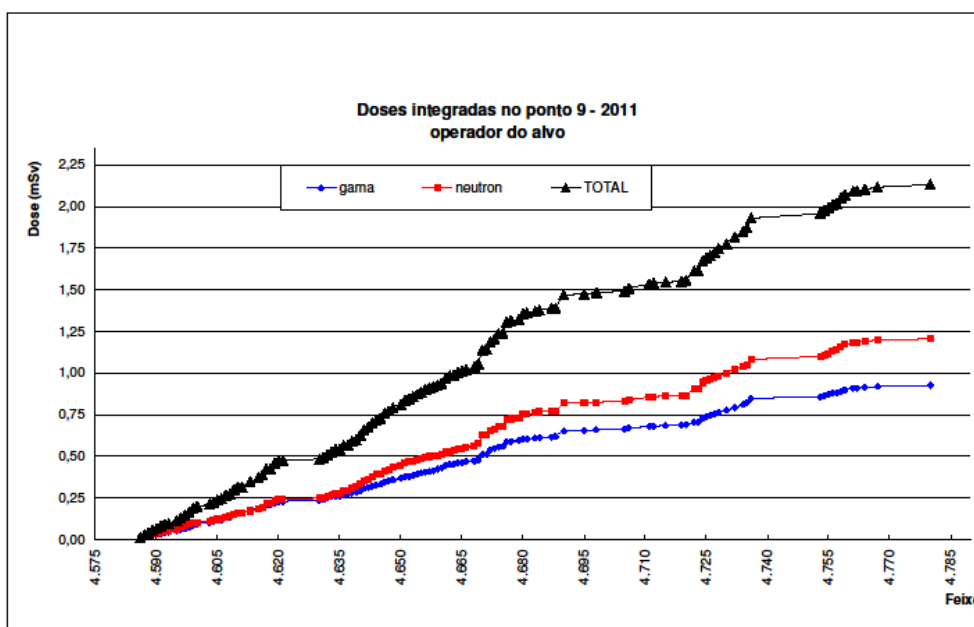


Gráfico 4.2. Doses Integradas no Ponto 9 no período de 01/01/2011 a 21/10/2011
(Operador do Alvo)

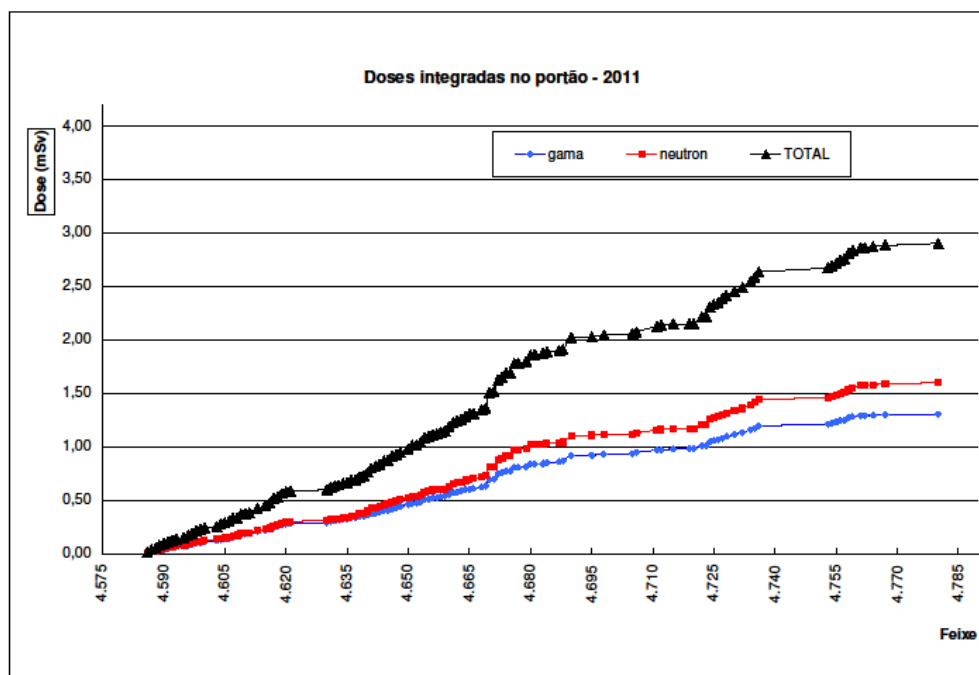


Gráfico 4.3. Doses Integradas no Portão no período de 01/01/2011 a 21/10/2011.

