



COPPE/UFRJ

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICAS
DAS INSTALAÇÕES COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS NA ÁREA DE
PESQUISA NO BRASIL

Manuel Jacinto Martins Lourenço

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso
e Melo

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

Lourenço, Manuel Jacinto Martins

Análise das Condições de Proteção e Segurança Radiológicas das Instalações com Aceleradores de Partículas na Área de Pesquisa no Brasil/ Manuel Jacinto Martins Lourenço. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XV, 109 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e
Melo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 84-87.

1. Aceleradores de Partículas 2. Radioproteção. 3. Análise de Segurança. 4. Indicadores. 5. LOPA I. Crispim, Verginia Reis *et all.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICAS
DAS INSTALAÇÕES COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS NA ÁREA DE
PESQUISA NO BRASIL


Manuel Jacinto Martins Lourenço

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

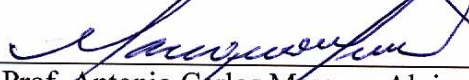
Examinada por:



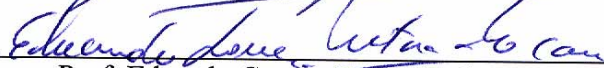
Prof. Verginia Reis Crispim, D. Sc.



Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.




Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph. D.



Prof. Eduardo Gomes Dutra do Carmo, D. Sc.



Dr. Luiz Antonio Ribeiro da Rosa, D. Sc.



Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2010

O que o homem faz não é o que determina se seu trabalho é sagrado ou secular,
mas, sim, por que o faz.

À minha família

Agradecimentos

- *À Deus e a todas as manifestações de Sua Existência: com Ele tudo é possível.*
- *Aos professores Verginia Reis Crispim e Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo cujo apoio neste trabalho foi incondicional e prioritário e que além de orientadores, foram grandes amigos.*
- *A toda a minha família que me apoiou de todas as maneiras durante este tempo de dedicação ao trabalho, mostrando o verdadeiro sentido da palavra amor.*
- *A todos os amigos do IRD pelo carinho, amizade e especialmente pela dose certa de incentivo que fizeram com que eu intensificasse cada vez mais a dedicação neste trabalho, principalmente nas horas mais críticas.*
- *Às instituições CBPF, IEN, IPEN, UFRGS-LII, UFRJ-LACAM, UNICAMP-LNLS, USP-LAL, USP-LAMFI, PUC/RJ, pela colaboração.*
- *Aos funcionários da secretaria do Programa de Engenharia Nuclear pelo suporte na área acadêmica.*
- *Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD pelo fornecimento de toda infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.*
- *A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICAS
DAS INSTALAÇÕES COM ACELERADORES DE PARTÍCULAS NA ÁREA DE
PESQUISA NO BRASIL

Manuel Jacinto Martins Lourenço

Setembro/2010

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Onze instituições de ensino e pesquisa no Brasil utilizam aceleradores de partículas, os quais cumprem funções próprias e diferentes atividades. Atualmente, essas instituições utilizam um total de quinze aceleradores. No presente trabalho, o objeto de estudo é a proteção radiológica dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), indivíduos do público e a segurança radiológica dos aceleradores. As instalações de pesquisa com aceleradores classificam-se nas categorias I e II de acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica ou grupos IX e X de acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear. Dos 15 aceleradores em uso para pesquisa no Brasil, quatro pertencem à categoria I ou grupo X e onze à categoria II ou grupo IX. A metodologia apresentada e desenvolvida neste projeto se deu através da inspeção e avaliação do estado de segurança e da proteção radiológica de treze instalações com aceleradores de partículas, cujo propósito é propiciar uma maior segurança na utilização dessa prática, seguindo as orientações aceitas para segurança e proteção radiológica. Dos resultados apresentados observou-se a necessidade de criação de um programa de controle de segurança e proteção radiológica para esta prática de utilização das radiações ionizantes no país.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF CONDITIONS TO SAFETY AND RADIOLOGICAL PROTECTION
OF BRAZILIAN RESEARCH PARTICLE ACCELERATORS FACILITIES

Manuel Jacinto Martins Lourenço

September/2010

Advisors: Verginia Reis Crispim

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

Eleven institutions of education and research in Brazil use particle accelerators, which fulfill different functions and activities. Currently, these institutions employ a total of fifteen accelerators. In this paper, the object of study is the radiological protection of occupationally exposed individuals, the general public and the radiation safety of particle accelerators. Research facilities with accelerators are classified in categories I and II according to the International Atomic Energy Agency or groups IX and X in accordance with the Brazilian National Commission of Nuclear Energy. Of the 15 accelerators in use for research in Brazil, four belong to category I or group X and eleven belong to category II or group IX. The methodology presented and developed in this work was made through the inspection and assessment of safety and radiological protection of thirteen particle accelerators facilities, and its main purpose was to promote safer use of this practice by following established guidelines for safety and radiological protection. The results presented in this work showed the need to create a program, in our country, for the control of safety and radiological protection of this ionizing radiation practice.

Sumário

CAPÍTULO 1	1
1 - Introdução	1
1.1 - Estado da arte	1
1.2 - Relevância	5
1.3 - Objetivos	5
1.4 - Estrutura da tese	6
CAPÍTULO 2	8
2 - Fundamentos teóricos	8
2.1 - Análise de segurança	8
2.1.1 - Análise de camadas de proteção – LOPA	9
2.1.2 - Identificando conseqüências e severidade	13
2.1.3 - Selecionando cenários de acidentes	14
2.1.4 - Desenvolvimento dos cenários de acidentes – LOPA	15
2.1.5 - Identificando a frequência o evento iniciador – LOPA	15
2.1.6 - Seleção das taxas de falha	16
2.1.7 - Identificando camadas de proteção independentes – LOPA	17
2.1.8 - Proteções – LOPA	18
2.1.8.1 - Sistema de controle básico do processo (BCPS)	18
2.1.8.2 - Alarmes críticos e intervenções humanas	18
2.1.8.3 - Função instrumentadas de segurança (SIF)	18
2.1.8.4 - Proteções físicas (válvulas, disco de ruptura, etc.)	19
2.1.8.5 - Proteções pós-liberação (diques, contenções, etc.)	19
2.1.8.6 - Resposta de emergência da planta	19
2.1.8.7 - Resposta de emergência da comunidade	19
2.1.9 - Regras para IPL – LOPA	20
2.1.9.1 - Eficiência	20
2.1.9.2 - Independência	20
2.1.9.3 - Auditabilidade	21
2.1.9.4 - Avaliação da IPL	21
2.1.9.5 - Valor da PFD para uma IPL	22

2.1.10 - IPL passivas	22
2.1.11 - IPL ativas	22
2.1.12 - Sistemas instrumentados	23
2.1.13 - Sistemas instrumentados de segurança	23
2.1.14 - Sistemas de inundação e outros sistemas contra incêndio	24
2.1.15 - IPL humanas	24
2.1.16 - Determinação da frequência dos cenários	24
2.1.17 - Estimando o risco	26
2.1.18 - Usando a LOPA para tomar a decisão do risco	27
2.2 - Indicadores de segurança	30
2.3 - Instalação para análise LOPA	32
2.3.1 - Introdução	32
2.3.2 - Painéis de controle – Cíclotron 30 MeV	33
2.3.3 - Sistema de segurança e proteção	34
2.3.3.1 - Caverna do Cíclotron de 30 MeV	35
2.3.3.2 - Salas de irradiação de alvos 1 e 2	35
2.3.3.3 - Acessos às cavernas do Cíclotron de 30 MeV	35
2.3.3.4 - Acesso ao piso superior (cobertura)	36
2.3.3.5 - Sala de controle do Cíclotron de 30 MeV	36
2.3.4 - Sistema de monitoração de radiação	36
2.3.4.1 - Monitores de área	37
2.3.4.2 - Monitor de ar	37
2.3.4.3 - Monitores de contaminação	38
2.3.5 - Sistemas de alarme e intertravamento	38
2.4 - Desarmando violações	40
CAPÍTULO 3	41
3 - Metodologia	41
3.1 - Levantamento de dados sobre os aceleradores de pesquisa	41
3.2 - Estudo dos principais aspectos de proteção e segurança radiológicas nas instalações de aceleradores	42
3.3 - Análise de segurança	42
3.4 - Restrição de doses	49

3.5 - Comparação das instalações	49
3.6 - Metodologia de avaliação das instalações	49
3.7 - Requisitos para norma experimental	50
CAPÍTULO 4	51
4 - Resultados	51
4.1 - Levantamento estatístico	51
4.2 - Avaliação	51
4.3 - Aplicação da análise de segurança - LOPA	51
4.4 - Cenário 1	52
4.5 - Cenário 2	54
4.6 - Cenário 3	55
4.7 - Cenário 4	56
4.8 - Cenário 5	57
4.9 - Cenário 6	58
4.10 - Cenário 7	59
4.11 - Geração de indicadores de risco	60
4.12 - Determinação dos indicadores de risco para cada cenário	61
4.12.1 - Cenário 1	61
4.12.2 - Cenário 2	63
4.12.3 - Cenário 3	63
4.12.4 - Cenário 4	65
4.12.5 - Cenário 5	66
4.12.6 - Cenário 6	67
4.13 - Resultados da aplicação da lista de cheque	69
4.14 - Resultados dos levantamentos radiométricos	69
4.15 - Resultados da análise dos relatórios de dose	71
4.16 - Comparação das instalações nacionais com instalações da Espanha	71
4.17 - Requisitos de norma específica para aceleradores	76
4.17.1 - Requisitos de licenciamento	76
4.17.2 - Requisitos para a instituição	76
4.17.3 - Requisitos para a instalação	76
4.17.4 - Requisitos para proteção dos IOEs	77
4.17.5 - Requisitos para proteção do público	78

4.17.6 - Requisitos para segurança radiológica do acelerador	78
4.17.7 - Requisitos para resposta a emergências	79
CAPÍTULO 5	80
5 - Conclusões e recomendações	80
5.1 - Conclusões	80
5.2 - Recomendações	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
Anexo 1 - Histórico dos aceleradores	88
Anexo 2 - Lista para inspeção em aceleradores	102
Anexo 3 – Classificação das instalações de aceleradores	109

Lista de Figuras

Fig. 3.1 - Etapas da LOPA	12
Fig. 3.2 - Informações da HAZOP e da LOPA	14
Fig. 4.1 - Sala do acelerador Van de Graaf	72
Fig. 4.2 - Corredor de acesso à sala de irradiação	73
Fig. 4.3 - Porta de acesso à sala de irradiação	73
Fig. 4.4 - Tandetron para espectometria de massa	74
Fig. 4.5 - Ciclotron	74
Fig. 4.6 - Monitor fixo de radiação e indicação luminosa	75
Fig. A.1 - Acelerador por queda de potencial de Cockroft-Walton	89
Fig. A.2 - Acelerador de Cockroft-Walton instalado no FERMILAB	90
Fig. A.3 - Acelerador por queda de potencial de Van De Graaf	91
Fig. A.4 - Acelerador por queda de potencial do tipo Tandem Van de Graaf	92
Fig. A.5 - Esquema de um acelerador linear (LINAC)	94
Fig. A.6 - Aceleração por <i>onda caminhante</i>	94
Fig. A.7 - Acelerador linear (LINAC) de <i>onda caminhante</i>	95
Fig. A.8 - Primeiro ciclotron construído por Lawrence	96
Fig. A.9 - Ciclotron CV-28 instalado no CAC/IPEN	97
Fig. A.10 - Ciclotron <i>Cyclone-30</i> instalado no CAC/IPEN/CNEN	98
Fig. A.11 - Esquema simplificado de um acelerador síncrotron	100
Fig. A.12 - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS)	101

Lista de tabelas

TABELA 2.1: Documentação e Cálculos de Cenários para a LOPA	27
TABELA 2.2: Matriz de Risco com Zonas Individuais de Ação	29
TABELA 3.1: Classe de Probabilidades de Ocorrência de Eventos Danosos	45
TABELA 3.2: Classe de Severidade de Eventos Danosos	46
TABELA 3.3: Matriz de Classificação de Risco	47
TABELA 3.4: Indicadores de Risco	48
TABELA 3.5: Um Plano Simples de Controle com Base no Risco	48
TABELA 3.1: Cenários para a aplicação da LOPA num acelerador síncrotron	52
TABELA 3.2: Tabela de frequências para cada evento iniciador	53
TABELA 3.3: Camadas de Proteção Independentes e suas respectivas Probabilidades de Falha na Demanda para cada Cenário	53
TABELA 4.4: Tabela-resumo do Cenário 1	55
TABELA 4.5: Tabela-resumo do Cenário 3	56
TABELA 4.6: Tabela-resumo do Cenário 4	57
TABELA 4.7: Tabela-resumo do Cenário 5	58
TABELA 4.8: Tabela-resumo do Cenário 6	59
TABELA 4.9: Tabela-resumo do Cenário 7	60
TABELA 4.10: Tabela-resumo do Cenário 1	62
TABELA 4.11: Tabela-resumo do Cenário 3	64
TABELA 4.12: Tabela-resumo do Cenário 4	65
TABELA 4.13: Tabela-resumo do Cenário 5	67
TABELA 4.14: Tabela-resumo do Cenário 6	68
TABELA 4.15: Tabela Resumo da Aplicação da Lista de Cheque	69

Lista de Símbolos

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ALARP	“ <i>As Low As Reasonably Practicable</i> ” - tão baixo quanto razoavelmente praticável
APP	Análise Preliminar de Perigos
APS	Análise Probabilística de Segurança
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i> - Explosão de Vapor em Expansão de Líquido em Ebulição
BPCS	<i>Basic Process Control System</i> - Sistema de Controle Básico do Processo
BSS	<i>International Basic Safety Standards</i>
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CNA	Centro Nacional de Aceleradores
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
FCC	Falha de Causa Comum
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> - Análise de Perigos e Operabilidade
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
IPL	<i>Independent Protection Layer</i> - Camada de Proteção Independente
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LINAC	<i>Linear accelerator</i>
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> - Análise de Camadas de Proteção
OSG	Sistema de Óleo de Selagem do Gerador
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
PLC	Controlador Lógico Programável

P^{dano}	Probabilidade de Dano ou Fatalidade
$P^{\text{ignição}}$	Probabilidade de Ignição
$P^{\text{pessoal presente}}$	Probabilidade de Pessoas Presentes na Área Exposta
RET	Sistema de Água de Refrigeração da Turbina
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i> - Função Instrumentada de Segurança
SIL	<i>Safety Integrity Level</i> - Nível de Integridade de Segurança
SIS	<i>Safety Instrumented System</i> - Sistema Instrumentado de Segurança

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESTADO DA ARTE

Aceleradores de partículas são equipamentos sofisticados e caros, empregados para a aceleração de partículas eletricamente carregadas, como elétrons, prótons e íons, além de partículas menos comuns, como os pósitrons. Produzem feixes de íons, elétrons, moléculas e ainda partículas, como antiprótons, pósitrons ou mésons, com velocidades altas, geralmente superiores a um milésimo da velocidade da luz (c). Para que sejam atingidas tais velocidades – que em alguns casos chegam quase à velocidade da luz – as partículas sofrem a ação de forças eletromagnéticas, com arranjos que diferem bastante entre os diversos tipos de aceleradores.

Os aceleradores têm alto custo de construção, e também operacional e de manutenção, necessitando de pessoal altamente qualificado e treinado.

Um histórico dos aceleradores e mais detalhes com relação aos tipos de aceleradores é apresentado no Anexo 1.

Por que acelerar partículas? Aceleram-se partículas para se enxergar melhor a matéria. Esta é a resposta mais simples possível. Constroem-se aceleradores de partículas para se poder enxergar estruturas muito pequenas que estão dentro dos átomos, dentro dos núcleos dos átomos, dentro das partículas que formam os núcleos dos átomos e, mais além, caso seja possível.

Além da própria pesquisa em física básica, as aplicações dos aceleradores são muitas, passando pela química, medicina, biologia molecular, microeletrônica, agricultura, etc, e culminando nas indústrias em geral, especialmente as relacionadas ao desenvolvimento de materiais, petrolífera, de alimentos, materiais cirúrgicos, etc (OLIVEIRA, 2002).

Segundo a literatura, a radioatividade induzida nos aceleradores é tratada de acordo com o tipo de partícula considerada e os eventos que ocorrem, a partir de certos limiares de energia. A publicação TRS 188 (IAEA, 1979) trata mais especificamente da indução de nêutrons, com enfoque na radioatividade induzida em componentes do acelerador.

O limiar de energia para a produção de nêutrons varia entre 10 e 19 MeV, para núcleos leves – com exceção do deutério (2,23 MeV) e do berílio (1,67 MeV) – e entre 4 e 6 MeV, para núcleos pesados, devido ao choque com feixes de elétrons ou raios X de frenamento. Em aceleradores de elétrons utilizados em radiografia industrial, os quais normalmente operam na faixa de 8 MeV, podem ser produzidos nêutrons devido à interação do feixe de raios X com o material dos alvos, geralmente, com alto número atômico.

A ANSI (1969) aborda a questão da radioatividade induzida apresentando a probabilidade de ocorrência desse tipo de evento em função da faixa de energia e da partícula acelerada. Para elétrons, são analisadas três possibilidades para a radioatividade induzida:

- Abaixo de 1,67 MeV: não ocorre;
- Entre 1,67 e 10 MeV: incidência limitada no alvo e pouco significativa na vizinhança;
- Acima de 10 MeV: probabilidade de ocorrência no alvo e suspeita de incidência nos arredores.

O NCRP 51 (1977) relata que, para a grande maioria dos materiais, principalmente aqueles utilizados para blindagem da radiação, as reações fotonucleares começam a se tornar significativas somente acima de 10 MeV. Na faixa de 30 a 100 MeV, reações mais complexas tornam-se possíveis, porém, segundo a referência, não resultam em riscos tão severos como a radioatividade induzida pelas reações do tipo (γ , n).

A publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992) apresenta uma visão mais prática quanto a essa questão, definindo que, para elétrons com energias menores ou iguais a 10 MeV, não há possibilidade de ocorrer radioatividade induzida.

A norma geral utilizada nas inspeções de conformidade realizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN nas instalações com aceleradores industriais no país é a norma básica de proteção radiológica NN-3.01 (CNEN, 2005).

As normas específicas são:

- Serviços de Radioproteção: CNEN NE-3.02 (1988);
- Certificação da Qualificação de Supervisores de Radioproteção: CNEN NN-3.03 (1999);
- Licenciamento de Instalações Radiativas: CNEN NE-6.02 (1998).

Utilizam-se também as recomendações internacionais – BSS – da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1996^b), da publicação 75 do ICRP (1997), e da publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992), entre outras.

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

Em 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 intertravamento, 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; a perna direita, acima do joelho. LANZ (1967) descreveu detalhadamente este acidente.

Em Maryland, EUA, em 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. Duas semanas após o 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 (1993) descreveu em profundidade este acidente.

Em Hanói, Vietnã, em novembro 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.

O físico continuou a manipular a amostra, enquanto o acelerador começou a operar, com energia de 15 MeV. O outro 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^c).

Os três exemplos de acidentes aqui relatados mostraram a importância de se dispor de uma metodologia para avaliar as instalações com aceleradores, visando a prevenção de outros eventos acidentais.

De acordo com o levantamento realizado no presente trabalho, utilizando-se o banco de dados da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN e também via *internet*, por meio de correio eletrônico, existem atualmente no Brasil oito instituições com 13 aceleradores de partículas, geradores de feixes de diferentes características, utilizados com finalidades de pesquisa e produção de radioisótopos. Tais instalações estão distribuídas do seguinte modo: três no Estado de São Paulo, quatro no do Rio de Janeiro e uma no Rio Grande do Sul. Duas novas instalações estão em fase de testes finais para funcionamento, uma no estado de Minas Gerais e outra em Pernambuco.

O histórico mundial de acidentes com aceleradores registra sempre danos físicos irreparáveis aos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) envolvidos e, também, dependendo das características do acidente, a membros do público (IAEA, 1996^a). Assim, faz-se necessário realizar um controle severo de tal prática por parte da autoridade reguladora, que, em nosso país, é a CNEN.

Todavia, no Brasil, até o ano de 2008, o controle das instalações de aceleradores de pesquisa tem se resumido à avaliação dos documentos referentes ao licenciamento.

Não são realizadas pela CNEN inspeções reguladoras periódicas para a verificação das condições de segurança e proteção radiológica de tais instalações. O controle depende exclusivamente do Supervisor de Proteção Radiológica – SPR – de cada instalação, quando este existe de fato e, mesmo assim, o desempenho dele não é avaliado pela autoridade reguladora.

1.2 RELEVÂNCIA

A relevância do tema desta tese de doutorado consiste em gerar uma metodologia inédita para avaliação das instalações com aceleradores de partículas, destinado ao uso em pesquisa, e fornecê-la à CNEN e aos usuários, para que sirva de subsídio com a qual possam avaliar e manter os equipamentos em condições de segurança física e radiológica, sem danos à saúde dos IOE e indivíduos do público, ao longo da vida útil dos aceleradores.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivos principais desenvolver um estudo das condições de proteção e segurança radiológicas e criar uma metodologia para a análise de segurança e a classificação, quanto ao risco radiológico, das instalações com aceleradores de partículas cujas finalidades sejam as de pesquisa no país. Tal estudo visa a detectar irregularidades que possam vir a ocasionar acidentes e propor a solução imediata das mesmas, com base nas normas nacionais da CNEN e em recomendações internacionais da publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992) para a área de aceleradores de partículas. Para tanto, os seguintes procedimentos específicos foram estipulados:

- Fazer um levantamento estatístico de todas as instalações com aceleradores de partículas destinados a atividades de pesquisa no país;
- Classificar essas instalações de acordo com as normas nacionais e recomendações internacionais;
- Realizar visitas às instalações para avaliar a conformidade delas às normas de proteção radiológica nacionais e aos padrões e recomendações internacionais;

- Identificar as práticas que envolvam exposições potenciais e exposições ocupacionais, de acordo com as definições da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), na publicação *Safety Series 115 – BSS* (IAEA, 1996^b);
- Analisar o risco, usando-se técnicas padronizadas, para se avaliar os dispositivos de segurança física e radiológica dos aceleradores;
- Propor meios de restringir exposições ocupacionais, através de controles de engenharia e características de projeto, incluindo blindagem, ventilação, contenção de contaminação, uso de equipamentos de proteção individual, dispositivos de alarme, dispositivos de controle de acesso e dispositivos de emergência;
- Comparar as instalações nacionais com as dos países desenvolvidos, sob o ponto de vista da proteção e segurança radiológicas;
- Gerar uma metodologia de avaliação das instalações com aceleradores de partículas para uso em pesquisa, de modo a sugerir que a mesma possa ser adotada pela CNEN, em inspeções reguladoras de conformidade;
- Fornecer aos usuários a metodologia de avaliação dessas instalações;
- Sugerir à CNEN requisitos para a elaboração de uma norma experimental, destinada a nortear os titulares responsáveis e os indivíduos ocupacionalmente expostos das instalações.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese contém cinco capítulos. O primeiro é a introdução, onde são descritos o estado da arte, objetivos e relevância.

No segundo capítulo são abordados os fundamentos teóricos: a importância e o conceito de análise de segurança, o método da análise de camadas de proteção, a teoria dos indicadores de segurança e é descrita uma instalação para aplicação da análise.