Através do levantamento aqui mencionado, constatou-se que as taxas de dose apresentam valores abaixo do máximo permitido para trabalhadores nos pontos 8 e 9 da sala de controle. O ponto do portão localizado na parte externa do prédio apresenta a maior dose integrada durante as práticas com o cíclotron CV-28 em operação.

Observa-se que, na Instalação, foram encontrados valores acima do nível de público em área externa ao prédio do acelerador (ponto do portão).

Sabe-se que a operação inadequada de um acelerador de partículas pode levar a exposição inadvertida de indivíduos ao feixe primário ou a radiação espalhada, a contaminação por material ativado e também a liberação de efluentes radiativos para atmosfera ambiente como consequência de falhas humanas, de equipamentos, ou de projeto, entre outras (Lourenço, 2010).

Principais Inadequações

Através da análise de segurança radiológica da Instalação foram detectadas as seguintes inadequações às recomendações internacionais e normas CNEN.

- O projeto inicial foi aprovado pela CNEN, mas local apresenta modificações, em relação ao projeto inicial, ainda não aprovadas pela CNEN.

- O sistema de controle da segurança não foi aprovado pela CNEN, a Instalação esta em processo de licenciamento.

- O sistema de intertravamento esta pronto mais não foi ativado (não funciona).

- Não existe monitor fixo de radiação no interior da sala de irradiação.

- O Serviço de Radioproteção não realiza retreinamento dos IOE da Instalação.

Conclusões

Sendo encontrados na instalação valores acima do nível de público em área externa ao prédio do acelerador. Conforme mencionado nos resultados, sugere-se providenciar a colocação de uma blindagem apropriada na parte externa do cíclotron, em particular na direção do portão. Para reduzir os valores de dose abaixo do limite do público.

Sugerem-se modificações na planta para o ponto de controle conforme a Figura 5.1., com entradas e saídas independentes nas áreas de manutenção e na área da química, tendo como objetivo evitar a circulação de qualquer substância radioativa remanescente, gerada na instalação. Bem como a colocação de detectores, em pontos específicos mencionados acima, para compor o sistema de intertravamento do CV-28.

Recomendamos a elaboração de um programa de treinamento em proteção radiológica para reciclagem dos conhecimentos, com a periodicidade estabelecida na norma CNEN-NE 3.02 ou de acordo com as necessidades observadas pelo SPR/IEN.

Tendo o propósito de minimizar os riscos é importante também ser adotado nas áreas do cíclotron a monitoração fixa de área, principalmente na sala de controle e corredor de acesso as cavernas, que permitira ao operador uma leitura em tempo real, permitindo ao supervisor de proteção radiológica comparar os valores registrados nos monitores com os resultados obtidos nas medições.