O capítulo três descreve a metodologia aplicada ao trabalho: o levantamento de dados sobre as instalações, a execução das etapas fundamentais da análise de camadas de proteção e a aplicação dos indicadores de segurança proativos.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos: o levantamento estatístico, a avaliação das condições de radioproteção, a aplicação da análise de segurança – LOPA, a geração de indicadores de risco, o resultado da aplicação da lista de verificação, os resultados dos levantamentos radiométricos, o resultado da análise

dos relatórios de dose, comparação das instalações nacionais com as da Espanha e são apresentados os requisitos de norma específica para aceleradores.

Encerramos a tese com o quinto capítulo, apresentando as conclusões do trabalho e sugestões para o órgão regulador e usuários.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ANÁLISE DE SEGURANÇA

Como ferramenta de base para se instituir a metodologia proposta, torna-se imprescindível a descrição de conceitos relacionados à análise de segurança e à classificação das instalações quanto ao risco radiológico.

Deve-se utilizar um método formal de análise, como, por exemplo, uma técnica de análise de risco, como a análise de segurança probabilística. Deve-se considerar individualmente cada componente dentro do sistema. Deve-se levar em consideração os tipos prováveis de falhas e as consequências delas para o sistema como um todo. Tal método deve incluir considerações acerca da credibilidade dos procedimentos operacionais e deve abranger falhas ao se seguir os procedimentos, tanto inadvertida quanto deliberadamente.

A direção da instalação deve demonstrar à autoridade reguladora de que modo o projeto da instalação e os respectivos procedimentos operacionais correlatos irão contribuir para a prevenção de acidentes e para mitigar os efeitos deles. Tal informação deve ser fornecida sob a forma de “análise de segurança” documentada, descrevendo e avaliando a resposta prevista da instalação a incidentes – mau funcionamento ou falhas previsíveis de equipamentos, causas comuns de falhas, erros humanos, eventos externos, etc – que podem levar às condições de acidentes. As análises devem ser estendidas às combinações relevantes de tais incidentes – mau funcionamento, falhas, erros e eventos.

As “análises de segurança” devem mostrar a extensão pela qual a instalação pode controlar ou acomodar situações relacionadas aos vários estágios operacionais e às condições de acidentes. Os resultados devem ser expressos, em termos de probabilidades dos eventos, da dimensão de danos às barreiras entre as fontes de radiação e os funcionários e membros do público e, tanto quanto possível, devem ser expressos em função das prováveis doses de radiação para trabalhadores e para o público.

2.1.1 ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO – LOPA

Como um dos objetivos específicos do presente trabalho é propor a utilização da técnica de Análise de Camadas de Proteção – LOPA – para a avaliação de risco dos diversos cenários de acidentes em uma instalação de acelerador de partículas para pesquisa (cíclotron), tal método encontra-se aqui descrito.

A Análise de Camadas de Proteção – LOPA – não é apenas mais uma ferramenta de análise de perigos ou de risco. É uma ferramenta semiquantitativa de engenharia utilizada para assegurar que o risco de um processo é suficientemente mitigado a um nível aceitável. A LOPA é uma metodologia racional, que proporciona um meio rápido e eficaz de identificação das camadas de proteção que reduzem a frequência e/ou a consequência de incidentes perigosos. A LOPA fornece critérios e restrições específicos para a avaliação das camadas de proteção independentes, eliminando a subjetividade de métodos qualitativos a um custo substancialmente menor, comparado ao custo de técnicas quantitativas completas (SUMMERS, 2003).

O propósito primário da LOPA é determinar se existem camadas de proteção suficientes para fazer frente a um cenário de acidente. Dependendo da complexidade do processo e da severidade do acidente, podem ser necessárias uma ou diversas camadas de proteção, de forma que o risco de acidente se torne tolerável.

A LOPA determina uma aproximação do risco de um cenário de acidente, utilizando geralmente categorias de ordem de magnitude para a frequência do evento iniciador, para a severidade da consequência, e para a probabilidade de falha das camadas de proteção de um cenário. Os resultados auxiliam no julgamento de alternativas de mitigação de risco, proporcionando uma base consistente para a tomada de decisões.

A utilização da LOPA na indústria de processos vem apresentando grande crescimento nos últimos anos. E também vêm sendo desenvolvidas outras aplicações para a técnica, tais como LOPA para explosões (MARKOWSKI, 2006) e LOPA para fatores humanos (BAYBUTT, 2002), entre outras.

A ciência da análise de riscos surgiu para prever a frequência de acidentes, avaliar as consequências de acidentes prováveis, elaborar estratégias para impedir acidentes e também para mitigar os impactos adversos se ocorrer um acidente.

Assim, a determinação do risco auxilia substancialmente a tomada de decisão sobre a segurança do projeto e a operação de plantas de processo.

Métodos quantitativos de risco são usados para avaliar riscos potenciais quando métodos qualitativos – tais como a APP e a HAZOP – não conseguem fornecer um entendimento adequado dos riscos.

A Análise Quantitativa de Riscos – AQR – é um método que identifica onde a operação e/ou os sistemas de engenharia e gerenciamento podem ser modificados para reduzir os riscos. Entretanto, o método da AQR requer informações precisas, tornando-o complexo. Por esse motivo, na década de 90, o conceito de camadas de proteção começou a ser abordado, sendo publicado primeiramente pelo CCPS (*Center for Chemical Process Safety*). A partir desses conceitos, diversas empresas nos EUA desenvolveram procedimentos internos para a realização da Análise de Camadas de Proteção (LOPA) e, em 2001, o CCPS publicou o livro *Layer of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*, que descreve a técnica da LOPA.

A LOPA é concordante com o conceito de “defesa em profundidade” (BSS, Safety Series No. 115, 1996^b). Esse conceito deve ser aplicado a todas as atividades de segurança, incluindo as organizacionais, comportamentais ou referentes a projetos. A “defesa em profundidade” assegura que as atividades encontram-se protegidas por uma série de fatores, de modo que, se uma falha ocorrer, esta seria compensada ou corrigida.

Na elaboração do projeto, a “defesa em profundidade” deve ser incorporada de tal forma que sejam fornecidos múltiplos níveis de proteção, e que a necessidade de intervenção humana seja minimizada. São exemplos desse conceito: (a) o fornecimento de meios múltiplos para assegurar cada uma das funções básicas de segurança, isto é, controle de acesso, blindagem e confinamento da radioatividade; (b) o uso de equipamentos protetores de alta confiabilidade; (c) a complementação do controle da instalação por ativação automática dos sistemas de segurança e por ações do operador; e (d) o fornecimento de equipamentos e procedimentos para controlar o curso e limitar as consequências de acidentes.

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma técnica simplificada de análise de riscos, semiquantitativa, que é aplicada após o uso de uma técnica de identificação de perigos, como a APP ou a HAZOP, sendo seus resultados deliberadamente conservadores. Ela é considerada semiquantitativa por gerar uma estimativa do risco, mas seu foco está nas consequências severas e seus resultados são geralmente adequados para identificar os Níveis de Integridade de Segurança (SIL)

necessários para cada Função Instrumentada de Segurança (SIF). sendo seus resultados deliberadamente conservadores.

Um dos objetivos específicos do presente trabalho é avaliar o risco dos sistemas de controle de acesso, do controle de radiação e controle de efluentes radioativos da sala de irradiação de um acelerador de partículas de pesquisa (cíclotron), usando a técnica da LOPA. Tal técnica foi escolhida por ser mais simples do que a AQR, conseguindo assim, estimar o risco com certa precisão e em prazo menor. Apesar de tal técnica não ser indicada para aplicação em sistemas muito complexos, numa primeira análise, a mesma pareceu ser adequada para o nosso propósito, já que esses sistemas não são contemplados em Análises Probabilísticas de Segurança (APS). Além disso, o histórico de acidentes com aceleradores mostra que tal análise torna-se necessária.

Um estudo que utilize uma análise quantitativa de risco completa (árvore de eventos, árvore de falhas, etc.) deve apresentar um risco associado menor, quando comparado aos resultados da LOPA, cujo risco, apesar de maior, possui um valor consistente. Isto porque a LOPA utiliza, para calcular o risco aproximado de um cenário, categorias em ordem de magnitude para a frequência do evento iniciador, severidade das consequências e probabilidade de falhas para camadas de proteção independentes – IPLs (CCPS, 2001).

Dessa forma, a LOPA é uma metodologia que se situa entre uma simples técnica de análise qualitativa e uma técnica de análise quantitativa mais elaborada. Assim como em muitos outros métodos de análise de perigos, a primeira proposta da LOPA é determinar se há números de camadas de proteção suficientes num cenário de acidente.

A LOPA estabelece se há IPLs (Camadas de Proteção Independente) suficientes para controlar o risco em um dado cenário de acidente. Se o risco estimado de um cenário não for aceito, IPLs adicionais devem ser acrescentadas. Porém, tal técnica não informa quais IPLs devem ser acrescentadas ou que projeto deve ser escolhido.

O cenário é tipicamente identificado durante a análise de perigos, capacidade de avaliação de mudança ou revisão de projeto. A meta é escolher cenários que os analistas acreditam representar os riscos mais significativos.

A LOPA é dividida em seis passos, descritos abaixo e resumidos na Figura 3.1.

- Passo 1: *Identificar consequências para evitar os cenários.* A consequência é identificada durante a análise qualitativa de perigos, como a HAZOP. Em seguida, o analista calcula a consequência (incluindo o impacto) e estima sua magnitude;

- Passo 2: *Selecionar um cenário de acidente.* A LOPA é aplicada a um cenário de cada vez. O cenário pode vir de outras análises, como análises qualitativas, e descreve um único par causa / consequência;
- Passo 3: *Identificar o evento iniciador do cenário e determinar a frequência do evento iniciador (eventos por ano).* O evento iniciador deve conduzir à consequência (todas as salvaguardas falhando). A frequência deve considerar os aspectos secundários do cenário;
- Passo 4: *Identificar IPLs e estimar a probabilidade de falha na demanda para cada IPL.* O ponto principal da LOPA é reconhecer as salvaguardas que estabelecem os requisitos das IPLs para um dado cenário;
- Passo 5: *Estimar o risco do cenário por combinações matemáticas de consequência, evento iniciador e IPL's.* Outros fatores podem ser incluídos durante os cálculos, dependendo da definição de consequência (impacto do evento);
- Passo 6: *Avaliar o risco para tomar uma decisão relativa ao cenário.* Esta etapa compara o risco de um cenário com os critérios de tolerância de risco da empresa e/ou os objetivos relacionados.

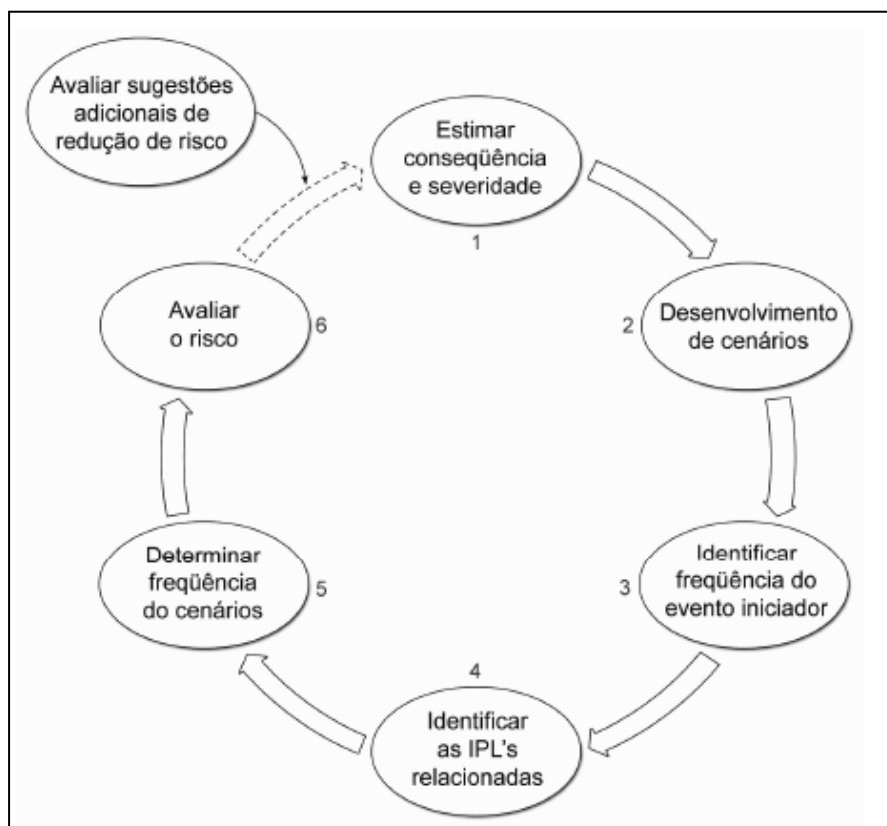


Fig. 3.1: Etapas da LOPA.

2.1.2 IDENTIFICANDO CONSEQUÊNCIAS E SEVERIDADE

Consequências são os efeitos indesejados dos cenários de acidentes. Na LOPA, as consequências são estimadas por uma ordem de magnitude de severidade, que requer muito menos esforço que a modelagem matemática, e ainda facilita a comparação do risco de diferentes cenários.

Uma das primeiras decisões que uma organização deve tomar quando escolher implantar a LOPA é de que modo definir as consequências finais. Algumas empresas avaliam até a perda de material, e outras estimam o impacto final em termos de prejuízo ou danos.

2.1.3 SELECIONANDO CENÁRIOS DE ACIDENTE – LOPA

Este é o passo da LOPA em que os analistas constroem uma série de eventos, incluindo os eventos iniciadores e a falha das camadas de proteção independentes (IPLs), que levam a uma consequência indesejada. Um cenário é um evento não planejado ou uma sequência de eventos que resultam uma consequência indesejada. Cada cenário consiste de pelo menos dois elementos: um evento iniciador, que começa uma cadeia de eventos; e uma consequência, resultante se uma cadeia de eventos continuar sem interrupção.

Conceitos inerentemente seguros tentam reduzir o risco por eliminação de cenários, usualmente por prevenção ou redução da consequência de um evento iniciador.

Cada cenário deve ter um único par evento iniciador / consequência. Se o mesmo evento iniciador resultar em diferentes consequências, devem ser desenvolvidos cenários adicionais. Em alguns casos, muitos cenários podem surgir de eventos iniciadores comuns e devem ser desenvolvidos cenários separados para seções individuais da planta. Na maioria dos cenários haverá pelo menos uma proteção que pode ser considerada uma IPL para a proposta da LOPA. Se tal IPL operar como previsto, a cadeia de eventos será interrompida e impedirá a ocorrência das consequências indesejadas.

A fonte de informação mais comum para identificar um cenário é a avaliação de perigos, que é realizada no início do projeto ou durante uma modificação do processo. A maioria dos métodos de avaliação de perigos é qualitativa e não possibilita ao analista

quantificar se o risco associado com o perigo documentado é aceitável, podendo tornar o julgamento inconsistente.

O método da LOPA pode colher a informação da HAZOP e atribuir valores numéricos para a frequência do evento iniciador, para a frequência de falha e probabilidade de falha na demanda (PFD), e determinar se uma proteção é uma IPL. A Figura 3.2 mostra como os dados obtidos na HAZOP podem ser usados na LOPA, e assim identificar os cenários (CCPS, 2001).

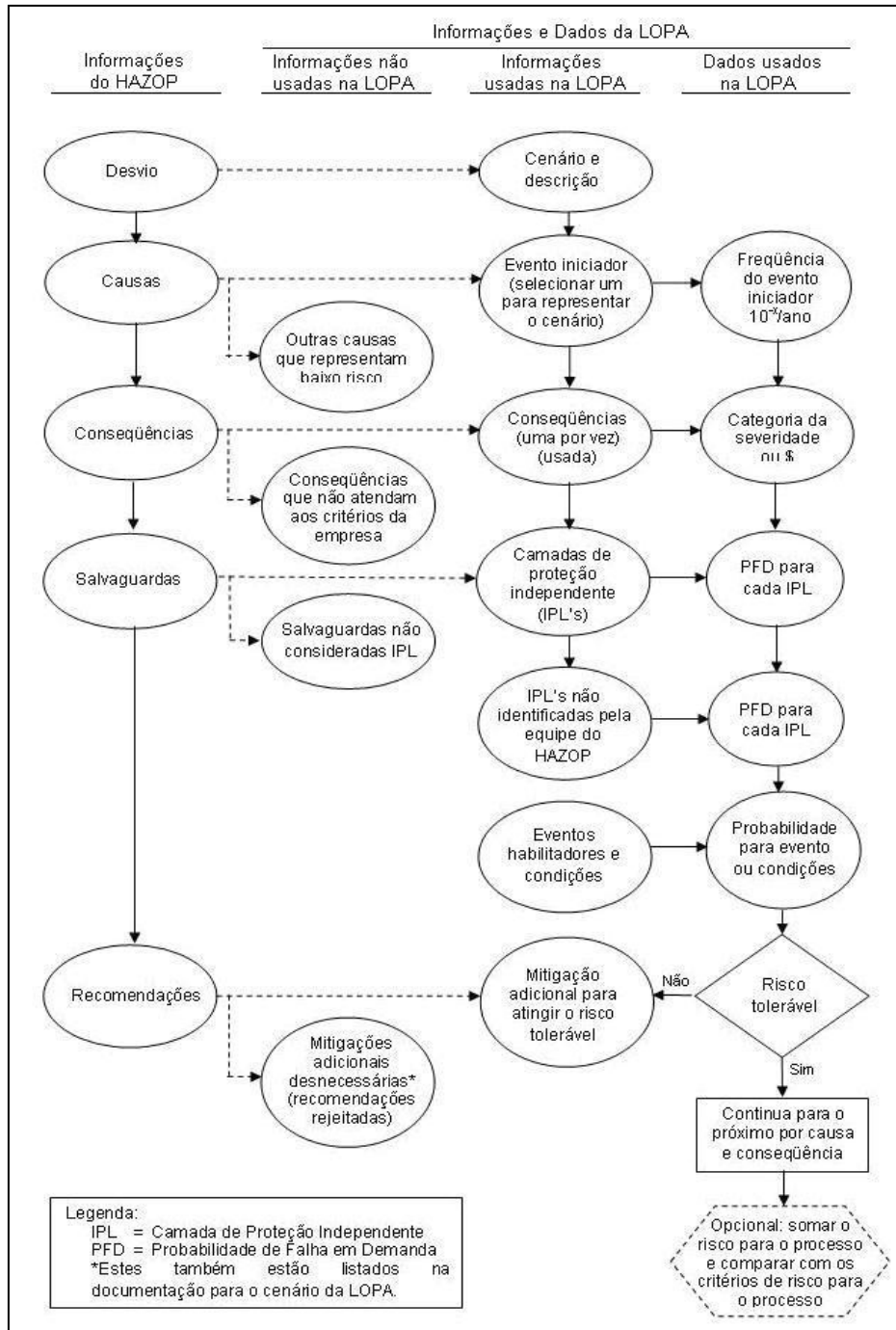


Fig. 3.2: Informações da HAZOP e da LOPA.(CCPS, 2001)

2.1.4 DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS DE ACIDENTE – LOPA

Um cenário requer identificação e documentação de todos os passos importantes requeridos para um evento, desde o evento iniciador até a consequência. Qualquer fator que possa afetar o cálculo numérico da frequência de consequência ou do tamanho ou do tipo de consequência deve ser incluído e documentado. Isso é importante para manter a ligação entre um evento iniciador específico, uma consequência específica e as IPLs específicas. Por outro lado, IPLs podem não ser creditadas apropriadamente.

O próximo passo é confirmar se a consequência está especificada usando o mesmo critério do método da LOPA. Depois, é identificar se as proteções localizadas estão operando como deveriam, evitando as consequências do cenário. O melhor é listar todas as proteções para um cenário particular antes de decidir quais são as verdadeiras IPLs.

2.1.5 IDENTIFICANDO A FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR – LOPA

Como já mencionado, cada cenário tem um único evento iniciador. A frequência do evento iniciador é normalmente expressa em eventos por ano. Os eventos iniciadores são agrupados em três tipos gerais:

- eventos externos, que incluem fenômenos naturais, tais como enchente; eventos provenientes de incêndio ou explosão nas proximidades; intervenções por impactos mecânicos nos equipamentos ou equipamentos de construção;
- falha dos equipamentos, que podem ser classificados em falha no sistema de controle e falha mecânica. A falha no sistema de controle pode incluir falha nos componentes do sistema de controle do processo básico, falha no *software*, falha no sistema de controle de emergência, etc. Similarmente, a falha mecânica inclui falha no vaso ou na tubulação ocasionada por fadiga, corrosão, erro de projeto, especificação, defeitos de fabricação ou montagem, sobrepressão, etc.;
- falha humana, que pode ser proveniente de erro operacional, erro de manutenção, erro a respostas críticas ou erros de programação.

Os fatores que não são nem falhas nem camadas de proteção são chamados de eventos habilitadores ou condições, e consistem de operações ou condições que não são

diretamente a causa do cenário, mas que devem estar presentes ou ativas para a sua ocorrência. Tais eventos habilitadores são expressos como probabilidades, e podem incluir o modo de operação (*startup* ou *shutdown*) ou operação proveniente de uma fase ou passo específico. Em tais casos, o evento iniciador pode ser uma combinação de um evento habilitador (probabilidade) e uma falha subsequente ou ação não apropriada (frequência).

2.1.6 SELEÇÃO DAS TAXAS DE FALHA – LOPA

Muitos dados de taxa de falha contêm dados com dois ou mais algarismos significativos, o que é muito mais preciso do que o requerido pela LOPA. Esta somente requer uma aproximação em ordem de magnitude, e tais dados devem ser trazidos para próximo da ordem de magnitude desejada.

As taxas de falha dos equipamentos são tipicamente altas quando o equipamento é novo ou quando está envelhecido. Entretanto, a maioria dos equipamentos de período longo de operação envolve uma taxa de falha constante. O método da LOPA assume taxa de falha constante para o equipamento.

Alguns dados típicos de taxas de falha podem ser encontrados nas seguintes fontes bibliográficas:

- Dados industriais de falha de equipamentos:

- *Guideline for Process Equipment Reliability Data* (CCPS, 1986);
- *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* (CCPS, 1989);
- *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed.* (CCPS, 2000);
- *Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations* (IEEE, 1984);
- *Offshore Reliability Data* (OREDA, 2002).

- Dados industriais de taxas de erros humanos:

- *Inherently Safer Chemical Processes: A life Cycle Approach* (CCPS, 1996);
- *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications* (SWAIN e GUTTMAN, 1983);
- Histórico da empresa.

Algumas vezes os dados de falha são expressos como probabilidade de falha na demanda (PFD). Nesse caso, a frequência do evento iniciador deve ser estimada, mas isto envolve estimativas do número de vezes por ano que uma demanda está localizada no sistema. Para isso, deve-se contar o número de vezes que a operação parou por ano e multiplicar pela probabilidade de falha na demanda. Ou, pode ser tão complexo como usar técnicas de árvore de falhas para estimar o número de ocorrências por ano para um dado sistema. Mas, como a LOPA é uma aproximação simplificada, os analistas devem mudar para técnicas mais rigorosas se o cenário for muito complexo, ou se for necessária uma maior precisão.

Algumas metodologias da LOPA ajustam a frequência de consequência não mitigada para refletir fatores tais como a probabilidade de pessoal estar exposto ao perigo, a probabilidade de ignição e a probabilidade de lesões ou fatalidade se ocorrer exposição. Tais ajustes podem ser feitos na determinação da frequência do evento iniciador ou no cálculo da frequência final do cenário.

2.1.7 IDENTIFICANDO CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES – LOPA

Uma IPL é um dispositivo, sistema ou ação que é capaz de evitar um cenário com consequências indesejadas do evento iniciador ou ação de qualquer outra camada de proteção associada com o cenário. Se todas as IPLs de um cenário falharem, ocorrerão consequências indesejadas após o evento iniciador.

A diferença entre uma IPL e uma proteção é importante. Uma proteção é qualquer dispositivo, sistema ou ação que poderá interromper a cadeia de eventos que se segue ao evento iniciador. Entretanto, a eficiência de algumas proteções não pode ser quantificada devido à falta de dados, incerteza quanto à independência, ou outros fatores.

Todas as IPLs são proteções, mas nem todas as proteções são IPLs. A eficiência de uma IPL é quantificada em termos de probabilidade de falha na demanda (PFD), que é definida como a probabilidade de um sistema (nesse caso da IPL) falhar na performance de uma função específica na demanda. A PFD é um número adimensional entre 0 e 1. Quanto menor o valor da PFD, maior será a redução na frequência da consequência para uma dada frequência de evento iniciador. A redução na frequência alcançada por uma IPL é algumas vezes chamada de fator de redução de risco.

As proteções podem ser classificadas como ativas ou passivas; e como preventivas ou mitigadoras.

2.1.8 PROTEÇÕES – LOPA

2.1.8.1 SISTEMA DE CONTROLE BÁSICO DO PROCESSO (BPCS)

O Sistema de Controle Básico do Processo (BPCS), incluindo controles manuais normais, é o primeiro nível de proteção durante uma operação normal. O BPCS é designado para manter o processo na região de operação segura. A operação normal do BPCS pode ser creditada como uma IPL se atender aos critérios apropriados. Assim, a falha do BPCS pode ser considerada um evento iniciador. Quando o BPCS for considerado uma IPL, o analista deve avaliar a eficácia do controle e os sistemas de segurança que, como erro humano, podem degradar a performance do BPCS.

O BPCS é uma IPL relativamente fraca por ter usualmente pequenas redundâncias nos componentes, capacidade de teste embutida e segurança limitadas contra mudanças não autorizadas para o programador lógico interno.

2.1.8.2 ALARMES CRÍTICOS E INTERVENÇÕES HUMANAS

Esses sistemas são o segundo nível de proteção durante uma operação normal e podem ser ativados pelo BPCS. A ação do operador, iniciada por alarmes ou por observação, pode ser creditada como uma IPL quando vários critérios são satisfeitos para assegurar a eficiência da ação.

2.1.8.3 FUNÇÃO INSTRUMENTADA DE SEGURANÇA (SIF)

A SIF é uma combinação de sensores, solucionador lógico e elementos finais com um nível de segurança específico integrado que detecta uma condição anormal (fora do limite) e leva o processo a funcionar no seu estado seguro. Tal função é independente do BPCS, sendo normalmente considerada como uma IPL. O projeto do sistema, o nível de redundância, a quantidade e o tipo de teste determinarão a PFD da SIF aceita para a LOPA.

2.1.8.4 PROTEÇÕES FÍSICAS (VÁLVULAS, DISCO DE RUPTURA, ETC)

Tais dispositivos, quando apropriadamente dimensionados, projetados e preservados, são IPLs que podem fornecer um alto grau de proteção contra sobrepressão. Entretanto, a eficiência deles pode ser comprometida com incrustações, corrosão, ou se atividades de inspeção e manutenção forem de baixa qualidade.

2.1.8.5 PROTEÇÕES PÓS-LIBERAÇÃO (DIQUES, CONTENÇÕES, ETC)

Tais IPLs são dispositivos passivos que provêm um alto nível de proteção se projetados e mantidos corretamente. Embora suas taxas de falha sejam baixas, a possibilidade de falha pode ser incluída nos cenários. Se sistemas automáticos de inundação, de espuma, de detecção de gás, etc, atenderem aos requisitos das IPLs, podem ser considerados alguns créditos para esses dispositivos em cenários específicos.

2.1.8.6 RESPOSTA DE EMERGÊNCIA DA PLANTA

Os fatores brigada de incêndio, sistemas de inundação manual, facilidade de evacuação, etc., não são normalmente considerados como IPLs. Mas eles podem ser ativados depois de uma liberação inicial e ter muitas variáveis – por exemplo, o tempo de atraso – afetando a eficiência global na mitigação do cenário.

2.1.8.7 RESPOSTA DE EMERGÊNCIA DA COMUNIDADE

Essas medidas, que incluem a evacuação da comunidade e ida a um local seguro, não são normalmente consideradas como IPLs desde que elas sejam ativadas depois de uma liberação inicial e tiverem muitas variáveis afetando sua eficiência global na mitigação do cenário. Eles não fornecem nenhuma proteção para o pessoal da instalação.

2.1.9 REGRAS PARA IPL – LOPA

Algumas proteções não são normalmente consideradas IPLs, tais como treinamento e certificações; procedimentos; testes normais e inspeção; manutenção; comunicações; sinais; proteção de incêndio; entre outras. Para ser considerada uma IPL, um dispositivo, sistema ou ação deve ser:

- efetivo em prevenir a consequência quando funcionar como projetado;
- independente do evento iniciador e dos componentes de qualquer IPL exigida para o mesmo cenário;
- auditável.

2.1.9.1 EFICIÊNCIA

Se um dispositivo, sistema ou ação é creditado como uma IPL, este deve ser eficiente em prevenir consequências indesejadas associadas com o cenário. As seguintes condições são usadas para guiar os analistas a fazer julgamentos apropriados para determinar se uma proteção é uma IPL:

- Se a proteção não pode sempre detectar condições e gerar uma ação específica, não será uma IPL;
- Para ser IPL, a proteção tem que detectar condições em tempo para se tomar a ação corretiva que prevenirá uma consequência indesejada. O tempo requerido deve incluir: tempo para detectar a condição; tempo para processar a informação e tomar a decisão; tempo para tomar a ação requerida e tempo para a ação surtir efeito.

Na LOPA, a eficiência de uma IPL em reduzir a frequência de uma consequência é quantificada usando sua PFD. Determinar, ou especificar, o valor apropriado para a PFD de uma IPL é uma parte importante do processo da LOPA.

2.1.9.2 INDEPENDÊNCIA

O método da LOPA usa independência para assegurar que os efeitos do evento iniciador, ou de outras IPLs, não interajam com uma IPL específica, diminuindo assim a capacidade de realizar sua função. O critério de independência requer que uma IPL seja

independente da ocorrência, ou de consequências, do evento iniciador e da falha de qualquer componente de uma IPL também creditada para o mesmo cenário. Isso é importante para entender quando uma proteção pode e não pode ser exigida como uma IPL na LOPA.

A Falha de Causa Comum (FCC) é a falha de mais de um componente, item ou sistema, devido à mesma causa ou evento iniciador. Sendo assim, pelo critério de independência, todas as proteções afetadas pela FCC somente podem ser consideradas como uma única IPL.

Um dispositivo, sistema ou ação não é independente do evento iniciador e não pode ser creditado como uma IPL se qualquer dos seguintes cenários for verdadeiro (CCPS, 2001):

- *Erro do operador é o evento iniciador e a IPL candidata assume que o mesmo operador deve agir para mitigar a situação.* Erro humano é equivalente à falha de um sistema e uma vez que um ser humano tenha cometido um erro, não se pode esperar que o mesmo operador aja corretamente após uma seqüência de eventos. Isso justifica-se porque o erro pode ser devido a doença, incapacidade (drogas ou álcool), distração, sobrecarga de trabalho, inexperiência, instruções de operação imperfeitas, falta de conhecimento, etc., que mais tarde ainda estarão presentes quando a ação for requerida;
- *Perda de uma utilidade (eletricidade, ar, água de refrigeração, nitrogênio, etc.) é o evento iniciador e a IPL candidata é um sistema que depende dessa utilidade.*

2.1.9.3 AUDITABILIDADE

Um componente, sistema ou ação deve ser auditável para demonstrar que atende aos requisitos de mitigação do risco de uma IPL da LOPA. O processo de auditoria deve confirmar que a IPL é eficiente em prevenir a consequência se funcionar como projetada.

2.1.9.4 AVALIAÇÃO DA IPL

Este item descreve como os analistas da LOPA determinam se uma proteção atende aos requisitos para ser uma IPL, e a PFD apropriada para a IPL. Onde a ação humana é creditada como uma IPL, os seguintes fatores devem ser definidos e

documentados: como a condição será detectada; como a decisão para agir será tomada; e qual ação será tomada para prevenir a consequência.

2.1.9.5 VALOR DA PFD PARA UMA IPL

A PFD para uma IPL é a probabilidade de que, quando demandada, a IPL não realizará a tarefa requerida. A falha na realização pode ser causada por:

- um componente de uma IPL estar num estado falho ou inseguro quando ocorrer um evento iniciador;
- enfraquecimento de um componente durante a realização de suas tarefas; ou
- enfraquecimento da intervenção humana para ser eficiente, etc.

2.1.10 IPLs PASSIVAS

Uma IPL passiva não é requerida para se tomar uma ação com a finalidade de reduzir o risco. Algumas IPLs conseguem redução no risco usando meios passivos para reduzir a frequência de eventos com altas consequências. Se projetados adequadamente, tais sistemas passivos podem ser creditados como IPLs com um alto nível de confiança, e reduzirão significativamente a frequência dos eventos com consequências potencialmente maiores.

2.1.11 IPLs ATIVAS

IPLs ativas são requeridas para afastar um estado do outro em resposta a uma mudança em propriedades mensuráveis do processo (por exemplo, temperatura ou pressão) ou um sinal de outra fonte (tais como botão de pressão ou interruptor).

Uma IPL ativa geralmente compreende:

- algum tipo de sensor (instrumento, mecânico ou humano);
- um processo de tomada de decisão (solucionador lógico, motor, fonte, homem, etc.);
- uma ação automática, mecânica ou humana.

2.1.12 SISTEMAS INSTRUMENTADOS

Tais sistemas são uma combinação de sensores, solucionadores lógicos, controladores de processos e elementos finais que trabalham juntos, tanto para regular automaticamente a operação da instalação, quanto para prevenir a ocorrência de um evento específico dentro de um processo. Dois tipos de sistemas instrumentados são considerados no método básico da LOPA, cada um com sua proposta e características próprias.

Um, o controlador contínuo, geralmente fornece um *feedback* contínuo ao operador de que está funcionando normalmente, embora manutenções não programadas possam ocorrer.

O segundo, o controlador estático – solucionador lógico que toma medidas do processo e executa mudanças de liga-desliga para os indicadores do alarme e para válvulas de processo – monitora as condições da planta e somente toma ações de controle quando pontos de erro pré-definidos são alcançados. Ações de controle estático podem estar classificadas como intertravamento de processos e alarmes. Falhas no controlador estático (solucionador lógico e dispositivos de campo associados) não podem ser detectadas até o próximo teste de prova manual de uma função de segurança falha. Ambos os controladores são encontrados no BPCS e SIS. O BPCS e o SIS diferem significativamente no nível de redução de risco alcançado.

2.1.13 SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA (SIS)

Um sistema instrumentado de segurança (SIS) é uma combinação de sensores, solucionadores lógicos e elementos finais que fornece uma ou mais funções instrumentadas de segurança (SIFs). As SIFs são funções de controle estático, algumas vezes chamados de intertravamentos de segurança e alarmes críticos de segurança.

Cada SIF terá seu próprio valor de PFD com base no:

- número e tipo de sensores, solucionadores lógicos, e elementos finais de controle; e
- intervalo de tempo entre testes funcionais periódicos dos componentes do sistema.

A realização da redução do risco de uma SIF é definida em termos de PFD. Padrões internacionais agruparam SIFs para aplicações em indústrias de processos em

categorias chamadas Níveis Integrados de Segurança (SILs). Os SILs são definidos como:

- SIL 1: $1 \times 10^{-2} \leq \text{PFD} < 1 \times 10^{-1}$. Tais SIFs são normalmente implantadas com um único sensor, um único solucionador lógico SIS e um único elemento de controle final;
- SIL 2: $1 \times 10^{-3} \leq \text{PFD} < 1 \times 10^{-2}$. Tais SIFs são completamente redundantes do sensor através do solucionador lógico SIS para o elemento final de controle;
- SIL 3: $1 \times 10^{-4} \leq \text{PFD} < 1 \times 10^{-3}$. Estas SIFs são completamente redundantes do sensor através do solucionador lógico SIS ao elemento final de controle, e requerem projeto cuidadoso e testes de prova frequentes para atingir números baixos de PFD;
- SIL 4: $1 \times 10^{-5} \leq \text{PFD} < 1 \times 10^{-4}$. Estas SIFs são difíceis para projetar e manter e não são usadas na LOPA.

2.1.14 SISTEMAS DE INUNDAÇÃO E OUTROS SISTEMAS CONTRA INCÊNDIO

Sistemas de inundação, e *spray* de água ou espuma podem ser considerados como IPLs. Se bem projetados e preservados, os sistemas automáticos são instalados e atendem aos requisitos das recomendações internacionais.

2.1.15 IPLs HUMANAS

IPLs humanas envolvem a confiança dos operadores ou de outros funcionários para tomar a ação de prevenir uma consequência indesejada, em resposta a alarmes ou em seguida a uma verificação de rotina do sistema.

2.1.16 DETERMINANDO A FREQUÊNCIA DOS CENÁRIOS

Os cálculos podem ser quantitativos, através de estimativas numéricas ou verificando as tabelas apropriadas.

- CÁLCULO GERAL

É o procedimento geral para o cálculo da frequência para um cenário de liberação com uma consequência específica. Para este cenário, a frequência do evento iniciador do item 2.2.4 é multiplicada pelo produto das PFDs da IPL.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{iJ} \quad (3-1)$$

onde:

f_i^C frequência para a consequência C para o evento iniciador i;

f_i^I frequência do evento iniciador para o evento iniciador i;

PFD_{ij} probabilidade de falha em demanda da j-ésima IPL que protege contra a consequência C para o evento iniciador i.

Tal equação é aplicada para situações de baixa demanda. O cálculo para altas demandas é mostrado a seguir. O resultado da Equação 3-1 pode ser usado como entrada para a comparação do risco calculado para o cenário dos critérios de tolerância de risco para os métodos de tomada de decisão.

• CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE EVENTOS ADICIONAIS

Em alguns casos somente a frequência de uma liberação é calculada, mas existem outros tipos de eventos.

Para calcular a frequência de tais eventos, a Equação 3-1 é modificada pela multiplicação da frequência do cenário de liberação pelas probabilidades apropriadas para o evento de interesse, que inclui:

- probabilidade de ignição ($P^{ignição}$), para liberações inflamáveis;
- probabilidade de ter pessoal na área exposta ($P^{pessoal\ presente}$), um parâmetro precursor para o cálculo de exposições e danos;
- probabilidade de ocorrência de dano (P^{dano}), para dano ou fatalidade.

A Equação 3-2 determina a frequência de incêndio para um único cenário para um único sistema:

$$f_i^{inc\tilde{e}ndio} = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignic\tilde{a}o} \quad (3-2)$$

A Equação 3-3 determina a frequência de uma pessoa exposta a incêndio:

$$f_i^{exp\ osic\tilde{a}o\ a\ inc\tilde{e}ndio} = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignic\tilde{a}o} \times P^{pessoal\ presente} \quad (3-3)$$

A Equação 3-4 determina a frequência de uma pessoa se machucar num incêndio:

$$f_i^{dano\ inc\tilde{e}ndio} = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignic\tilde{a}o} \times P^{pessoal\ presente} \times P^{dano} \quad (3-4)$$

Para efeitos tóxicos a frequência é determinada similarmente à Equação 3-4, omitindo a $P^{ignic\tilde{a}o}$:

$$f_i^{t\acute{o}xico} = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{pessoal\ presente} \times P^{dano} \quad (3-5)$$

A probabilidade de ignição e a probabilidade de uma pessoa presente são freqüentemente conectadas com o evento iniciador, pois a ação do pessoal presente pode ser a fonte de ignição. A probabilidade de ignição depende de como a liberação se dispersa e onde está localizada a fonte de ignição.

2.1.17 ESTIMANDO O RISCO

Nesta etapa, deve-se calcular o risco com os valores obtidos nas etapas anteriores. A Tabela 2.1 exemplifica como documentar e calcular o risco dos cenários (CCPS, 2001).

TABELA 2.1: DOCUMENTAÇÃO E CÁLCULOS DE CENÁRIOS PARA A LOPA

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Consequência (Descrição / Categoria)			
Critério Tolerância de Risco (Categoria ou Frequência)			
Evento iniciador			
Condição / Evento habilitador			
Modificadores condicionais (se aplicável)			
	Probabilidade de ignição		
	Probabilidade de pessoas presentes na área afetada		
	Probabilidade de ferimento fatal		
	Outros		
Frequência da consequência não mitigada			
Camadas de proteção independentes			
BPCS			
Intervenção humana			
SIF			
Outras camadas de proteção (devem ser justificadas)			
Salvaguardas não-IPLs			
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPLs			
Frequência da consequência mitigada			
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não):			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco:			
Observações:			

2.1.18 USANDO A LOPA PARA TOMAR A DECISÃO

Todos os métodos descritos neste item podem ser usados para tomar decisões para alcançar o nível de risco que seja “tão baixo quanto razoavelmente praticável” (Princípio ALARA, *as low as reasonably achievable*).

A tomada de decisão é feita após os cenários serem completamente desenvolvidos e o risco existente ter sido calculado. No final de qualquer estudo, seja ele qualitativo ou quantitativo, a decisão do risco é normalmente considerada em três categorias:

- Dispor do risco residual: continuar com a administração dos sistemas que mantêm o risco em seu nível atual (provavelmente tolerável);
- Modificar (mitigar) o risco para torná-lo tolerável;
- Abandonar o risco (negócio, processo, etc.) porque está muito alto.

Decisões para abandonar operações são normalmente feitas com resultado de outros estudos, tais como uma avaliação quantitativa de risco. A LOPA, por outro lado, é usualmente aplicada para determinar se um cenário está dentro dos critérios de tolerância de risco ou se o risco deve ser reduzido.

Se o risco calculado é menor do que os critérios de risco, o cenário é calculado para ter um risco suficientemente baixo ou ter mitigação (ou IPL) suficiente para que nenhuma mitigação adicional seja necessária. Se, entretanto, o risco calculado exceder o critério de risco, o cenário é calculado para requerer uma mitigação (IPLs) adicional ou mais forte, ou requerer mudanças no projeto para tornar o processo inerentemente seguro, reduzindo a frequência ou consequência do cenário, ou, preferivelmente, eliminando o cenário. A decisão da LOPA pode ser tomada por três métodos, a seguir.

- **MÉTODO DA MATRIZ**

A matriz de risco é um método generalizado de mostrar visualmente a frequência tolerada para um cenário, com base na severidade da consequência e a frequência do cenário. O método da matriz pode ser a aproximação mais largamente usada para tomar decisões de risco com a LOPA. A desvantagem deste método é que o desenvolvimento de uma matriz usual com sua matriz de consequência associada requer conhecimento e experiência dos meios e técnicas. As vantagens do método são:

- o esboço claro do risco associado com o cenário. A redução requerida do risco pode ser demonstrada visual e numericamente, e várias áreas de decisão de redução de risco são facilmente descritas;

- os valores numéricos de tolerância do risco atual usados por uma empresa podem ser embutidos na matriz, caso elas não queiram usar os critérios explícitos;
- a precisão de muitos métodos da matriz de risco, geralmente para ordem de magnitude, faz deles métodos bem ajustados para usar com o método da LOPA, com seu uso de suposições conservativas e simplificadas;
- é fácil a tomada de decisão desde que somente um cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.

A Tabela 2.2 foi adaptada de CCPS (2001), mostra o método da matriz, onde é feita uma combinação da categoria da consequência e a frequência calculada, resultando numa célula que irá informar o grau de redução de risco requerido para o cenário.

TABELA 2.2: MATRIZ DE RISCO COM ZONAS INDIVIDUAIS DE AÇÃO

Frequência da consequência (por ano)	Categoria da consequência				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
$10^0 - 10^{-1}$	Opcional (avale alternativas)		Ação na oportunidade seguinte	Ação imediata	
$10^{-1} - 10^{-2}$	Opcional (avale alternativas)			Ação na oportunidade seguinte	Ação imediata
$10^{-2} - 10^{-3}$	Nenhuma ação adicional	Opcional (avale alternativas)		Ação na oportunidade seguinte	
$10^{-3} - 10^{-4}$	Nenhuma ação adicional		Opcional (avale alternativas)		Ação na oportunidade seguinte
$10^{-4} - 10^{-5}$	Nenhuma ação adicional			Opcional (avale alternativas)	
$10^{-5} - 10^{-6}$	Nenhuma ação adicional				Opcional (avale alternativas)
$10^{-6} - 10^{-7}$	Nenhuma ação adicional				

- MÉTODO DE CRITÉRIOS NUMÉRICOS (MÁXIMO RISCO TOLERADO PARA O CENÁRIO)

Algumas empresas têm desenvolvido os critérios de risco com base no maior risco tolerado por cenário ou na variedade de categorias de consequências. Outras

podem escolher a frequência de liberação de material perigoso, incêndio, ou perda por dano da propriedade. As vantagens para esse método são:

- os critérios por cenários são fáceis de entender e são consistentes para um dado material por um local específico;
- é fácil a tomada de decisão desde que somente um único cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.

A única desvantagem é que as frequências ajustadas para as condições habilitadoras e a probabilidade de ignição, probabilidade de dano e probabilidade de pessoal presente adicionam complexidade ao processo de cálculo.

- **MÉTODO DO NÚMERO DE CONFIANÇA DE IPLs**

Este método compara a frequência do evento iniciador ajustada com os valores da Tabela 8.2 do CCPS (2001) para determinar o número de confiança de IPLs requeridas. Os critérios de tolerância não são mostrados explicitamente. As vantagens desse método são:

- a facilidade de identificação do método da matriz, dos limites para as categorias de frequência e severidade;
- facilidade de uso;
- os critérios de tolerância de risco podem ser embutidos por empresas que preferem não usar critérios explícitos;
- é fácil a tomada de decisão desde que somente um cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.

A desvantagem desse método é que as suposições grosseiras indicam métodos de mitigação que podem resultar nos requisitos para mais IPLs que outros métodos da LOPA.

2.2 INDICADORES DE SEGURANÇA

Empresas e indústrias utilizam indicadores de desempenho para avaliar o seu desempenho com o objetivo de obter uma gestão empresarial eficaz e eficiente e uma

produção otimizada. O resultado desta monitoração se traduz na obtenção de vantagem competitiva em relação a concorrentes, produção otimizada e com segurança e o conseqüente aporte de recursos.

Os indicadores são sinais que chamam a atenção sobre determinados comportamentos de um sistema. Um exemplo seria a temperatura do corpo, que seria um indicador do estado de saúde do paciente (BOTTANI, 2005).