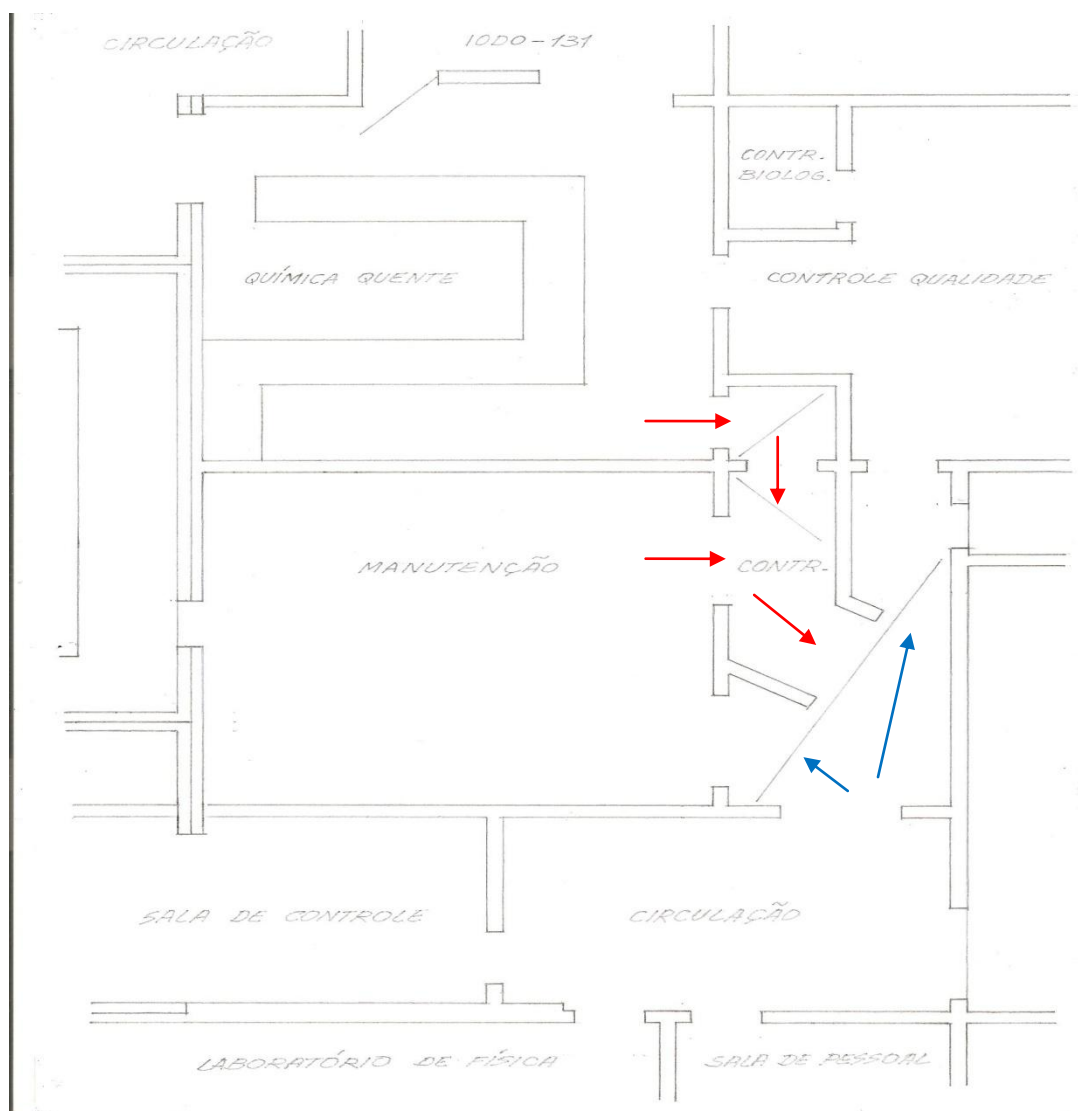


Figura 5.1. Sugestão de modificações na planta para o ponto de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NN-3.01 Diretrizes e Básicas de Proteção Radiológica, Setembro 2011.

Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NE-3.02 Serviços de Radioproteção, Agosto 1988.

Comissão Nacional de Energia nuclear, Resolução CNEN N° 112 Licenciamento de Instalações Radioativas, 24 de Agosto de 2011. Comissão Nacional de Energia Nuclear

Comissão Nacional de Energia nuclear, Resolução CNEN N° 111 Certificação de Qualificação de Supervisores, 24 de Agosto de 2011. Comissão Nacional de Energia Nuclear

Gouvêa, W.A., Soares, I. H. Programa de Monitoração Ambiental / IEN 2003. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).

International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996)

International Commission On Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication No. 60, Ann. ICRP 21 1-3, Pergamon Press, Oxford and New York (1991).

Leonidas, R.D., Otimização no Controle dos Valores de Radiação nas Dependências do Cíclotron de 30 Mev do IPEN, 2002.

Lourenço, M.J., Análise das Condições de Proteção e Segurança Radiológica das Instalações com Aceleradores de Partículas na Área de Pesquisa no Brasil, 2010.

Okuno, E. all. Física para Ciências Biológicas, Harper & Row do Brasil, pp. 21-26, pp. 65-68, 1982.

Santos, J.R., Santos, O.P. Plano Geral de Emergência do IEN, 2003.

Santos, P.O., Otimização da Proteção Radiológica nas Práticas para a Produção de Radiofármaco no IEN, 2004.

Schaver, D.A., 1993, "A Radiation Accident at an Industrial Accelerador Facility" Health Physics. V.65. No. 2. pp 131-140.

Sumiya, L.C.A., 2006, Estudos de Parâmetros Relevantes na Irradiação de ^{124}Xe , Visando a Otimização na Obtenção de ^{123}I Ultra Puro no Cíclotron Cyclone-30 do IPEN-CNEN/SP, 2006.

Tauhata, L., Salati, I.P.A., Prinzió, R.Di., Prinzió, M.A.R.R.Di. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 6ª revisão fevereiro/2006 – Rio de Janeiro – IRD/CNEN 242p.

Thomas, R.H., and Stevenson, G. R. Radiological Safety Aspects of the Operation of Protons Accelerators. Technical Report Series No. 283. Vienna: IAEA, 1998.