Também podemos definir indicador como um parâmetro que medirá a diferença entre a situação desejada e a situação real, indicando um problema, permitindo quantificar um processo (OLIVEIRA, 2005).

Um bom indicador alerta sobre um problema antes que ele se torne muito grave e os efeitos desse problema tornem-se irreversíveis. O indicador norteia o que precisa ser feito para resolver ou pelo menos minimizar os efeitos positivos e negativos dos indicadores.

Os indicadores podem ser estruturados em três níveis: operacionais, gerenciais e estratégicos (OLIVEIRA, 2005). Estes níveis são organizados de maneira hierárquica. indicadores gerenciais são utilizados pelas diversas gerências para a aferição de seu desempenho. Indicadores estratégicos são utilizados pela alta direção para a avaliação do desempenho da empresa como um todo e como sinalização de eventual necessidade de re-orientação dos rumos do gerenciamento.

Os indicadores de segurança seguem este mesmo conceito. Indicadores de segurança considerados críticos devem fornecer subsídios para a alta direção de organizações reguladoras e operadoras para a garantia da segurança operacional global da instalação. A monitoração de indicadores críticos de segurança nestas várias áreas pode contribuir para a obtenção de um alto grau de segurança durante a operação de instalações radiativas. Tais indicadores são baseados na contribuição para o risco.

Para cada indicador de segurança, são estabelecidos metas, limites e bases associadas de modo a permitir uma avaliação clara e abrangente. É efetuada uma avaliação integrada dos indicadores, utilizando sistemas especialistas para obter uma visão geral da segurança da instalação.

2.3 INSTALAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DA ANÁLISE

2.3.1 INTRODUÇÃO

A descrição a seguir, referente a um acelerador do tipo cíclotron de 30 MeV existente no Brasil, consta nesta seção porque foi a instalação selecionada para ser analisada no presente trabalho. Os critérios utilizados na escolha encontram-se no Capítulo 4 – Metodologia.

O acelerador tipo cíclotron de 30 MeV é uma máquina potencialmente perigosa para os operadores e usuários. Requer precauções especiais na área de segurança quanto a: radiação ionizante; alta tensão / sistema de radiofrequência; sistema de vácuo; fonte de íons e injeção axial; e componentes da linha de feixe.

O objetivo do sistema de segurança é evitar que o acelerador seja ligado antes que sejam evacuadas as áreas de riscos, e que o mesmo desligue automaticamente caso haja uma tentativa de se entrar em áreas proibidas enquanto a máquina estiver ligada.

Nas dependências do cíclotron existem quatro áreas que exigem segurança máxima:

- caverna do cíclotron de 30 MeV;
- sala de irradiação de alvos 1;
- sala de irradiação de alvos 2;
- acessos ao piso superior à cobertura.

Cada setor possui diferentes sistemas de monitoração onde o acelerador será desligado automaticamente caso haja alguma irregularidade detectada pelos sensores em qualquer uma delas.

Todas as etapas do procedimento para se armar o sistema de segurança, irregularidades e outras informações serão acompanhadas na sala de controle do acelerador através dos painéis indicadores, microcomputadores tipo PC e monitores de TV e de radiação.

2.3.2 PAINÉIS DE CONTROLE - CÍCLOTRON DE 30 MEV

O sistema de controle é constituído de um controlador lógico programável industrial (*PLC*) da Siemens Simatic S5.135V.

No controlador lógico programável industrial está incluído: *rack* principal; extensão do *rack*; e fonte de alimentação externa de 24 volts DC.

O *rack* principal e sua extensão têm capacidade para 21 placas de controle e um sistema de refrigeração. Possui uma fonte de alimentação interna com baterias.

O ciclotron de 30 MeV e o controle da linha de feixe de operação são programados através da linguagem *STEPS*, especialmente desenvolvida pela Siemens para aplicações industriais.

A interface homem-máquina é aplicada e desenvolvida através do programa e sistema *IN-TOUCHtm*, o qual é ligado a um microcomputador tipo PC através do programa *Windowstm*. O microcomputador e o controlador lógico programável industrial são conectados através de uma interface serial-*PC/PLC*.

Pela utilização da interface com o programa *Windowstm* resultam indicações tais como gráficos coloridos, mensagens, comandos e menus via monitor de vídeo do PC. O uso do programa de interface não age diretamente na máquina. Quando o operador seleciona o comando, requer um disparo (*trigger*) para o programa do controlador lógico programável industrial (*PLC*). Semelhantemente ao uso da interface, este mostrará os sinais processados e executados pelo controlador lógico programável.

A intensidade da corrente de feixe é monitorada em diferentes pontos e processada por uma unidade especial, e os sinais são enviados dos seus próprios indicadores para o controlador lógico programável industrial (*PLC*).

A mesa de controle consta de:

- monitor colorido junto com mouse e teclado;
- unidade de indicação de corrente de feixe com sinal digital e analógico multiplexado com canais de saída de leitura, indicações proporcionais e cálculos de soma;
- um par de codificadores para os parâmetros de sintonia do feixe.

O ciclotron de 30 MeV dispõe de dois tipos de intertravamento ligados ao painel de controle a fim de proteger toda a máquina e seus periféricos.

Os dois tipos são:

(1) Intertravamento do feixe, que visa a proteger as pessoas e prevenir algum prejuízo ou dano ao equipamento a ser habilitado ou desabilitado para a aceleração do feixe.

O sistema de segurança de intertravamento está interligado com este sistema de intertravamento do feixe do cíclotron de 30 MeV.

O sistema de intertravamento contempla as seguintes situações de segurança:

- parada de emergência (*stop authorized*);
- feixe autorizado (*beam authorized*);
- linha de feixe autorizada (*beam line authorized*).

Se qualquer falha ocorrer neste sistema, automaticamente será provocado um corte de alimentação da fonte de íons, serão desligadas as fontes de alta tensão (30 kV e 20 kV), a alimentação do infletor (*inflector*) e a injeção do copo de Faraday (*Faraday cup*) será fechada.

(2) O segundo sistema de intertravamento visa a proteger cada periférico e a sua operação adequada. Sua função é a de não permitir que a máquina seja ligada antes de haver uma verificação de todas as condições dos periféricos conectados à máquina. Este sistema faz ocorrer o desligamento automático da máquina se uma das condições do equipamento apresentar alguma falha. Todas as ocorrências e falhas de operação serão mostradas no monitor do painel de controle localizado na sala de controle do cíclotron de 30 MeV.

2.3.3 SISTEMA DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO - CÍCLOTRON DE 30 MEV

O Sistema de segurança e proteção é constituído de seis áreas de acessos restritos: caverna do cíclotron de 30 MeV; sala de irradiação de alvos 1; sala de irradiação de alvos 2; acessos às cavernas do cíclotron de 30 MeV e salas de irradiação de alvos 1 e 2; acessos ao piso superior (cobertura); sala de controle do acelerador cíclotron de 30 MeV.

2.3.3.1 CAVERNA DO CÍCLOTRON DE 30 MEV

Dentro dela há os seguintes dispositivos de segurança:

- duas botoeiras de emergência sinalizadas;
- duas botoeiras que habilitam o acionamento da máquina;
- um sensor de radiação do tipo Geiger-Müller;
- um alarme audível e um visível para quando a máquina estiver sendo habilitada para o seu acionamento;
- quatro chaves do tipo *microswitch* instaladas nas duas portas giratórias de concreto que dão acesso à caverna.

2.3.3.2 SALAS DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS 1 E 2

No interior de cada sala de alvos há os seguintes dispositivos de segurança:

- duas botoeiras de emergência sinalizadas;
- duas botoeiras que habilitam o acionamento da máquina;
- um alarme sonoro e um luminoso para quando a máquina estiver sendo habilitada para o seu acionamento;
- um sensor de radiação do tipo Geiger-Müller;
- duas chaves do tipo *microswitch* instaladas na porta giratória de concreto que dá acesso à sala.

2.3.3.3 ACESSOS ÀS CAVERNAS DO CÍCLOTRON DE 30 MEV E SALAS DE IRRADIAÇÃO DE ALVOS 1 E 2

Em tais acessos existem os seguintes dispositivos de segurança:

- dois portões de aço que dão acesso às portas giratórias (um portão para cada porta). As entradas por esses portões são protegidas por duas chaves do tipo *microswitch* e também por duas fotocélulas do tipo *scanner*. Assim, cada portão possui um *microswitch* e uma fotocélula;
- dois sensores de radiação para nêutrons, um em cada entrada.

2.3.3.4 ACESSO AO PISO SUPERIOR (COBERTURA)

Em tal acesso existem os seguintes sistemas de segurança:

- uma porta de aço com duas chaves do tipo *microswitch* conectadas a ela;
- três botoeiras de emergência sinalizadas;
- uma fotocélula do tipo *scanner*;
- um sensor de radiação do tipo Geiger-Müller na chaminé do prédio.

2.3.3.5 SALA DE CONTROLE DO CÍCLOTRON DE 30 MEV

Nesta sala existem os seguintes dispositivos de segurança:

- botoeiras de emergência;
- sensores de radiação gama e nêutrons.

Em tal sala encontra-se a central do sistema de segurança, constituída de um microcomputador tipo PC, monitores de radiação (indicando os níveis de radiação em todo o prédio), sistema do controlador lógico programável, alarmes e painel de segurança para habilitação do ciclotron de 30 MeV.

2.3.4 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE RADIAÇÃO - CÍCLOTRON DE 30 MEV

Tal sistema visa a garantir a segurança da instalação do ponto de vista radiológico, permitindo que se assegure que: (a) nos locais onde os operadores e pesquisadores têm acesso, os níveis de radiação estejam abaixo dos limites estabelecidos como aceitáveis pelas normas atuais; e (b) o ambiente da instalação não apresenta níveis de concentração de radioisótopos acima dos valores estabelecidos em normas.

O sistema é composto por monitores de radiação portáteis e fixos.

Os monitores portáteis são utilizados em levantamentos radiométricos rotineiros e sempre que solicitado por pesquisadores ou operadores, em geral por ocasião da manipulação de amostras radioativas.

Os instrumentos fixos se subdividem em monitores de área, monitor de ar e monitores de contaminação. Os monitores de área, junto com o monitor de ar, são utilizados para fornecer uma indicação contínua dos níveis de radiação na instalação.

2.3.4.1 MONITORES DE ÁREA

Os monitores de área são detectores do tipo Geiger-Müller, que, junto com um módulo eletrônico, permitem monitorar o nível de radiação em determinados pontos da instalação.

As unidades de leitura estão dispostas na sala de controle do ciclotron de 30 MeV, possibilitando o acesso direto às leituras dos níveis de radiação das várias áreas do prédio onde estão localizados os sensores. Cada unidade de leitura permite o ajuste de dois níveis de alarme, o primeiro considerado nível de alerta e o segundo considerado nível de perigo. Os detectores estão localizados em vários pontos:

- na sala de controle do ciclotron de 30 MeV;
- na entrada da sala de irradiação de alvos 1;
- na entrada da sala de irradiação de alvos 2;
- na chaminé do prédio;
- na caverna do ciclotron de 30 MeV .

Todos os níveis normais e os níveis de alarme são ajustados para cada monitor. Deve-se destacar que, uma vez atingido o nível de perigo nos monitores de nêutrons e de radiação gama, os mesmos causam o desligamento do ciclotron.

2.3.4.2 MONITOR DE AR

O monitor de ar possui detector do tipo cintilador NaI, e é utilizado para detectar a presença de contaminação radioativa no ar da instalações. Na instalação existe um detector que está localizado na chaminé. O monitor desse detector gera alarmes luminosos e sonoros, tanto localmente como na sala de controle do ciclotron. Os níveis de alarme estão ajustados para fornecer indicação de alerta em 1.500 cpm (contagens por minuto) e indicação de perigo em 5.000 cpm.

Quando o nível de radiação for ultrapassado, o acelerador ciclotron será desligado automaticamente, cessando assim a radiação emitida para os dutos de ar da chaminé.

2.3.4.3 MONITORES DE CONTAMINAÇÃO

Os monitores de contaminação são equipamentos colocados em posições estratégicas das instalações. Visam a detectar possíveis contaminações nos IOE, indicar os níveis de radiação nas áreas onde estão instalados, e fornecer informações sobre possíveis movimentações de materiais radioativos. Para tanto, existem quatro monitores de bancada, localizados nos corredores de acessos às cavernas, um monitor do tipo portal e um monitor do tipo pés e mãos, localizado na saída. Todos os monitores utilizam detectores do tipo Geiger-Müller.

2.4.3 SISTEMAS DE ALARME E INTERTRAVAMENTOS

Foi desenvolvido um sistema de segurança de alarmes e intertravamentos para o acelerador ciclotron de 30 MeV.

Este sistema é executado através do controlador lógico programável. A monitoração da sala de controle do acelerador é feita através de um computador e painel de sinalização.

Desenvolvido para segurança pessoal, o sistema de segurança de intertravamento não permitirá que o ciclotron produza feixe sem que antes haja uma verificação de todos os acessos à área de segurança, à caverna do acelerador ciclotron de 30 MeV e às salas de irradiação de alvos.

Este sistema de segurança visa ao mais alto grau de proteção para que não venha a ocorrer nenhum acidente pessoal. O sistema foi desenvolvido para uma verificação independente de todas as condições de segurança e somente após satisfeitas essas condições é que se torna possível a operação do acelerador ciclotron.

Caso alguém entre nas áreas controladas, no mínimo três dispositivos de segurança serão desabilitados e provocarão o desligamento automático do acelerador ciclotron, e também os alarmes sonoros e luminosos serão habilitados para tal situação.

O sistema de intertravamento não permitirá que os dispositivos de segurança (botoeiras de acionamento) sejam reativados antes que o procedimento pertinente seja executado.

O procedimento para acionar a máquina visa a obrigar o operador a verificar e pesquisar se a área perigosa/controlada está limpa, isto é, sem nenhum indivíduo, e também disparar os alarmes sonoros e luminosos.

O sistema de monitoração de radiação está integrado ao sistema de segurança:

- A sala de controle possui sensores de radiação com escalas de 10^{-4} a 10 mGy/h (100 keV a 2 MeV), e seus alarmes ajustados em 2 μ Gy/h. Quando o nível de radiação de 7,5 μ Gy/h for ultrapassado, o acelerador cíclotron será desligado automaticamente, disparando os alarmes sonoros e luminosos;
- Os corredores próximos ao acesso às cavernas do cíclotron de 30 MeV, alvos 1 e 2, possuem sensores de radiação para medição de nêutrons com escalas de 0,01 a 10 mSv/h (0 a 12 MeV) e seus alarmes ajustados em 25 μ Sv/h. Quando o nível de radiação de 250 μ Sv/h for ultrapassado, o acelerador cíclotron será desligado automaticamente, disparando os alarmes sonoros e luminosos;
- A chaminé possui sensores de radiação para controlar a emissão de gases para a atmosfera. Todas as vezes que o nível de radiação for ultrapassado em 20% da radiação de fundo natural (*background*), o acelerador cíclotron será desligado automaticamente, disparando os alarmes sonoros e luminosos;
- A caverna do acelerador cíclotron de 30 MeV e salas de irradiação de alvos 1 e 2 possuem sensores de radiação com escala de 0,1 mSv/h até 9,99 Sv/h (50 keV a 3 MeV), e seus alarmes ajustados em 1 mGy/h. Quando o nível de radiação ultrapassar o valor de 1 mGy/h, todas as portas das cavernas serão travadas com dispositivos elétricos e mecânicos.

Tais dispositivos visam a evitar a entrada de qualquer pessoa nas áreas de risco, enquanto os níveis de radiação estiverem acima dos valores permitidos. Esse sistema de segurança está interligado com o sistema de intertravamento do cíclotron de 30 MeV e sistema de segurança.

2.4 DESARMANDO VIOLAÇÕES

O procedimento de desarme das áreas controladas é:

- o acelerador cíclotron deverá estar desligado;
- retirar a chave do painel de controle e inseri-la no painel de segurança, virando-a para a posição *Safe*.

Se a área controlada for violada, isto é, se qualquer dispositivo de segurança for acionado (botoeiras de emergência, fotocélula, chaves tipo *microswitch* nas portas ou outros sensores), o cíclotron será desligado e acionará um alarme sonoro indicando a violação. O microcomputador indicará qual o dispositivo e o local onde ocorreu a violação.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

O Brasil possui aceleradores de pesquisa classificados nas categorias I e II, de acordo com a classificação internacional da publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992), ou nos grupos IX e X, segundo a norma nacional NE-6.02 (CNEN, 1998).

Os aceleradores de pesquisa estão distribuídos em 11 (onze) instituições, com um total de 15 (quinze) aceleradores, de acordo com o levantamento realizado no presente trabalho, descrito no item 3.1. Cabe ressaltar que não são realizadas, pela CNEN, inspeções regulatórias rotineiras nas instalações que utilizam aceleradores de pesquisa. As 11 (onze) instituições possuem finalidades próprias, características de cada uma delas. Por isso, torna-se necessária uma avaliação individual de cada instalação quanto às condições de proteção radiológica. Para tanto, foram realizadas visitas para verificação e preenchimento de lista de verificação para a avaliação das condições de segurança radiológica (IAEA, 1996^b). Tais visitas forneceram os dados estudados e analisados.

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS SOBRE OS ACELERADORES DE PESQUISA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, primeiramente foi realizado um levantamento estatístico das instituições que utilizam aceleradores de partículas no país, acessando-se o banco de dados da CNEN – Sistema Integrado de Informações em Instalações Radioativas (SINRAD) – onde se encontram listadas as instalações usuárias de fontes de radiação no Brasil.

Através da *internet*, houve o envio de um questionário eletrônico – indagando sobre a existência de aceleradores de pesquisa – para universidades federais, estaduais e católicas, e também foram consultados os sítios eletrônicos das universidades. O levantamento gerou uma lista onde se encontram discriminadas as instituições que possuem aceleradores, a quantidade de aceleradores por instalação, o tipo e algumas características do acelerador, bem como a classificação dos mesmos.

Através da coleta de dados realizada no primeiro contato com cada instalação, via *internet*, e também por visitas às instalações, foram avaliadas informações que

possibilitaram classificar as instalações segundo a norma NE-6.02 da CNEN (1998), e a publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992).

3.2 ESTUDO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA RADIOLÓGICAS NAS INSTALAÇÕES DE ACELERADORES

Durante as visitas realizadas nas instalações, foram coletados dados sobre os aceleradores de pesquisa em atividade, e observados os aspectos de proteção e segurança radiológica.

Quando das visitas, são preenchidas as listas de verificação adequadas (Anexo 1). Foram também realizados levantamentos radiométricos, os quais foram analisados tomando-se como referência a norma NN-3.01 da CNEN (2005). Os resultados assim obtidos fornecem os dados para a elaboração do presente trabalho.

3.3 ANÁLISE DE SEGURANÇA

Um dos objetivos específicos do presente trabalho é avaliar o risco dos sistemas de controle de acesso, do controle de radiação e controle de efluentes radioativos da sala de irradiação de um acelerador de partículas (cíclotron). O método de Análise de Camadas de Proteção – LOPA – foi escolhido para a análise de segurança, por ser uma ferramenta de engenharia utilizada para assegurar que o risco de um processo seja suficientemente mitigado a um nível aceitável.

A técnica LOPA foi escolhida por ser simples, conseguindo assim estimar o risco em prazo menor, porém com precisão aceitável. Apesar de tal técnica não ser indicada para aplicação em sistemas muito complexos, mostrou ser adequada para o nosso propósito, já que esses sistemas não são contemplados em Análises Probabilísticas de Segurança (APS). Além disso, o histórico de acidentes com aceleradores (IAEA, 1996^b) mostra que tal análise torna-se necessária.

A LOPA fornece critérios e restrições específicas para a avaliação das camadas de proteção independentes, eliminando a subjetividade de métodos qualitativos a um custo substancialmente menor, se comparado ao custo de técnicas quantitativas completas. Isso torna o método perfeitamente aplicável ao nosso propósito.

Entretanto, depara-se com um problema: devido ao fato de que a aplicação de técnicas de análise de segurança em aceleradores é inédita, não há dados na literatura sobre falhas que possam ocorrer em todos os componentes e sistemas de segurança. Tal problema foi resolvido com a aplicação parcial do método Delphi descrito por WRIGHT (2000) e por ASTIGARRAGA (2005). Tal consistiu na aplicação de questionários próprios e coleta dos dados necessários, contatando os indivíduos especialistas (engenheiros, supervisores de radioproteção, operadores e pesquisadores) no uso e manutenção dos aceleradores. Também foram obtidos dados sobre falhas dos sistemas e componentes na instalação escolhida para análise.

Dentre as 13 (treze) instalações visitadas, escolheu-se uma para realizar uma análise de segurança. A instalação escolhida foi um acelerador de pesquisa do tipo cíclotron – 30 MeV. O critério de escolha foi a instalação que apresentasse o maior número e maior complexidade de itens de segurança nela presentes (IAEA, 1996^b). Também, a instalação escolhida era a única que se encontrava em conformidade com as normas da CNEN e com as recomendações internacionais da IAEA.

É também objetivo específico deste trabalho estabelecer Indicadores de Segurança, para possibilitar a classificação de cada instalação quanto ao risco apresentado. Para tanto, utilizamos os dados gerados na LOPA e o conceito desenvolvido no trabalho de ARAÚJO (2006).

Não existe hoje no país um conjunto de indicadores críticos de segurança, aplicáveis às instalações de aceleradores, com as respectivas bases, intervalos para classificação e ações reguladoras associadas ao resultado da avaliação destes indicadores.

O objetivo da utilização de indicadores críticos de segurança é a manutenção de um alto grau de segurança operacional, de modo a aumentar a segurança do público, melhorar a eficiência, a eficácia e o realismo do processo de supervisão da segurança operacional, focando nas situações de maior significado de risco, e reduzir ou evitar esforços reguladores desnecessários.

Segundo PAREDES (2003), o desempenho da segurança na indústria é medido a partir de uma série de indicadores reativos (assim chamados porque representam o tempo de reação a eventos indesejados), como tempo perdido em decorrência de ferimentos, prejuízos e quase-acidentes (LTI - *lost time injury*).

Atualmente, há um consenso geral de que, ao se avaliar o desempenho da segurança dessa forma, não há uma indicação clara do progresso feito para evitar tais eventos indesejados. Como resultado, surge um desejo de se obter indicadores de desempenho em segurança, que sejam proativos e preventivos (ou seja, o oposto de reativa). Estes indicadores colocam em evidência as atividades em gestão da segurança, conseqüentemente reduzindo a ocorrência de eventos indesejados.

"Fazendo uma analogia, não se pode dirigir um veículo olhando somente pelo retrovisor. Os índices reativos representam um reflexo do que já aconteceu, enquanto que os pró-ativos vislumbram cenários que podem acontecer caso não sejam tomadas medidas adequadas" (PAREDES, 2003).

As seguintes características gerais são desejáveis para o estabelecimento de um sistema dos indicadores pró-ativos de desempenho em segurança:

- promover ações e coletar dados para aumentar as intervenções positivas na segurança ao invés de reações às falhas;
- estabelecer uma ligação clara entre as medidas dos indicadores e seus resultados, a fim de estabelecer metas e motivação para aumentar as intervenções positivas na segurança;
- metas desafiadoras, porém exequíveis;
- fomentar a produção de relatórios precisos e francos sobre as questões de segurança, em vez de apenas informar as ocorrências graves;
- não deve substituir nem conflitar com relatórios obrigatórios pelas regras e regulamentos, nem com indicadores reativos convencionais de desempenho de segurança.

Dentre os indicadores pró-ativos podem-se destacar:

- índice de frequência de observações de segurança;
- índice de relatórios de eventos com lesões;
- índice de visitas do nível gerencial;
- índice de lições aprendidas.

Durante a execução deste trabalho, verificou-se que a maior parte das instituições que possuem aceleradores de partículas para pesquisa têm como característica comum uma fraca incorporação de cultura de segurança à sua gestão,

atualmente até pouco reativa. A falta de uma abordagem preventiva de gestão quanto à segurança nestas instalações é preocupante.

Nesse contexto, a adoção dos indicadores reativos tradicionalmente utilizados pelas empresas é insuficiente, devendo ser completados pela adoção de indicadores pró-ativos (ARAÚJO, 2006). Para alcançar este objetivo, utilizaremos os dados gerados pela análise LOPA, as tabelas apresentadas no trabalho “O uso da análise de riscos como referência de gestão ambiental” (FELICIANO, 2005) e a norma britânica “*Brithish Standard 8800*” (Diretrizes para Sistemas de Gerenciamento de Segurança e Saúde Ocupacional).

1º Passo:

Classificar o evento quanto à probabilidade de ocorrência, em que utilizamos o resultado da análise LOPA e a Tabela 3.1 (FELICIANO, 2008).

TABELA 3.1: CLASSE DE PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS DANOSOS (PO).

CLASSE	DENOMINAÇÃO	PO / ANO	DESCRIÇÃO
A	Extremamente Remota	$PO < 10^{-4}$	Teoricamente possível, mas de ocorrência improvável ao longo da vida útil da instalação
B	Remota	$10^{-4} < PO < 10^{-3}$	Ocorrência não esperada ao longo da vida útil da instalação
C	Improvável	$10^{-3} < PO < 10^{-2}$	Baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da instalação
D	Provável	$10^{-2} < PO < 10^{-1}$	Ocorrência provável uma ou outra vez ao longo da vida útil da instalação
E	Frequente	$10^{-1} < PO < 10^0$	Ocorrência esperada uma ou outra vez a cada 10 anos
F	Muito frequente	$10^0 < PO$	Ocorrência esperada uma ou outra vez em cada ano
G	Rotineira	$10^0 < < PO$	Ocorrência esperada uma ou outra vez em cada mês

2º Passo

Determinar a amplitude da consequência. Para tal, estudamos o cenário da LOPA e consultamos a Tabela 3.2 (FELICIANO, 2008).

TABELA 3.2: CLASSE DE SEVERIDADE DE EVENTOS DANOSOS.

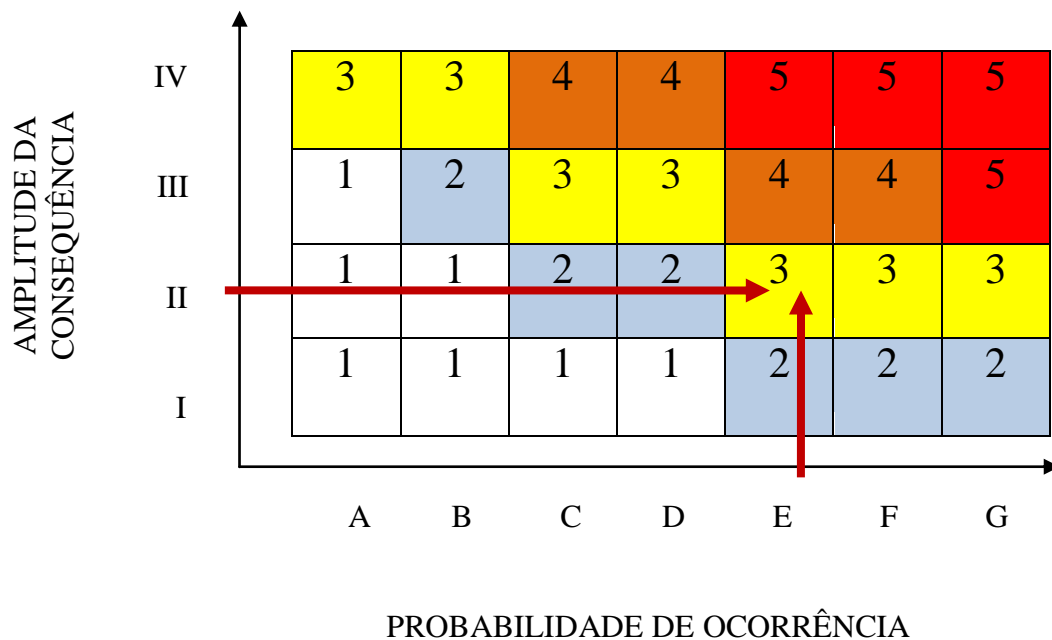
CLASSE	CARACTERÍSTICAS
I – DESPREZÍVEL	<p>Não provoca lesões e nem danos à saúde em funcionários e terceiros. Não provoca nenhum impacto ambiental ao meio ambiente. Não provoca danos ou provoca danos de pequena monta aos equipamentos, materiais e instalações. Não provoca parada de produção ou provoca atrasos insignificantes. Não provoca nenhuma alteração na qualidade do produto. Pode provocar insignificante repercussão entre os funcionários e terceiros dentro da propriedade e nenhuma na comunidade.</p>
II – MARGINAL	<p>Provoca lesões leves ou perturbações leves à saúde de funcionários ou terceiros quando dentro da propriedade. Nenhum dano à comunidade. Provoca impacto leve e reversível ao meio ambiente, dentro da propriedade. Provoca danos de pequena monta aos equipamentos, materiais e instalações. Provoca parada de produção de curta duração. Provoca pequena alteração na qualidade do produto, sem danos maiores. Pode provocar uma repercussão significativa entre funcionários/terceiros dentro da propriedade e repercussão pouco significativa na comunidade.</p>
III – CRÍTICA	<p>Provoca lesões e danos à saúde com certa gravidade em funcionários ou terceiros quando dentro da propriedade, e lesões ou danos à saúde de gravidade leve em membros da comunidade. Uma ou outra morte ou lesão incapacitante pode ocorrer em pessoas dentro da propriedade. Provoca danos severos ao meio ambiente interno à propriedade e danos de gravidade leve fora da propriedade, às vezes irreversíveis. Provoca danos de grande monta aos equipamentos, materiais e instalações da propriedade, e danos de razoável monta na comunidade. Provoca parada de produção de longa duração. Provoca grandes alterações na qualidade do produto. Pode provocar repercussão de grande monta entre os funcionários e terceiros dentro da propriedade e repercussão significativa na comunidade.</p>
IV – CATASTRÓFICA	<p>Podem provocar mortes, lesões graves, danos irreversíveis à saúde de funcionários, terceiros e membros da comunidade em geral. Podem provocar danos de grande monta e irreversíveis ao meio ambiente interno ou externo à propriedade. Podem provocar destruição total de equipamentos, materiais e instalações, interna ou externamente à propriedade. Pode provocar parada permanente de produção com destruição da planta ou parte significativa dela. Provoca graves alterações na qualidade do produto, com grande repercussão na opinião pública. Ações indenizatórias coletivas podem ocorrer. Pode provocar repercussão de grande monta e duradoura entre os funcionários e terceiros dentro da propriedade e repercussão de grande monta com razoável duração na comunidade.</p>

3º Passo

Determinação do nível de risco: conhecidas a probabilidade de ocorrência (PO) e a amplitude da consequência (AC) de um determinado desvio, pode-se estimar o nível de risco desse evento danoso.

Na Tabela 3.3 (FELICIANO, 2008) as setas exemplificam um caso com $PO \rightarrow E$, e $AC \rightarrow II$, determinando um Nível de Risco $\rightarrow 3$

TABELA 3.3: MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO.



4º Passo

Determinação do indicador de risco: conhecendo-se o nível de risco, pode-se estimar se o mesmo é aceitável ou não de acordo com um critério previamente estabelecido. A Tabela 3.4 representa o critério de aceitabilidade do risco que está sendo adotado para este trabalho.

TABELA 3.4: INDICADORES DE RISCO.

IR	DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO
1	DESPREZÍVEL	Aceitável
2	TOLERÁVEL	Aceitável, sujeito à melhoria
3	MODERADO	Aceitável, esporadicamente
4	CRÍTICO/SÉRIO	Inaceitável
5	CATASTRÓFICO	Absolutamente inaceitável

5º Passo

Plano para controle com base no risco: sabendo-se se o nível de risco é aceitável ou não, adota-se um plano para controle. A Tabela 3.5 (*British Standard 8800: 1996*) apresenta um plano simples de controle.

TABELA 3.5: UM PLANO SIMPLES DE CONTROLE COM BASE NO RISCO.

INDICADOR DE RISCO	AÇÃO E CRONOGRAMA
DESPREZÍVEL	Nenhuma ação é requerida e nenhum registro documental precisa ser mantido
TOLERÁVEL*	Nenhum controle adicional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais econômica ou a aperfeiçoamento que não imponham custos extras. A monitoração é necessária para assegurar que os controles são mantidos.
MODERADO	Devem ser feitos esforços para reduzir o risco, mas os custos de prevenção devem ser cuidadosamente medidos e limitados. As medidas de redução de risco devem ser implantadas dentro de um período de tempo definido. Quando o risco moderado é associado a conseqüências extremamente prejudiciais, uma avaliação ulterior pode ser necessária, a fim de estabelecer, mais precisamente, a probabilidade de dano, como uma base para determinar a necessidade de medidas de controle aperfeiçoadas.
CRÍTICO/SÉRIO	O trabalho não deve ser iniciado até que o risco tenha sido reduzido. Recursos consideráveis poderão ter de ser alocados para reduzir o risco. Quando o risco envolver trabalho em execução, ação urgente deve ser tomada.
CATASTRÓFICO	O trabalho não deve ser iniciado nem continuar até que o risco tenha sido reduzido. Se não for possível reduzir o risco, nem com recursos ilimitados, o trabalho tem de permanecer proibido.

* Nota: Tolerável, aqui, significa que o risco foi reduzido ao mais baixo nível que seja razoavelmente praticável.

Dentre as 13 instalações, escolheu-se uma para exemplificar a criação de indicadores críticos. A instalação escolhida foi um acelerador de pesquisa do tipo ciclotron – 30 MeV. O critério de escolha foi a instalação que apresentasse falhas de segurança facilmente identificáveis com deficiência de itens de segurança nela presentes (IAEA, 1996^b), e também apresentando não conformidades com as normas da CNEN e com as recomendações internacionais da IAEA.

3.4 RESTRIÇÃO DE DOSES

Avaliando os resultados obtidos com a aplicação da lista de verificação e os registros de dose dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) – fornecidos pelos laboratórios certificados – propor-se-á, quando necessário, que o titular da instalação promova a realização de uma análise de segurança, idêntica ou similar à desenvolvida neste trabalho, e realize as ações corretivas necessárias.

3.5 COMPARAÇÃO DAS INSTALAÇÕES

Foi aplicada a lista de verificação a algumas instalações de um país da Comunidade Européia, e os resultados foram comparados com os das instalações nacionais, para avaliar as diferenças das condições de proteção e segurança radiológicas.

Com tal procedimento foram levantadas as não conformidades das instalações de um país do primeiro mundo e também as não conformidades das instalações nacionais. Assim, avaliamos a situação da nossa segurança radiológica em relação à do país desenvolvido, e também a situação em relação às recomendações da IAEA (1996^b).

3.6 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS INSTALAÇÕES

Com a aplicação das listas de verificação e constatação da efetividade dos resultados obtidos, recomendar-se-á o procedimento adotado no presente trabalho para a avaliação rotineira das instalações com aceleradores de partículas para uso em pesquisa. Deste modo, será sugerido à CNEN que adote a metodologia proposta, nas inspeções reguladoras de conformidade, caso estas passem a ocorrer.

Tal metodologia de avaliação deverá ser de conhecimento dos titulares das instalações e prevista em norma experimental a ser aprovada pela CNEN.

3.7 REQUISITOS PARA A NORMA EXPERIMENTAL

Com base nos dados, experiência e conhecimento obtidos durante este trabalho – e também observando-se o modelo de normas da CNEN – são apresentados os requisitos de norma, que serão sugeridos à CNEN, para a criação de norma destinada a nortear os titulares responsáveis e os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) das instalações.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1 LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO

Através do levantamento aqui mencionado, constatou-se que onze instituições possuem aceleradores de partículas em suas instalações. Os equipamentos são de diversos fabricantes, diferentes feixes e energias de feixe, alguns com bastante tempo de uso e com finalidades distintas. Estas instalações encontram-se descritas no Anexo 3.

4.2 AVALIAÇÃO

Foram avaliadas as condições de radioproteção e segurança radiológica de nove instituições visitadas. Delas, apenas uma cumpre de forma razoável as normas da CNEN. As restantes não possuem a maioria dos equipamentos de segurança e nem Serviço de Radioproteção licenciado. Nas visitas realizadas às instalações foram aplicadas listas de verificação e realizados levantamentos radiométricos.

4.3 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SEGURANÇA – LOPA

Uma instalação de acelerador do tipo ciclotron de 30 MeV foi escolhida para aplicação da LOPA por ser aquela que melhor respeita as normas da CNEN e as recomendações da IAEA de segurança radiológica.

- **Passos 1 e 2:** Identificar cenários, eventos indicadores, eventos iniciadores e conseqüências.

O levantamento de cenários, a aplicação da LOPA e os resultados para cada cenário são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: CENÁRIOS PARA APLICAÇÃO DA LOPA EM UM ACELERADOR CÍCLOTRON.

Cenário	Evento indicador	Evento iniciador
1	Abertura da porta da caverna do cíclotron durante a irradiação	Falha no sistema de controle de acesso
2	Abertura das portas das salas de alvos durante a irradiação	Falha no sistema de controle de acesso
3	Contaminação radioativa no ar da instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão
4	Contaminação do local da sala de alvos	Falha no sistema de monitoração de radiação
5	Desligamento incompleto do acelerador	Falha no sistema de segurança de intertravamento
6	Presença não detectada de pessoas na caverna do cíclotron	Falha ao armar sistema de segurança de intertravamento
7	Ocorrência de fenômenos naturais, incêndios ou explosões	Falha no procedimento de levantamento radiométrico

Cenário	Evento iniciador	Consequência
1	Falha no sistema de controle de acesso	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna
2	Falha no sistema de controle de acesso	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da caverna
3	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão	Contaminação de pessoas por inalação
4	Falha no sistema de monitoração de radiação	Contaminação de IOEs por contato
5	Falha no sistema de segurança de intertravamento	Exposição de IOEs a altas taxas de irradiação no interior da caverna e/ou sala de alvos
6	Falha ao armar sistema de segurança de intertravamento	Exposição de IOEs a altas taxas de irradiação no interior da sala de alvos
7	Falha no procedimento de levantamento radiométrico	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da instalação

- **Passo 3:** Identificar evento iniciador e determinar frequência do evento iniciador.

Os dados para a frequência do evento iniciador foram calculados com base nos dados dos Questionários Delphi, do histórico da instalação e estimados considerando o histórico de acidentes.

A Tabela 4.2 indica a frequência de falha para cada evento iniciador.

TABELA 4.2: TABELA DE FREQUÊNCIAS PARA CADA EVENTO INICIADOR.

Cenário	Evento iniciador	Frequência
1	Falha no sistema de controle de acesso	0,07
2	Falha no sistema de controle de acesso	0,07
3	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão	0,2
4	Falha no sistema de monitoração de radiação	0,2
5	Falha no sistema de segurança de intertravamento	0,01
6	Falha ao armar sistema de segurança de intertravamento	0,01
7	Falha no procedimento de levantamento radiométrico	0,1

- **Passo 4:** Identificar as IPL's e estimar a probabilidade de falha na demanda para cada IPL.

A Tabela 4.3 fornece as camadas de proteção independentes para cada cenário e suas respectivas probabilidades de falha na demanda. Os valores das PFD foram retirados de CCPS, 2001; IEC, 1998 e IEC, 2001.

TABELA 4.3: CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES E SUAS RESPECTIVAS PROBABILIDADES DE FALHA NA DEMANDA PARA CADA CENÁRIO.

Cenário	IPL's	PFD
1	Chave microswitch	0,07
	Foto célula	0,1
	Ação do operador	0,1
2	Chave microswitch	0,07
	Foto célula	0,1
	Ação do operador	0,1
3	Detetor Geiger Muller	0,2
	Ação do supervisor de radioproteção	0,1
4	Detetor Geiger Muller	0,2
	Detetor de neutrons	0,2
5	Chave microswitch	0,07
	Foto célula	0,1
	Ação do operador	0,1
6	Chave microswitch	0,07
	Ação do operador	0,1
7	Ação do supervisor de radioproteção	0,1
	Monitor portátil de radiação	0,2

- **Passo 5:** Estimar o risco dos cenários.

Nesta etapa, deve-se calcular o risco dos cenários utilizando a Equação (2-1) para determinar a frequência dos cenários, supondo que todas as proteções falhem. Os resultados para cada um dos cenários encontram-se abaixo.

- **Passo 6:** Avaliar o risco para tomar uma decisão relativa ao cenário.

Para avaliar o risco dos cenários deve-se utilizar a Tabela 2.2, adaptada para o caso em questão, já que não há nenhum parâmetro publicado. Tal Tabela indica se o risco calculado para os cenários necessita de mais alguma proteção.

4.4 CENÁRIO 1

O cenário 1 é a abertura errada da porta da caverna do cíclotron, causada por falha no sistema de controle de acesso. Uma falha nesse sistema causará a exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna. Pela importância do sistema, ele é intertravado, acionando automaticamente o desligamento total do acelerador.

A frequência da consequência mitigada calculada indica que é opcional adicionar camadas de proteção, e que devem ser avaliadas alternativas. Porém, como esse sistema é muito importante, adicionar-se um tapete capacitivo seria uma IPL redundante, diversa e independente à existente, que tornaria o risco totalmente aceitável. A Tabela 4.4 mostra o resultado para o Cenário 1.

4.5 CENÁRIO 2

O cenário 2 é a 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. Pela importância do sistema, ele é intertravado, acionando automaticamente o desligamento total do acelerador.

Este cenário possui sistema de controle de acesso idêntico ao cenário anterior e, portanto, os cálculos serão também idênticos, sendo desnecessário repeti-los, pois terá a mesma frequência de consequência mitigada e idêntica recomendação.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar camadas de proteção, e que alternativas devem ser avaliadas. Como esse sistema é muito importante, uma sugestão seria adicionar um tapete capacitivo. A Tabela 4.4, aplicável ao cenário 1, seria repetida para o cenário 2.

TABELA 4.4: RESUMO DO CENÁRIO 1.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
1	Porta de acesso da caverna	Falha no sistema de controle de acesso	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna. Categoria 5.		
Evento iniciador	Falha no sistema de controle de acesso		7×10^{-2}
Frequência da consequência não mitigada			7×10^{-2}
Camadas de Proteção Independentes			
Chave <i>microswitch</i>		$7,5 \times 10^{-2}$	
Ação do operador		1×10^{-1}	
Foto-célula		1×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		$7,5 \times 10^{-4}$	
Frequência da consequência mitigada			$5,25 \times 10^{-5}$
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco: Ação opcional, possível colocação de tapete capacitivo.			
Observações:			

4.6 CENÁRIO 3

O cenário 3 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 a proteger membros 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, o que seria danoso aos indivíduos.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar camadas de proteção, e que alternativas devem ser avaliadas. Como esse sistema é muito importante, uma sugestão seria adicionar monitores fixos de área, redundantes ao monitor de ar existente. A Tabela 4.5 mostra o resultado para o cenário 3.

TABELA 4.5: RESUMO DO CENÁRIO 3.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
3	Atmosfera externa à instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Contaminação interna de pessoas por inalação. Categoria 5.		
Evento iniciador	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão		2×10^{-1}
Frequência da consequência não mitigada			2×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Detector Geiger-Müller		2×10^{-2}	
Ação do supervisor de radioproteção		1×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		2×10^{-3}	
Frequência da consequência mitigada			4×10^{-4}
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco: Ação opcional, possível colocação de monitores fixos de área.			
Observações:			

4.7 CENÁRIO 4

O cenário 4 é a contaminação do local da sala de alvos, e falha no sistema de monitoração de radiação. Este sistema visa a proteger indivíduos ocupacionalmente expostos de uma possível contaminação externa por contato.

O resultado da LOPA informa que é opcional adicionar outra camada de proteção. Para atender aos critérios de tolerância de risco para este cenário, a sugestão é adotar o uso de monitores individuais com alarme. A Tabela 4.6 mostra o resultado para o cenário 4.

TABELA 4.6: RESUMO DO CENÁRIO 4.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
4	Sala de alvos	Falha no sistema de monitoração de radiação	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Contaminação de IOEs por contato Categoria 3		
Evento iniciador	Falha no sistema de monitoração de radiação		2×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			2×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Detector Geiger-Müller		2×10^{-1}	
Detector de nêutrons		2×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		4×10^{-2}	
Frequência da consequência mitigada			8×10^{-3}
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avalie alternativas)			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco: Ação opcional, possível uso de monitores individuais com alarme.			
Observações:			

4.8 CENÁRIO 5

O cenário 5 é o desligamento incompleto do acelerador, e falha no sistema de segurança de intertravamento. Esta falha pode conduzir à exposição de IOEs a altas taxas de irradiação no interior da caverna e/ou sala de alvos, o que é considerado um acidente gravíssimo.

O resultado da LOPA indica que não é necessária nenhuma ação adicional, demonstrando que as IPL são suficientes. A Tabela 4.7 mostra o resultado para o cenário 5.

TABELA 4.7: RESUMO DO CENÁRIO 5.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
5	Caverna e sala de alvos	Desligamento incompleto do acelerador	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de IOEs a altas taxas de irradiação. Categoria 5.		
Evento iniciador	Falha no sistema de segurança de intertravamento		1×10^{-2}
Frequência da consequência não mitigada			1×10^{-2}
Camadas de Proteção Independentes			
Chave <i>microswitch</i>		$7,5 \times 10^{-2}$	
Ação do operador		1×10^{-1}	
Foto-célula		1×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		$7,5 \times 10^{-4}$	
Frequência da consequência mitigada			$7,5 \times 10^{-6}$
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Nenhuma ação adicional			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco:			
Observações:			

4.9 CENÁRIO 6

O cenário 6 é a falha ao armar o sistema de segurança de intertravamento, que pode ter como consequência a exposição de IOEs 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.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar uma camada de proteção independente. Portanto, o que pode ser feito para atender aos critérios de tolerância de risco é a instalação de sensor de presença no interior da sala de alvos, fazendo com que diminua a taxa de falha desse sistema. A Tabela 4.8 mostra o resultado para o cenário 6.

TABELA 4.8: RESUMO DO CENÁRIO 6.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
6	Sistema de segurança de intertravamento	Falha do sistema de segurança de intertravamento	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de IOEs a altas taxas de irradiação no interior da sala de alvos. Categoria 5.		
Evento iniciador	Falha ao armar sistema de intertravamento		1×10^{-2}
Frequência da consequência não mitigada			1×10^{-2}
Camadas de Proteção Independentes			
Chave <i>microswitch</i>		7×10^{-2}	
Ação do operador		1×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		7×10^{-3}	
Frequência da consequência mitigada			7×10^{-5}
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avale alternativas)			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco: Instalação de sensor de presença no interior da sala de alvos			
Observações:			

4.10 CENÁRIO 7

O cenário 7 é provocado pela ocorrência de fenômenos naturais, incêndios ou explosões. Isso 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 tal consequência.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar uma camada de proteção independente. Portanto, o que pode ser feito para atender aos critérios de tolerância de risco é a instalação de monitores de área fixos, fazendo com que diminua a taxa de falha desse sistema. A Tabela 4.9 mostra o resultado para o cenário 7.

TABELA 4.9: RESUMO DO CENÁRIO 7.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
7	Exterior da instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da instalação. Categoria 3.		
Evento iniciador	Falha no procedimento de levantamento radiométrico		1×10^{-1}
Frequência da consequência não mitigada			1×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Monitor portátil de radiação		2×10^{-1}	
Ação do supervisor de radioproteção		1×10^{-1}	
Probabilidade total de falha na demanda para todas as IPL		2×10^{-2}	
Frequência da consequência mitigada			2×10^{-3}
Critério de tolerância de risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avale alternativas)			
Ações necessárias para atender o critério de tolerância de risco: Instalação de monitores de área fixos			
Observações:			

4.11 GERAÇÃO DE INDICADORES DE RISCO

Para uma melhor visualização da importância do uso de indicadores pró-ativos, será aqui analisada uma instalação de acelerador tipo ciclotron de 30 MeV, similar à analisada utilizando a LOPA. Esta foi escolhida por não observar integralmente as normas da CNEN e as recomendações da IAEA de segurança radiológica. Portanto, esperam-se indicadores preocupantes.

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

Para gerar os indicadores de risco para a instalação em estudo, seguiremos os seguintes passos:

- Passo 1: Classificar o evento quanto à probabilidade de ocorrência. Para tanto, utilizamos o resultado da análise LOPA e a Tabela 3.1;
- Passo 2: Determinar a classe de amplitude da consequência. Os dados de classe de amplitude da consequência encontram-se na Tabela 3.2;
- Passo 3: Determinar o nível de risco. Para isso utilizaremos os valores da probabilidade de ocorrência e da amplitude da consequência na Tabela 3.3;
- Passo 4: Determinar o indicador de risco. Conhecido o nível de risco, determina-se o indicador de risco na Tabela 3.4;
- Passo 5: Definição da ação a ser tomada. Esta encontra-se na Tabela 3.5.

4.12 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO PARA CADA CENÁRIO

4.12.1 CENÁRIO 1

O cenário 1 é a abertura errada da porta da caverna do acelerador, provocada por falha no sistema de controle de acesso. Uma falha nesse sistema causará a exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna. Pela importância do sistema, ele é intertravado, acionando automaticamente o desligamento total do acelerador. O acelerador em análise não possui sistema de intertravamento, ficando toda a segurança dependente da ação do operador.

O resultado da LOPA indica que é necessário adicionar camadas de proteção. A Tabela 4.10 mostra o resultado para o cenário 1.

TABELA 4.10: RESUMO DO CENÁRIO 1.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
1	Porta de acesso da caverna	Falha no sistema de controle de acesso	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no interior da caverna Categoria 5		
Evento Iniciador	Falha no sistema de controle de acesso		7×10^{-2}
Frequência da Consequência não mitigada			7×10^{-2}
Camadas de Proteção Independentes			
Ação do operador		1×10^{-1}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas as IPL		1×10^{-1}	
Frequência da Consequência Mitigada			7×10^{-2}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Ação necessária, instalação de 2 ou mais sistemas de intertravamento.			
Observações:			

Frequência da consequência mitigada: 7×10^{-2}

Geração do indicador de risco para o cenário 1:

Classe de probabilidade de ocorrência: D (Provável)

Classe da amplitude da consequência: III (Crítica)

Determinação do nível de risco: 4

Determinação do indicador de risco: (Tab. 3.4)

3 → MODERADO → Aceitável, esporadicamente

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

MODERADO : Devem ser feitos esforços para reduzir o risco, mas os custos de prevenção devem ser cuidadosamente medidos e limitados. As medidas de redução de risco devem ser implantadas dentro de um período de tempo definido.

Quando o risco moderado é associado a consequências extremamente prejudiciais, uma avaliação ulterior pode ser necessária, a fim de estabelecer, mais precisamente, a probabilidade de dano, como uma base para determinar a necessidade de medidas de controle aperfeiçoadas.

4.12.2 CENÁRIO 2

O cenário 2 é a 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. Pela importância do sistema, ele é intertravado, acionando automaticamente o desligamento total do acelerador. O acelerador em análise não possui sistema de intertravamento, ficando toda a segurança dependente da ação do operador. É, portanto, desnecessário repetir os cálculos, pois terá a mesma frequência de consequência do cenário 1.

Frequência da consequência mitigada: 7×10^{-2}

Geração do indicador de risco para o cenário 2:

Classe de probabilidade de ocorrência: D (Provável)

Classe da amplitude da consequência: IV (Catastrófica)

Determinação do nível de risco: 5

Determinação do Indicador de Risco: (Tab. 3.4)

4 → CRÍTICO/SÉRIO → Não aceitável

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

CRÍTICO/SÉRIO: O trabalho não deve ser iniciado até que o risco tenha sido reduzido.

Recursos consideráveis poderão ter de ser alocados para reduzir o risco. Quando o risco envolver trabalho em execução, ação urgente deve ser tomada.

4.12.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 é a falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão, com contaminação de pessoas por inalação. Este sistema é muito importante porque visa a 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. O acelerador em análise não possui sistema de monitoração de radiação na exaustão, ficando esta monitoração ao encargo do operador, que deverá realizá-la sempre que o acelerador estiver operando.

TABELA 4.11: RESUMO DO CENÁRIO 3.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
3	Atmosfera externa à instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Contaminação interna de pessoas por inalação. Categoria 5		
Evento Iniciador	Falha no sistema de monitoração de radiação na exaustão		
Frequência da Consequência não mitigada			2×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Ação do supervisor de radioproteção		1×10^{-1}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's		1×10^{-1}	
Frequência da Consequência Mitigada			2×10^{-2}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Ação: colocação monitores fixos de área.			
Observações:			

Frequência da consequência mitigada: 2×10^{-2}

Geração do indicador de risco para o cenário 3:

Classe de probabilidade de ocorrência: D (Provável)

Classe da amplitude da consequência: III (Crítica)

Determinação do nível de risco: 3

Determinação do indicador de risco: (Tab. 3.4)

3 → MODERADO → Aceitável, esporadicamente

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

MODERADO: Devem ser feitos esforços para reduzir o risco, mas os custos de prevenção devem ser cuidadosamente medidos e limitados. As medidas de redução de risco devem ser implantadas dentro de um período de tempo definido. Quando o risco

moderado é associado a conseqüências extremamente prejudiciais, uma avaliação ulterior pode ser necessária, a fim de estabelecer, mais precisamente, a probabilidade de dano, como uma base para determinar a necessidade de medidas de controle aperfeiçoadas.

4.12.4 CENÁRIO 4

O cenário 4 é a contaminação do local da sala de alvos, e falha no sistema de monitoração de radiação. Este sistema visa a proteger indivíduos ocupacionalmente expostos de uma possível contaminação externa por contato. O acelerador em análise possui apenas sistema de detectores Geiger-Müller para altas doses, sendo ineficaz para a função desejada.

TABELA 4.12: RESUMO DO CENÁRIO 4.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
4	Sala de alvos	Falha no sistema de monitoração de radiação	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Contaminação de IOEs por contato Categoria 3		
Evento Iniciador	Falha no sistema de monitoração de radiação		2×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			2×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Detetor Geiger Muller		2×10^{-1}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas as IPL		2×10^{-1}	
Frequência da Consequência Mitigada			4×10^{-2}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:			
Observações:			

Frequência da consequência mitigada: 4×10^{-2}

Geração do indicador de risco para o cenário 3:

Classe de probabilidade de ocorrência: D (Provável)

Classe da amplitude da consequência: II (Marginal)

Determinação do nível de risco: 5

Determinação do indicador de risco: (Tab. 3.4)

2 → TOLERÁVEL → Aceitável, sujeito à melhoria

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

TOLERÁVEL: Nenhum controle adicional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais econômica ou o aperfeiçoamento que não imponham custos extras. A monitoração é necessária para assegurar que os controles são mantidos.

4.12.5 CENÁRIO 5

O cenário 5 é o desligamento incompleto do acelerador, e falha no sistema de segurança de intertravamento. Esta falha pode conduzir à exposição de IOEs a altas taxas de irradiação no interior da caverna e/ou sala de alvos, o que é um acidente gravíssimo. O desligamento incompleto do acelerador pode, em algumas instalações, não ter indicação alguma no painel de controle do acelerador, impedindo assim qualquer ação do operador.

TABELA 4.13: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 5.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
5	Caverna e sala de alvos	Desligamento incompleto do acelerador	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de IOEs a altas taxas de irradiação Categoria 5		
Evento Iniciador	Falha no sistema de desligamento		
Frequência da Consequência não mitigada			1×10^{-2}
Camadas de Proteção Independentes			
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas as IPL			
Frequência da Consequência Mitigada			1×10^{-2}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Nenhuma ação adicional			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:			
Observações:			

Frequência da consequência mitigada: 1×10^{-2}

Geração do indicador de risco para o cenário 5:

Classe de probabilidade de ocorrência: E (Frequente)

Classe da amplitude da consequência: IV (Catastrófica)

Determinação do nível de risco: 5

Determinação do indicador de risco: (Tab. 3.4)

5 → CATASTRÓFICO → Absolutamente, não aceitável

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

CATASTRÓFICO: O trabalho não deve ser iniciado nem continuar até que o risco tenha sido reduzido. Se não for possível reduzir o risco, nem com recursos ilimitados, o trabalho tem de permanecer proibido.

4.12.6 CENÁRIO 6

O cenário 6 é provocado pela ocorrência de fenômenos naturais, incêndios ou explosões. Isso 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.

TABELA 4.14: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 6.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
7	Exterior da instalação	Falha no sistema de monitoração de radiação	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição de pessoas a altas taxas de irradiação no exterior da instalação Categoria 3		
Evento Iniciador	Falha no procedimento de levantamento radiométrico		1×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			1×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Monitor portátil de radiação		2×10^{-1}	
Ação do supervisor de radioproteção		1×10^{-1}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas as IPL		2×10^{-2}	
Frequência da Consequência Mitigada			2×10^{-3}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativas)			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Instalação de monitores de área fixos			
Observações:			

Frequência da consequência mitigada: 2×10^{-3}

Geração do indicador de risco para o cenário 6:

Classe de probabilidade de ocorrência: C (Improvável)

Classe da amplitude da consequência: II (Marginal)

Determinação do nível de risco: 5

Determinação do indicador de risco: (Tab. 3.4)

2 → TOLERÁVEL → Aceitável, sujeito à melhoria

Ação a ser tomada: (Tab. 3.5)

TOLERÁVEL: Nenhum controle adicional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais econômica ou a aperfeiçoamento que não imponham custos extras. A monitoração é necessária para assegurar que os controles são mantidos.

4.13 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA LISTA DE VERIFICAÇÃO

A lista de verificação para a avaliação das condições de segurança radiológica (IAEA, 1996^b) foi aplicada a todas as instalações visitadas, apresentando os resultados exibidos na Tabela 4.15.

TABELA 4.15: RESUMO DA APLICAÇÃO DA LISTA DE CHEQUE .

ITEM	Nº de Instalações		
	SIM	NÃO	Não aplicado
Especialista qualificado	3	10	-
Titular da instalação	13	-	-
Projeto inicial e modificações aprovadas pela CNEN	5	8	-
Sistemas de controle da segurança aprovados pela CNEN	6	7	-
Sistemas de intertravamento	3	8	2
Botões de emergência	3	8	2
Monitor de radiação fixo no interior da sala de irradiação	3	8	2
Controle de acesso à sala de irradiação com intertravamento	3	10	-
Meios de fuga ou comunicação dentro da sala de irradiação	3	8	2
Sistemas de alarme e sinalização de advertência	9	4	-
Serviço de radioproteção certificado e autorizado	5	8	-
Treinamento adequado em radioproteção dos IOEs	5	8	-
Registro de acidentes ou incidentes	-	13	-
Classificação e sinalização de áreas	5	8	-
Regulamentos e procedimentos em português	11	2	-
Dosímetros pessoais fornecidos por laboratório credenciado	8	5	-
Exposições pessoais dentro dos limites	8	-	5
Monitores de área fixos	3	8	2
Levantamento radiométrico	5	8	-
Controle de visitantes	11	2	-
Controle de áreas	5	8	-
Plano de emergência revisado e atualizado	5	8	-

4.14 RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS RADIOMÉTRICOS

Para realização dos levantamentos radiométricos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- monitor: Eberline E600 (n° de série: 02137)
- sonda para nêutrons: Swendi 2 (n° de série: 02520)
- sonda para radiação gama e X: SHP 270 (n° de série: 001034)
- incerteza para medidas de taxa de dose de radiação Gama: 10% (*Certificado de calibração LNMRI 0360/2009*);
- incerteza para medidas de taxa de dose de nêutrons: 0,1468% (*Certificado de calibração THERMO SCIENTIFIC PRS-PK SF1037*).

Foram realizados levantamentos radiométricos em 10 instalações visitadas. Em três instalações não foi possível a realização, e duas ainda não estavam em operação e por isso não foram visitadas. O resultado dos levantamentos radiométricos é descrito a seguir.

Os levantamentos radiométricos consistiram de medidas em pontos internos aos prédios onde estão instalados os aceleradores, em áreas supervisionadas e áreas controladas, e em pontos externos à sala de irradiação, junto à parede externa do prédio do irradiador e locais de circulação de público.

Em duas instalações visitadas as salas de irradiação encontram-se localizadas no subsolo, possuindo, portanto, uma blindagem natural. Nestas instalações as medidas resumiram-se à porta da sala de irradiação e ao corredor de acesso.

Para instalações de categoria II (sala de irradiação - grupo IX), as medidas realizadas ficaram distribuídas nas seguintes escalas:

- Para raios gama: 0,2 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ em áreas controladas.
0,2 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ em áreas livres.
- Para nêutrons: 0,0 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 13 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ em áreas controladas.
0,0 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 15 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ em áreas livres.

Considerando os novos limites derivados de dose para IOE = 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ e público = 0,5 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, em duas instalações de categoria II (grupo IX) foram encontrados valores acima do nível de público em áreas externas ao prédio do acelerador.

Em uma instalação de categoria II (grupo IX) foram encontrados valores acima do nível de IOE em área controlada.

Para instalações de categoria I (autoblindados - grupo X), as medidas realizadas ficaram distribuídas nas seguintes escalas:

- Para raios gama: 0,2 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ a 4,0 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ em áreas controladas.
0,2 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ a 2,0 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ em áreas livres.
- Para nêutrons: 0,0 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ a 1,0 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ em áreas controladas.
0,0 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ a 0,5 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ em áreas livres.

Considerando os novos limites derivados de dose para IOE = 10 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ e público = 0,5 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$, em uma instalação de categoria I (grupo X) foram encontrados valores acima do nível de público em áreas externas ao prédio do acelerador. Em sete instalações todas as medidas de levantamento radiométrico realizadas apresentaram valores inferiores ao limite de público, tanto em áreas controladas como em áreas livres.

4.15 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS RELATÓRIOS DE DOSE

A monitoração individual é realizada em oito instalações com monitores individuais de tórax, com leitura mensal, através de dosímetros termoluminescentes – TLD – ou filme dosimétrico, fornecidos por laboratório credenciado pela CNEN. A análise dos resultados dos laudos de dose, dos últimos 24 meses, mostrou que os valores de dose individual não excederam o nível de registro (0,2 mSv). O resultado dos laudos de dose mostra que não há necessidade de uma análise das instalações visando à restrição de doses, porém foi observado que em várias instalações o uso do dosímetro pessoal é feito de forma inadequada, e que a maioria dos IOEs dessas instalações sequer utilizam o dosímetro pessoal.

4.16 COMPARAÇÃO DAS INSTALAÇÕES NACIONAIS COM AS DA ESPANHA

A Espanha possui dois aceleradores de elétrons para uso industrial, sendo um para irradiação de alimentos e outro para implantação iônica, e 3 três aceleradores para uso em pesquisa. Estas três instalações de aceleradores para pesquisa encontram-se no

Centro Nacional de Aceleradores (CNA) da Universidade de Sevilla, e foram visitadas para análise.

O primeiro acelerador do CNA, um Van de Graaf (Fig. 4.1), é utilizado para análise e modificação de materiais. Acelera prótons, partículas alfa e uma variedade de íons até 3 MeV, utilizando diferença de potencial.

As paredes da sala de irradiação têm 1,0 m de espessura e as paredes do corredor de acesso têm espessura entre 0,7 e 1,0m. Acima da porta de acesso estão colocadas a sinalização luminosa, o detector de radiação fixo e o sistema de intertravamento (Figs. 4.2 e 4.3).



Fig. 4.1 - Sala do acelerador Van de Graaf.



Fig. 4.2 – Corredor de acesso à sala de irradiação.



Fig. 4.3 – Porta de acesso à sala de irradiação.

O segundo acelerador, um Tandetron de 1,0 MeV, é utilizado para a técnica AMS (espectometria de massa com aceleradores). Encontra-se ilustrado na Fig. 4.4.



Fig. 4.4 - Tandetron para espectrometria de massa.

O terceiro acelerador do CNA é um cíclotron fabricado pela empresa IBA, capaz de acelerar prótons e dêuterons até 18 e 9 MeV, respectivamente.



Fig. 4.5 - Cíclotron.

O acelerador acima (cíclotron) tem a possibilidade de que o feixe acelerado de prótons ou dêuterons seja extraído em qualquer uma das oito janelas de saída possíveis. Em sete destas janelas são posicionadas câmaras de reação, onde são colocados os materiais precursores para produzir todos os radioisótopos atualmente disponíveis para a técnica de tomografia de emissão por pósitrons (PET), que são o carbono-11, o nitrogênio-13, o oxigênio-15 e o flúor-18. Na oitava janela de saída está instalada uma linha exterior de feixe que transporta o feixe de partículas até outra sala. Esta segunda sala blindada está separada da sala do cíclotron. Nela está instalada uma câmara de reação para a irradiação de materiais de interesse biomédico e tecnológico.

Nas três instalações de aceleradores para pesquisa existentes no CNA, visitadas na Espanha, encontram-se instalados monitores fixos de radiação e sinalização luminosa indicativa do funcionamento do acelerador monitorado.



Fig. 4.6 – Monitor fixo de radiação e indicação luminosa do estado do acelerador.

As três instalações atendem a todos os itens relativos à segurança radiológica constantes da lista de verificação adotada para este trabalho. As instalações também possuem especialista qualificado, apesar de não ser exigência do órgão regulador. A estrutura do serviço de radioproteção é formada por um chefe de serviço, supervisor de radioproteção e operadores certificados pelo órgão regulador nuclear da Espanha. Tal órgão regulador realiza inspeções de rotina nas instalações anualmente, e também todas as vezes em que alguma modificação seja realizada na instalação.

Também a Espanha, tal como o Brasil, não possui uma norma específica para instalações com aceleradores de partículas.

4.17 REQUISITOS DE NORMA ESPECÍFICA PARA ACELERADORES

4.17.1 REQUISITOS DE LICENCIAMENTO (NORMA CNEN-NE-6.02)

Para emissão da Autorização para Operação, além dos documentos já requeridos, deverá ser entregue pela Instituição uma análise probabilística de segurança – APS (ex: LOPA - Análise de Camadas de Proteção).

4.17.2 REQUISITOS PARA A INSTITUIÇÃO

As instalações de categoria II (grupo IX), além do Titular e do Supervisor de Radioproteção, deverão possuir Especialista Qualificado e Operador Qualificado, certificados pela CNEN.

- Especialista Qualificado: indivíduo com nível superior, com conhecimento técnico do funcionamento do acelerador, dos sistemas de segurança e formação em radioproteção.
- Operador Qualificado: indivíduo com nível médio ou superior, com formação em radioproteção.

4.17.3 REQUISITOS PARA A INSTALAÇÃO

As instalações deverão possuir, disponíveis para análise pelos fiscais da CNEN, documentos que contenham:

- Dados do acelerador: Modelo, N° de série, Tipo de feixe, Energia da radiação e Descrição das diferenças ou modificações.
- Projeto da Instalação: Descrição das diferenças ou modificações do projeto inicial aprovado pela CNEN, considerando-se os itens de segurança (blindagem, materiais de construção, proteção contra incêndio, exaustão, etc...).

As instalações deverão possuir os itens de segurança, referentes ao acelerador, projetados por Especialista Qualificado, proteções contra condições adversas de trabalho (calor, umidade, etc.), detectores contra incêndio nas áreas de irradiação, e sistema de ventilação adequado nas áreas de irradiação.

As Instalações deverão possuir sistema de controle da segurança para operações de irradiação, aprovados pela CNEN, com os seguintes componentes:

- Intertravamento elétrico ou mecânico, para barreiras de proteção, entrada e saída de material;
- Botoeiras de emergência;
- Monitor de radiação no interior da sala de irradiação com indicador de leitura fora da sala de irradiação e intertravamento com a porta de entrada;
- Chave de controle para conexões elétricas e mecânicas para voltagem do acelerador e fonte de emissão (por ex.: correntes espúrias);
- Sistema de controle de acesso intertravado com a fonte de voltagem do acelerador;
- Sistema de controle de acesso intertravado, para antes da voltagem ser ligada ao acelerador;
- Meios de fuga ou comunicação, dentro da sala de irradiação;
- Sinalização separada e distinta (visível e audível) e avisos escritos, dentro e fora da sala de irradiação para o estado do acelerador;
- Sinalização de advertência.

As instalações deverão possuir serviço de radioproteção conforme a norma CNEN-NE-3.02. Além do estipulado pela norma, esse serviço deverá:

- ser auditado periodicamente pela gerência da Instituição;
- possuir registros de acidentes e/ou incidentes;
- possuir procedimentos de segurança baseados em lições aprendidas de acidentes em instalações similares;
- possuir um programa de garantia de qualidade.

4.17.4 REQUISITOS PARA PROTEÇÃO DOS IOEs

As instalações deverão possuir na classificação de áreas:

- Demarcação de áreas controladas;
- Demarcação de áreas supervisionadas;
- Sinalização nos pontos de acesso.

As instalações deverão possuir regulamentos e instruções escritos em português e proporcionar aos trabalhadores o conhecimento sobre tais regulamentos.

As Instalações deverão possuir procedimentos específicos para:

- Operação do acelerador;
- Carga de produto;
- Resposta a alarmes;
- Reparos e manutenção dos sistemas de segurança;
- Verificação do funcionamento do acelerador.

As instalações deverão possuir para monitoramento:

- Dosímetros pessoais (monitores individuais de dose) fornecidos por laboratório credenciado;
- Monitores de área fixos e portáteis verificados quanto à carga das baterias e aferidos com microfonte radioativa antes do uso.

4.17.5 REQUISITOS PARA A PROTEÇÃO DO PÚBLICO

As instalações deverão possuir controle de visitantes que observem os seguintes itens:

- Os visitantes devem ser acompanhados por trabalhador (IOE) autorizado na área controlada;
- Os visitantes devem receber instruções adequadas para entrar na área controlada;
- Os visitantes devem receber monitor individual de dose para uso na instalação;
- Controle adequado para entrada e saída nas áreas supervisionadas;
- Realizar levantamentos radiométricos periódicos das áreas de público adjacentes, realizado por trabalhador (IOE) qualificado.

4.17.6 REQUISITOS PARA SEGURANÇA RADIOLÓGICA DO ACELERADOR (FONTES DE EXPOSIÇÃO)

As instalações deverão possuir:

- Blindagens e outras medidas de proteção para evitar danos ao acelerador e restringir exposições dos IOE e do público;

- As plantas e a colocação dos equipamentos de acordo com o descrito no Plano de Radioproteção e considerando adequadamente as áreas de público adjacentes a instalação.

4.17.7 REQUISITOS PARA RESPOSTA A EMERGÊNCIAS

As instalações deverão possuir:

- Plano de Emergência periodicamente revisto e atualizado, baseado nas lições aprendidas em experiências de operação e acidentes em instalações semelhantes;
- Treinamento específico para os IOE envolvidos na implantação do Plano de Emergência;
- Medidas de atendimento ao Plano de Emergência, exercitadas periodicamente em conjunto com autoridade oficial de resposta a emergências.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A CNEN não possui no seu sítio na internet, na lista de “Entidades Autorizadas e Registradas”, referências sobre instalações com aceleradores de partículas utilizados em pesquisa. Esta falta de informação demonstra a falta de controle desta aplicação das radiações ionizantes.

Entre as nove Instituições visitadas apenas uma cumpre as normas CNEN (Tab. 5.15), o que demonstra que não há fiscalização de rotina nas instalações.

Com a aplicação da análise de segurança (LOPA) a uma das instalações que cumprem as normas CNEN e possui os sistemas de segurança recomendados, verificou-se que mesmo nesta instalação há sistemas de segurança que podem ser melhorados (Tab. 5.8), contrariando a análise qualitativa inicial. Fica evidenciada a necessidade de uso da análise de segurança para a avaliação das instalações.

Quando aplicada a análise de segurança à instalação similar a anterior que, porém, não observa as normas CNEN e não possui os sistemas de segurança recomendados, o resultado é preocupante, como ficou demonstrado com a geração dos indicadores de risco. Os indicadores de risco mostram claramente as decisões a serem tomadas pelos titulares das instalações e que devem ser impostas pelo órgão regulador.

A maior parte das instalações não possui os sistemas de segurança que impeçam a entrada de indivíduos na sala de irradiação, o que torna esta ação totalmente dependente do operador. Esta é uma situação muito preocupante, pois a maior causa de acidentes é falha humana.

A maior parte das instalações não possui os sistemas que permitam o desligamento do acelerador e a fuga da sala de irradiação de uma pessoa que inadvertidamente fique presa no interior da mesma, condenando o indivíduo ao acidente com exposição à radiação.

As situações dos itens 5 e 6 são agravadas porque estas mesmas instalações não possuem serviços de radioproteção (SR) e portanto não oferecem treinamento adequado em radioproteção aos IOE.

Os aceleradores autoblindados (categoria I) possuem sinalização luminosa, porém, não conforme o recomendado pela publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992).

Falta, também, nestas instalações classificação e sinalização de áreas. Não há avisos sobre a presença de radiações ionizantes e um indivíduo que seja conhecido na instituição não encontra impedimento para acesso às áreas de radiação.

Em nenhuma instalação, das oito que possuem dosímetros pessoais, há registro de doses acima do nível de registro (0,2 mSv por mês). Foi observado que em várias instalações o uso do dosímetro pessoal é feito de forma inadequada e que a maioria dos IOE dessas instalações, sequer utilizam o dosímetro pessoal. Isto acontece porque, nestas últimas, não há serviço de radioproteção.

As instalações, que não possuem serviço de radioproteção, não realizam levantamento radiométrico. Durante as visitas realizadas foram efetuadas medidas de levantamento radiométrico em cinco delas. Não foram encontrados valores acima do nível de público fora da sala de irradiação. Isto é tranquilizante, porém, há o risco potencial evidenciado pela falta de controle de acesso a sala de irradiação.

Em duas instalações não há controle da entrada de visitantes na sala do acelerador, o que pode levar a acidentes severos.

Apesar de todas as instalações possuírem um titular responsável pela mesma, alguns deles demonstraram um desconhecimento total de radioproteção e ignoram a competência da CNEN sobre o assunto.

Foi observado na visita às instalações de aceleradores de pesquisa da Espanha, um total respeito aos regulamentos e às recomendações de radioproteção e segurança radiológica, isto com certeza é fruto de uma cultura de segurança implantada e de um poder coercivo de atuação do órgão regulador.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se à CNEN que, considerando-se o nível de complexidade e o risco associado as instalações com aceleradores de pesquisa, crie um programa de controle para esta prática de utilização das radiações ionizantes e estipule periodicidade de inspeção reguladora anual para os aceleradores de pesquisa.

Sugere-se à CNEN que exija a aplicação de análise de segurança a todas as instalações com aceleradores de pesquisa, como ferramenta de avaliação da segurança radiológica.

Sugere-se à CNEN que adote a lista de cheque verificação do anexo 1 como ferramenta para inspeções reguladoras nas instalações com aceleradores de partículas.

Sugere-se a todas as instalações que instalem os sistemas de segurança necessários para satisfazer as normas CNEN e as recomendações internacionais – BSS – da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1996^b), da publicação 75 do ICRP (1997), e da publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992).

Sugere-se a todas as instalações com aceleradores de partículas que, padronizem os indicadores luminosos conforme se observa na Fig. 5.6 e recomendado pela publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992).

Sugere-se a todas as instalações que instalem monitor de área fixo no interior da sala de irradiação, intertravado com o acelerador.

Sugere-se a todas as instalações de categoria II (grupo IX) que instalem botoeiras de emergência no interior da sala de irradiação.

Sugere-se a todas as instalações com aceleradores de partículas que realizem levantamento radiométrico para classificação de áreas, considerem nesta classificação também o risco potencial, e sinalizem corretamente as áreas.

Sugere-se aos titulares de todas as instalações que utilizam monitoração individual que instrua os IOEs sobre o uso correto dos monitores individuais e sobre a obrigatoriedade do uso do mesmo.

Sugere-se a todas as instalações com aceleradores de partículas que criem serviços de radioproteção de acordo com a norma CNEN-NE-3.02, mesmo sem a cobrança real do órgão regulador, para que através destes serviços, façam cumprir os requisitos de radioproteção.

Sugere-se aos responsáveis pelas instalações, titulares, supervisores de radioproteção ou operadores que atualizem seus conhecimentos sobre segurança radiológica, através de leitura de normas e recomendações sobre o assunto ou mesmo freqüentando cursos oferecidos pela própria CNEN.

Sugere-se à CNEN que estabeleça a obrigatoriedade, para instalações da categoria II, do especialista qualificado, que desempenharia função fundamental na área de proteção e segurança radiológica.

Sugere-se à CNEN que crie norma ou posição reguladora específica para a área de aceleradores de partículas e considere os requisitos para norma aqui apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI, 1969, AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, *Radiological Safety in the Design and Operation of Particle Accelerators*, Report N 43.1, New York.
- ARAÚJO, G. M., 2004, Elementos do Sistema de Gestão de Segurança, Meio Ambiente e Saúde Ocupacional - SMS, 1ª ed., Rio de Janeiro, editora GVC.
- ARAUJO, J.B., 2006, Um Modelo de Indicadores Críticos de Segurança Para Ações Regulatórias em Usinas Nucleares Baseada em Uma APS Nível 1, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ.
- ASTIGARRAGA, E., *El metodo Delphi* - Universidade de Deusto - Facultad de CC.EE. y Empresariales, Espanha, 2005
- BAYBUTT, P., 2002, “Layers of Protection Analysis for Human Factors (LOPA-HF)”, *Process Safety Progress*, v. 21, pp. 119-129.
- BOTTANI, Norberto, 2005, “*Ilusão ou Ingenuidade? Indicadores de Ensino e Políticas Educacionais*”, Revista CEDES da Universidade de Campinas, Educ. Soc., Dez 1998, vol.19, no.65, p.23-64, Campinas.
- CCPS, 1986, Center for Chemical Process Safety, *Guideline for Process Equipment Reliability Data*, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CCPS, 1989, Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CCPS, 1996, Center for Chemical Process Safety, *Inherently Safer Chemical Processes: A life Cycle Approach*, American Institute of Chemical Engineers, New York.

CCPS, 2000, Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, 2nd ed., American Institute of Chemical Engineers, New York.

CCPS, 2001, Center for Chemical Process Safety, *Layer of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*, American Institute of Chemical Engineers, New York.

CNEN, 2005, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Diretrizes Básicas de Radioproteção*, CNEN-NN-3.01, Rio de Janeiro, Brasil

CNEN, 1988, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Serviços de Radioproteção*, CNEN-NE-3.02, RJ, Brasil.

CNEN, 1999, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Certificação da Qualificação de Supervisores de Radioproteção*, CNEN-NN-3.03, RJ, Brasil.

CNEN, 1998, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Licenciamento de Instalações Radiativas*, CNEN-NE-6.02, RJ, Brasil.

FELICIANO, Wanderley da Costa, 2008, “O uso da análise de riscos como ferramenta de gestão ambiental”,. Disponível em:

<www.crq4.org.br/.../CRQ%20-Artigo%20Análise%20de%20Riscos.pdf>

Acesso em: 08/12/2009

HYATT, Nigel, 2002, *Guidelines for Process Hazard Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis*, chapter 21, published by DYADEM. Richmond Hill, Ontario.

IAEA, 1979, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators*, Technical Report Series TRS No. 188, Vienna

IAEA, 1992, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, Safety Guides, Safety Series No. 107, Vienna.

IAEA, 1996^a, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Lessons Learned from Accidents in Industrial Irradiation Facilities*, STI/PUB/1015, Vienna.

IAEA, 1996^b, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, BSS, Safety Series No. 115, Vienna.

IAEA, 1996^c, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *An Electron Accelerator Accident in Hanoi, Vietnam*. Vienna.

IEEE, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1984, *ANSI/IEEE Standard 500-1984: Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations*, Piscataway, NJ.

ICRP, 1977, INTERNATIONAL COMMITTEE ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication 26, Pergamon Press, Oxford.

ICRP, 1997, INTERNATIONAL COMMITTEE ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication 75, Pergamon Press, Oxford.

LANZ, L.H., 1967, "Injury Due to Accidental High-Dose Exposure to 10 Mev Eletrons", *Health Physics*, v. 13, No. 3, pp. 241-251.

- MARKOWSKI, A. S., 2006, “exLOPA for Explosion Risks Assessment”, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 142, Issue 3, 11 April 2007, Pages 669-676, editora Elsevier.
- NCRP, 1977, NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Report 51, Washington.
- OLIVEIRA, H.B., et. Al., 2002, *Aceleradores de Partículas: História, Teoria e Aplicações*, IPEN/CNEN.
- OLIVEIRA, 2005, Marcos Antônio Lima de, “*Indicadores de Desempenho*”, disponível em <<http://www.jasconsultoria.vialbol.uol.com.br/artigoinddesemp.htm>> Acesso em 22/09/2009
- OREDA, 2002, *Offshore Reliability Data Handbook*, 4th edition, SINTEF Industrial Management, Trondheim, Noruega.
- SCHAUER, D.A., 1993, “A Radiation Accident at an Industrial Accelerator Facility”, *Health Physics*, v. 65, No. 2, pp. 131-140.
- SUMMERS, A. E., 2003, “Introduction to Layers of Protection Analysis”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 104, pp. 163-168.
- SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E., 1983, *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- WRIGHT, J. T. C. , Giovinazzo, R. A., Delphi - Uma Ferramenta de Apoio ao Planejamento Prospectivo, In: Caderno de Pesquisas em Administração, São Paulo, v.01, no. 12, 2º. Trim./2000

ANEXO 1

HISTÓRICO DOS ACELERADORES

Extraído do trabalho, “Aceleradores de Partículas: História, Teoria e Aplicações” (OLIVEIRA, 2002).

No início de sua existência – na década de 1920 e início da década de 1930 – apenas alguns poucos laboratórios de pesquisas em física básica instalados em universidades, mantidas por verbas governamentais, possuíam aceleradores de partículas que funcionavam de forma bastante rudimentar. Com o advento da II Guerra Mundial, mais especificamente com o projeto *Manhatan*, que resultou na construção e explosão dos primeiros artefatos bélico-nucleares, as pesquisas com aceleradores de partículas foram alavancadas com investimentos da ordem de bilhões de dólares em poucos anos, além do envolvimento emergencial de milhares de pessoas, entre cientistas e não cientistas. Tais esforços não geraram apenas armas para destruição em massa, mas também um maior conhecimento da energia contida no núcleo atômico, graças às pesquisas realizadas com aceleradores de partículas.

Dessa corrida surgiram diversos tipos de aceleradores de partículas, mas em termos de conceito, existem apenas dois tipos de aceleradores: aqueles que aceleram partículas em linha reta, conhecidos como aceleradores lineares, ou LINACs (*Linear Accelerator*) e os aceleradores circulares. Basicamente, cada acelerador difere do outro pela forma como as partículas são aceleradas, o tipo de partícula que é acelerada e a energia final da partícula. Os primeiros aceleradores construídos eram do tipo linear e foram desenvolvidos no início da década de 1920, sendo até hoje largamente empregados na pesquisa, na indústria e na medicina.

Os aceleradores circulares apareceram alguns anos depois, no final da década de 1920 e início da década de 1930. Na atualidade, é o tipo de acelerador mais vastamente empregado, por ser mais compacto, mais eficiente, produzir feixes de partículas muito mais energéticas, quando comparados com os aceleradores lineares, dentre outras diferenças que serão apresentadas mais à frente. Os aceleradores circulares, a exemplo dos lineares, também são muito empregados na pesquisa, na medicina e na indústria.

A seguir, respeitando sempre que possível a ordem cronológica dos fatos, estão apresentados detalhes sobre cada um dos tipos de aceleradores de partículas até hoje já desenvolvidos.

TIPOS DE ACELERADORES

1 O ACELERADOR COCKROFT-WALTON

John Douglas Cockroft e Ernest Thomas Sinton Walton, o primeiro, irlandês e o segundo, inglês, no início da década de 1920, construíram o primeiro grande acelerador de partículas, que eram produzidas pelo decaimento radioativo do polônio ou do rádio com alta tensão (alta-voltagem), no Laboratório *Cavendish* (UK).

O princípio de funcionamento e a operação eram bastante simples. O acelerador era constituído de um grande vaso metálico e hermético dentro do qual se produzia alto vácuo. Dentro deste vaso eram posicionados vários eletrodos metálicos e esféricos, separados entre si dois a dois e isolados eletricamente do vaso, uma fonte para produção de íons positivos (H^+), um alvo em direção ao qual os íons eram acelerados e uma fonte de alta tensão elétrica, para manter uma diferença de potencial eletrostático muito alto entre dois pares desses eletrodos, como pode ser visualizado no esquema simplificado da Figura 1.1.

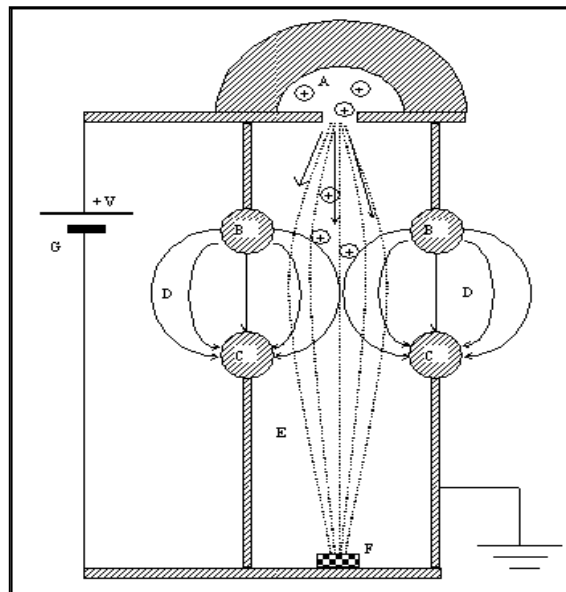


Fig. A.1. Acelerador por queda de potencial de Cockroft-Walton.

A Figura 1.2 ilustra o acelerador Cockroft-Walton existente atualmente no *Fermi National Laboratory* (FERMILAB), nos E.U.A.



Fig. A.2. Acelerador de Cockroft-Walton instalado no FERMILAB.

Atualmente, esse tipo de acelerador é empregado como primeiro estágio de aceleração para outros tipos de aceleradores, isto é, faz-se uma pré-aceleração dos íons antes de se fazer com que estes penetrem em outro acelerador, que aumentará ainda mais a energia dos íons, como é o caso do FERMILAB, nos E.U.A.

2 O ACELERADOR VAN DE GRAAF

O acelerador Van de Graaf é, na atualidade, o mais simples e comum acelerador de partículas por queda de potencial em operação. Recebe este nome graças a seu inventor, o físico norte-americano, Robert Jemison Van de Graaf.

A Figura 1.3 mostra um esquema muito simplificado de um acelerador Van de Graaf típico que funciona da seguinte forma: uma grande esfera condutora (metálica) e oca é montada sobre um suporte isolante, geralmente de vidro ou cerâmico, também oco. Pelo interior desses corpos passa uma correia espessa feita de material isolante,

usualmente borracha. A correia passa por duas polias, uma no alto, no interior da esfera, e a outra, embaixo, próxima ao chão.

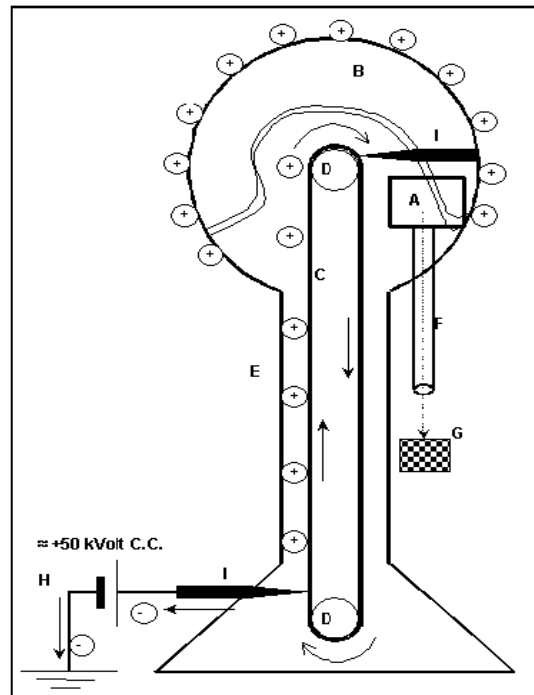


Fig. A.3. Acelerador por queda de potencial de Van De Graaf.

Na base do acelerador, próximo à polia inferior, uma haste metálica e pontiaguda é montada, de forma a permanecer sempre em contato com a correia em movimento, através da porção pontiaguda da haste, enquanto que a outra extremidade da haste permanece conectada ao pólo positivo de uma fonte de tensão contínua de aproximadamente 50 kV. Do lado interno da esfera condutora existe uma outra haste condutora e pontiaguda, similar à primeira, que conecta a correia em movimento à superfície metálica da esfera. Ainda no interior da esfera, é montada de forma conveniente uma fonte para produção de íons positivos. Tubos metálicos cilíndricos dentro dos quais se produz alto vácuo conectam a fonte de íons no interior da esfera ao alvo que se pretende bombardear, colocado externamente à esfera. O atrito entre a ponta da haste próxima à base do acelerador, que está a um potencial elétrico de +50 kV, e a correia isolante em movimento, *arranca* elétrons da superfície do material de que é feita a correia, deixando em sua superfície uma quantidade razoável de carga elétrica estática positiva. Tais cargas positivas, devido ao movimento constante da correia, são transportadas para o interior da esfera condutora, que, por sua vez, está também ligada à correia pela outra haste metálica e pontiaguda. Neste ponto, então, elétrons livres da

rede cristalina do metal de que é feita a esfera movem-se em direção à correia, atraídos pelo potencial elétrico elevado produzido pela presença das cargas elétricas positivas em sua superfície, tornando-a novamente neutra. Em contrapartida, a esfera que até então estava neutra, passa a exibir excesso de cargas elétricas positivas, distribuídas uniformemente por toda a superfície externa dela, devido à perda de elétrons para a correia. Mantido o movimento contínuo da correia, mais e mais carga elétrica positiva acumula-se na superfície da esfera, o que torna o potencial elétrico desta, relativo ao potencial da Terra, muito elevado, podendo alcançar valores em torno de 25 MV, dependendo do tamanho da esfera e, principalmente, das condições de isolamento elétrico do meio onde se encontra montado o acelerador.

Atualmente são largamente empregados em pesquisa básica, funcionando como pré-aceleradores de partículas para outros aceleradores ainda maiores. A energia máxima que se pode obter de um acelerador eletrostático – como o acelerador Van de Graaf – pode ser muito aumentada pela aplicação do princípio *Tandem*, descrito a seguir.

3 O ACELERADOR TANDEM VAN DE GRAAF

Neste acelerador, os íons negativos são primeiramente atraídos e acelerados em direção a um terminal de alta tensão positiva, posicionado no centro do tanque de pressão (Figura 1.4).

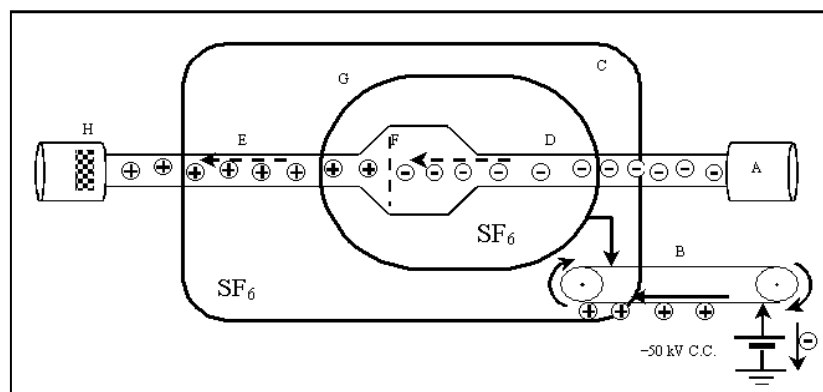


Fig. A.4 Acelerador por queda de potencial do tipo Tandem Van de Graaf.

No interior do terminal, os íons negativos agora têm energia de alguns MeV, igual à diferença de potencial elétrico entre a fonte de íons e o terminal positivo (alguns MV) vezes a carga elétrica de cada íon negativo (-e). Os íons negativos passam através de uma fina folha de carbono, que *arranca* os elétrons do feixe de íons transformando-os agora em íons positivos; no caso dos íons H^- , transformam-se em íons H^+ , isto é, em prótons. O feixe de prótons é acelerado uma segunda vez, agora para longe do terminal positivo, devido à intensa repulsão eletrostática entre os prótons do feixe e o terminal positivo, indo bombardear o alvo, posicionado logo à frente do feixe acelerado.

No Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), existe um acelerador similar em operação regular desde 1974. Na área de pesquisa, os aceleradores Tandem Van de Graaf são empregados na análise e/ou modificação de materiais e, especialmente, em espectrômetros de massa para análises ambientais.

A pesquisa e o desenvolvimento de novos aceleradores de partículas sofreram um grande avanço, a partir do final da década de 1920, produzindo em pouco mais de 20 anos, até meados da década de 1940, praticamente todos os tipos de grandes aceleradores empregados até os dias de hoje. Tais aceleradores são muito mais potentes, confiáveis e estáveis, podendo acelerar uma quantidade maior de partículas, e não apenas elétrons, prótons e partículas alfa. Essa segunda geração de aceleradores é descrita a seguir.

4 OS ACELERADORES LINEARES (LINAC)

Os aceleradores lineares são equipamentos muito simples, tanto em termos construtivos como de compreensão de seus princípios de funcionamento e operação. Em essência, é uma longa fila de bobinas ou tubos (cavidades) de impulso, dentro dos quais as partículas são aceleradas (vide Figura 1.5).

A ilustração abaixo, embora simplificada, é suficiente para mostrar o princípio básico de funcionamento de um LINAC, ou seja, atração e repulsão de cargas elétricas, através de regiões onde se estabelecem diferenças de potencial elétrico consideráveis.

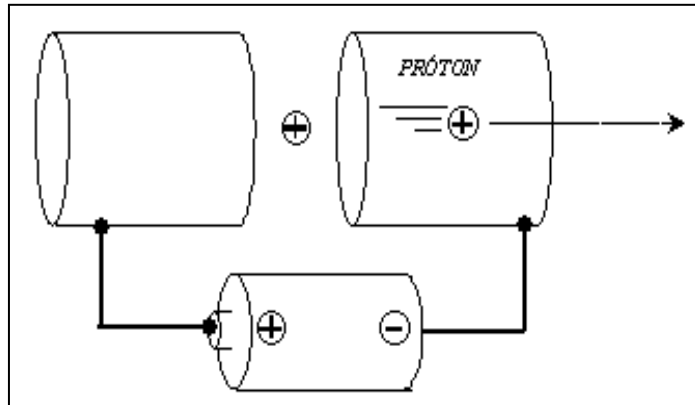


Fig. A.5 Esquema de um acelerador linear (LINAC).

Existem dois tipos distintos de aceleradores lineares de partículas. O primeiro tipo é conhecido como acelerador linear de *onda estacionária* – ou estrutura de Alvarez – as partículas atravessam um longo tanque cilíndrico em alto vácuo, passando pelo interior de diversas cavidades de impulso (eletrodos), separadas umas das outras por pequenos espaçamentos. Esse acelerador pode acelerar partículas até aproximadamente 200 MeV de energia. São geralmente empregados como aceleradores primários para aceleradores síncrotron. Na indústria, são usados como potentes produtores de Raios X.

O segundo tipo de acelerador linear de partículas é chamado de acelerador de *onda caminhante*. Ele acelera partículas dentro de uma longa cavidade cilíndrica, também conhecida como *guia de onda*, por meio de uma onda eletromagnética que *caminha* junto com as partículas, ou seja, a onda empurra as partículas, obrigando-as a viajarem em conjunto com ela própria (Figura 1.6).

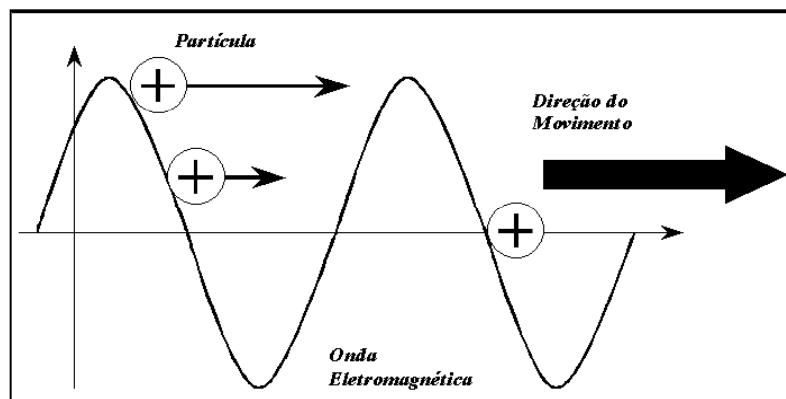


Fig. A.6. Aceleração por *onda caminhante*.

Quando uma onda dessa encontra no interior da cavidade um grupo de partículas eletrizadas (íons), aquelas que estão mais atrás no grupo sofrem uma força maior para a frente, ao passo que aquelas que estão mais à frente recebem menos impulso, como ilustra a Figura 1.7. Com isto, as partículas acabam por viajar juntas e em conjunto com a onda, próximas à sua *crista*.

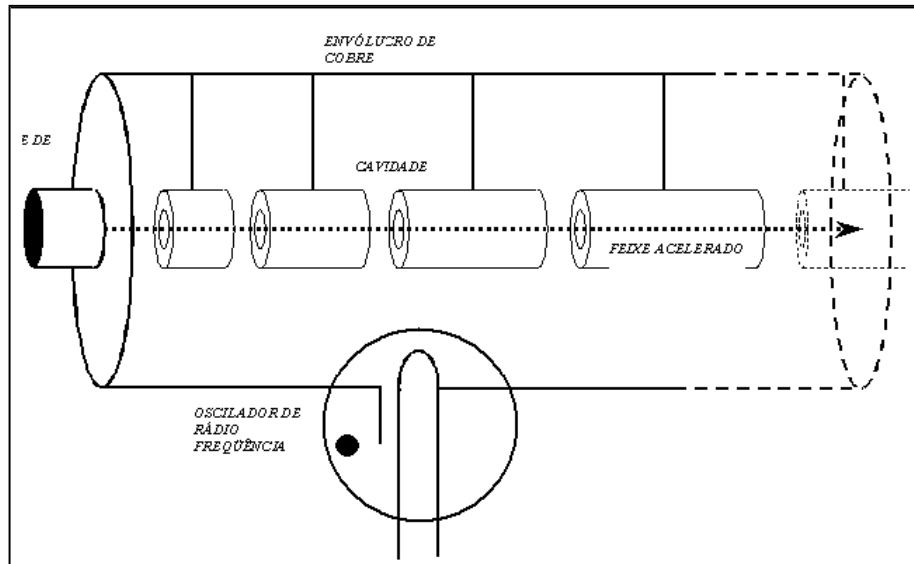


Fig. A.7. Acelerador linear (LINAC) de *onda caminhante*.

Essa é a idéia fundamental dos aceleradores lineares de partículas: as partículas são aceleradas em pequenas regiões entre eletrodos em forma de cavidades cilíndricas. Como, entre cada cavidade de aceleração, a partícula recebe novo impulso, a velocidade dela aumenta e, dessa forma, diminui o tempo que a partícula demora para atravessar a cavidade seguinte. Por este motivo, as cavidades são construídas de forma que a anterior seja um pouco menor do que a posterior, o que compensa o menor tempo de vôo da partícula, fazendo com que esta, ao sair da cavidade, continue encontrando o campo de radiofrequência em fase.

5 OS ACELERADORES CIRCULARES

Em 1930, os aceleradores lineares (LINAC) eram complicados de serem construídos e foram ofuscados pelas idéias propostas em 1929 por E. Lawrence, que sugeriu a construção de um acelerador circular, empregando campos magnéticos e elétricos para a aceleração de partículas eletrizadas. Enquanto o campo magnético

(constante) era empregado para curvar a trajetória das partículas, de acordo com a eletrodinâmica clássica (força de Lorentz), o campo elétrico oscilante (RF) acelerava as partículas a cada meio ciclo de revolução dentro da máquina. A este acelerador circular de frequência fixa, Lawrence deu o nome de *cíclotron*, justamente pelo movimento das partículas em círculos de raios crescentes.

6 O CÍCLOTRON

O primeiro cíclotron de frequência fixa foi construído por Lawrence, em 1932. Tinha um diâmetro aproximado de 30 cm (Figura 1.8) e acelerou prótons a uma energia de 1,25 MeV. Com tal cíclotron, Lawrence dividiu o átomo apenas algumas semanas depois dos trabalhos de Cockroft e Walton com átomos de lítio.

Lawrence recebeu o prêmio Nobel de Física de 1939 pelo referido trabalho e, neste mesmo ano, a Universidade da Califórnia (Berkeley) já possuía um cíclotron de 150 cm de diâmetro, capaz de produzir prótons a 20 MeV de energia, o dobro da energia da mais energética partícula alfa (α) emitida por decaimento radioativo natural.

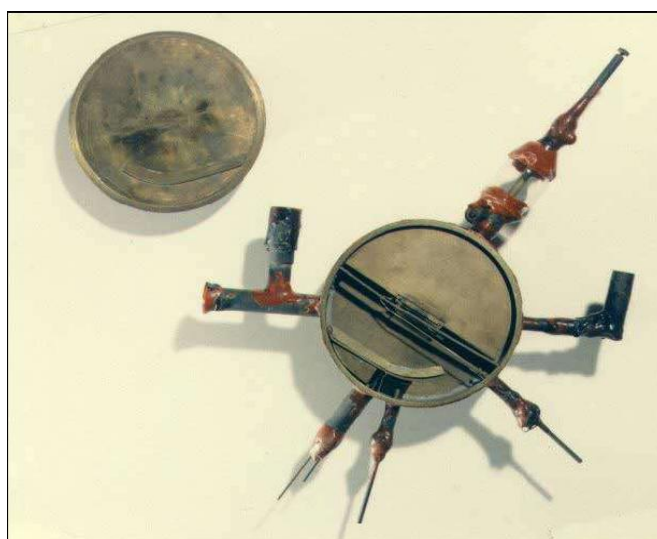


Fig. A.8: Primeiro cíclotron construído por Lawrence.

No Brasil, existem atualmente instalados quatro aceleradores cíclotron, para pesquisas e produção de radioisótopos, tais como o flúor-18 (^{18}F), o iodo-123 (^{123}I) e o gálio-67 (^{67}Ga). Dois estão instalados nas dependências do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), no Rio de Janeiro, um cíclotron modelo CV-28, produzido nos

E.U.A. pela *The Cyclotron Company*, que pode acelerar quatro tipos diferentes de íons: prótons, dêuterons, hélio-3 e hélio-4, com energia máxima de 24 MeV. O segundo ciclotron do IEN/CNEN, mais moderno, é um modelo *Cyclone-30* produzido pela *Ion Beam Applications* (IBA) da Bélgica.

Em São Paulo-SP, no Centro de Aceleradores Cíclotron (CAC), instalação que pertence ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN), estão instalados os outros dois ciclotrons brasileiros. O mais antigo, em operação desde 1982, é um modelo CV-28 idêntico ao modelo instalado no IEN/CNEN (RJ), o qual atualmente é usado apenas para atividades de pesquisa. A Figura 1.9 mostra uma foto do interior da caverna do ciclotron CV-28 do CAC.

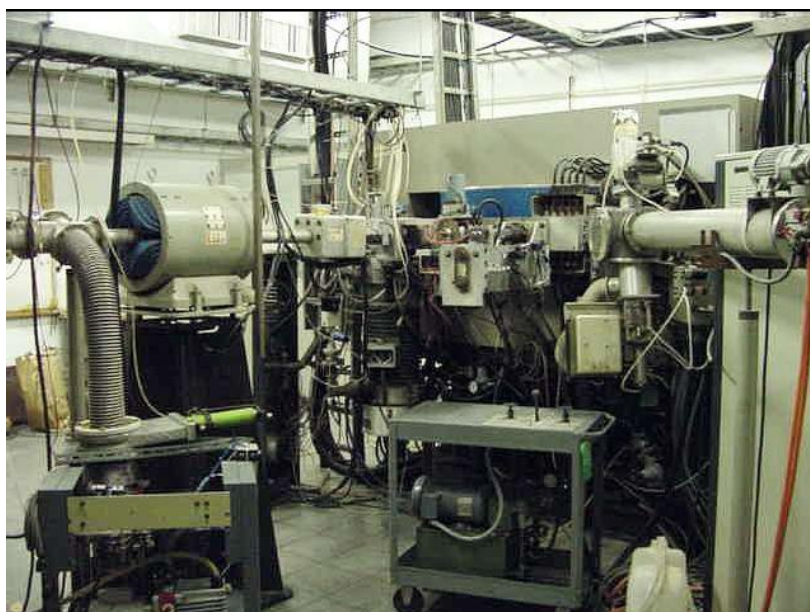


Fig. A.9: Cíclotron CV-28 instalado no CAC/IPEN.

O segundo ciclotron do IPEN/CNEN, é também um modelo *Cyclone-30* produzido pela *Ion Beam Applications* (IBA) da Bélgica. Produz apenas feixes acelerados de prótons até a energia máxima de 30 MeV, muito embora acelere íons negativos (H^-) no interior das cavidades Ds. Os prótons são extraídos segundo o método do *stripper*. Tal ciclotron atualmente é empregado integralmente para a produção de radioisótopos mencionados acima. A Figura 1.10 ilustra o interior da caverna que abriga este acelerador, nas instalações do IPEN/CNEN.



Fig. A.10: Cíclotron *Cyclone-30* instalado no CAC/IPEN/CNEN.

Embora a perda de energia por radiação eletromagnética seja grande para elétrons acelerados, quando comparada às perdas sofridas da mesma forma por prótons ou íons positivos, há interesse tanto em acelerar elétrons quanto na radiação por eles emitida.

Já para prótons ou íons mais pesados, os efeitos relativísticos mencionados aqui são pequenos, mas eles não são de forma alguma desprezíveis, principalmente, quando se trata de acelerar partículas a altas energias.

Mas, naquela época, a curiosidade dos físicos de partículas era grande e a necessidade de mais energia se tornava crucial. Assim, uma nova idéia foi apresentada para resolver, pelo menos em parte, as limitações do cíclotron de frequência fixa: o sincro-cíclotron, descrito a seguir.

7 O SINCRO-CÍCLOTRON

Visto que a frequência cíclotron depende da massa da partícula que está sendo acelerada – e por este motivo é sensível aos efeitos relativísticos de altas energias – o cíclotron, com sua frequência de aceleração fixa, leva progressivamente as partículas aceleradas para fora da região de sincronismo à medida que as partículas alcançam velocidades relativísticas.

Como a frequência do sincro-cíclotron é variável, não há necessidade do emprego de alta voltagem de aceleração, sendo que as partículas atingem a energia pretendida em alguns poucos ciclos. As tensões de aceleração no sincro-cíclotron são da ordem de 10 kV, enquanto que, nos cíclotrons convencionais, chegam a ultrapassar os 50 kV, podendo chegar a 100 kV nos grandes cíclotrons.

8 O BETATRON

Nos aceleradores circulares, o campo magnético é constante no tempo e no espaço e o feixe de partículas se move em círculos em torno desse campo magnético. Para tal configuração, a Lei de Faraday prevê o aparecimento de um campo elétrico induzido, cuja direção é tangente, em todos os pontos, à órbita das partículas. Essa topologia foi empregada por Lawrence para a construção do primeiro cíclotron e o mecanismo de aceleração ficou conhecido como *aceleração betatron*. Como o betatron é sensível aos efeitos relativísticos, ele é ideal para aceleração de elétrons, devido à sua pequena massa de repouso. O betatron tem também a vantagem de ser robusto e simples.

O desenvolvimento de betatrons para física de altas energias foi rápido, terminando em 1950, quando Kerst construiu o maior betatron do mundo (300 MeV). Como os betatrons são considerados muito seguros e baratos, eles continuam a ser construídos comercialmente para fins médicos, industriais e para pequenos laboratórios de pesquisas em física básica de partículas.

9 O SÍNCROTRON

O síncrotron é um acelerador de elétrons que produz um fluxo poderoso de fótons concentrados em um feixe muito estreito. A frequência desses fótons é bastante ampla, podendo variar desde o infravermelho distante até a faixa dos raios X duros. Os feixes de luz são emitidos em uma direção tangente à trajetória circular dos elétrons acelerados, como ilustra a Figura 1.11, e são dirigidos até as estações de trabalho onde os alvos são montados e os experimentos são realizados.

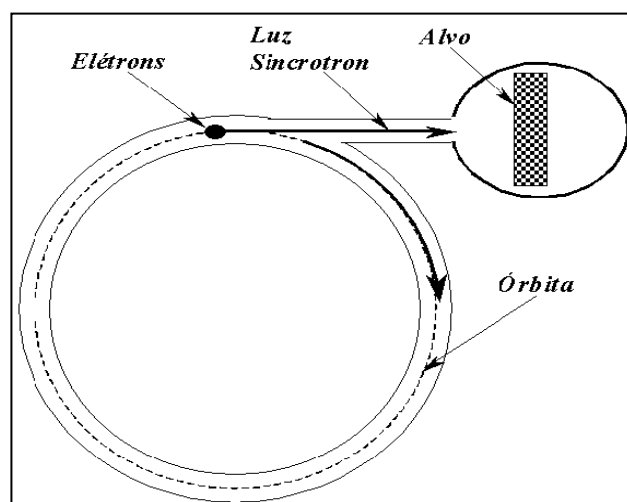


Fig. A.11: Esquema simplificado de um acelerador síncrotron.

Os raios X emitidos por um acelerador síncrotron diferem muito dos raios X emitidos por um equipamento hospitalar convencional ou até mesmo por uma fonte industrial e a diferença está na intensidade da radiação (número de fótons por unidade de área por unidade de tempo). Por exemplo, em uma fonte hospitalar de raios X, a intensidade varia entre 10^6 e 10^8 unidades, enquanto uma fonte de radiação síncrotron pode emitir fótons de raios X com intensidade da ordem de 10^{20} unidades, ou seja, 12 ordens de grandeza maior do que a mais intensa fonte hospitalar desse tipo de radiação.

O inventor do acelerador síncrotron é considerado o francês Alfred Lienard que, em 1898, descreveu o conceito de potencial retardado devido ao movimento de partículas eletricamente carregadas, conceito este que foi modificado e complementado, posteriormente, pelo físico alemão Emil Wiechert. Tal formalismo do potencial retardado existe até os dias atuais e é denominado *potencial de Lienard-Wiechert*.

Atualmente, vários aceleradores do tipo síncrotron existem em operação no mundo todo e suas aplicações vão desde a microeletrônica até a microbiologia, passando pela pesquisa em física básica, química, metalurgia, novos materiais e cosmologia, já que existem no universo inúmeras galáxias que emitem radiação síncrotron devido ao movimento circular de elétrons impulsionados por intensos campos magnéticos existentes no interior das galáxias. Por emitirem esse tipo de

radiação, as galáxias são chamadas de rádiogáxias e são observadas por gigantescos radiotelescópios.

No Brasil, existe o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) em Campinas-SP. O LNLS é um centro mantido com recursos públicos do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). O acelerador síncrotron do LNLS foi praticamente todo construído no Brasil, com matéria-prima nacional e por técnicos, engenheiros e físicos brasileiros. Em 1997, o equipamento começou a ser usado por pesquisadores brasileiros, podendo ser utilizado simultaneamente por muitos usuários de inúmeras áreas do conhecimento. Pesquisadores das áreas da Biologia, Bioquímica, Biomédica, Engenharias, Física, Geociências e Química utilizam a fonte de luz síncrotron em diversos experimentos. A Figura 1.12 ilustra uma visão panorâmica da fonte de luz síncrotron do LNLS.



Fig. A.12: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), onde se encontra instalado o primeiro síncrotron totalmente construído no Brasil (Campinas, SP).

Como aplicações importantes para a radiação síncrotron, podemos citar as medidas de coordenadas atômicas em superfícies de sólidos, difração da luz por pontos quânticos (*quantum dots*) e cristalografia de proteínas. A microeletrônica tem mostrado um interesse grande pelos comprimentos de onda menores da luz síncrotron, devido aos cada vez menores perfis que podem ser feitos, em oposição às técnicas litográficas até então empregadas para produção de microplacas de circuito impresso.

ANEXO 2

LISTA DE VERIFICAÇÃO PARA INSPEÇÃO REGULAR EM INSTALAÇÕES DE ACELERADORES

1 – INFORMAÇÕES DE IDENTIFICAÇÃO

1.1. Nome da Instituição _____

1.2. Endereço da Instalação _____

1.3. Telefone/fax/e-mail Tel: _____ Fax: _____
e-mail: _____

1.5. Nome e qualificação do SPR Nome: _____
Profissão: _____
Função: _____
Certificação: _____
Experiência: _____

1.6. Nome e qualificação de Especialistas Qualificados
Nome: _____
Profissão: _____
Função: _____
Certificação: _____
Experiência: _____

Nome: _____
Profissão: _____
Função: _____
Certificação: _____
Experiência: _____

Nome: _____
Profissão: _____
Função: _____
Certificação: _____
Experiência: _____

1.7. Nome e Função do Titular da Instalação (representante legal) _____

2 – VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

2.1. Dados do Acelerador

O acelerador é o descrito no plano aprovado pela CNEN? sim / não

Modelo: _____

Nº de série: _____

Tipo de feixe: _____

Energia da radiação: _____

Descrição das diferenças ou modificações: _____

2.2. Projeto da Instalação

Descrição das diferenças ou modificações do projeto inicial aprovado pela CNEN, considerando-se os itens de segurança (blindagem, materiais de construção, proteção contra incêndio, exaustão, etc...):

- | | |
|--|-----------|
| a) Os itens de segurança projetados por Especialista Qualificado, foram modificados? | sim / não |
| b) Possui proteções contra condições adversas de trabalho? (calor, umidade, etc...) | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| c) Possui detectores contra incêndio nas áreas de irradiação? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| d) Possui sistema de ventilação adequado nas áreas de irradiação? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |

2.3. Sistema de controle da segurança

- | | |
|---|-----------|
| a) Os controles de segurança para operações de irradiação são os aprovados pela CNEN? | sim / não |
| b) Se não, foi realizada avaliação de segurança por Especialista Qualificado, antes de qualquer modificação? | sim / não |
| c) Possui intertravamento elétrico ou mecânico, para barreiras de proteção, entrada e saída de material? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| d) Possui botoeiras de emergência? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| e) Possui monitor de radiação no interior da sala de irradiação com indicador de leitura fora da sala de irradiação e intertravamento com a porta de entrada? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| f) Possui chave de controle para conexões elétricas e mecânicas para Voltagem do acelerador e fonte de emissão (por ex.: correntes espúreas)? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |

- | | |
|---|------------------|
| g) Possui sistema de controle de acesso intertravado com a fonte de voltagem do acelerador? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| h) Possui sistema de controle de acesso intertravado, para antes da voltagem ser ligada ao acelerador? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |
| i) Possui meios de fuga ou comunicação, dentro da sala de irradiação? | sim / não |
| Funcionando corretamente? | sim / não |

2.4. Sistemas de alarme

- | | | |
|---|----------------------------------|----------------------|
| a) Possui sinalização separada e distinta (visível e audível) e avisos escritos, dentro e fora da sala de irradiação para: | | |
| i) Acelerador pronto para ser energizado. | Possui? | sim / não |
| | Funcionando corretamente? | sim / não |
| | Em português? | sim / não |
|
ii) Acelerador Ligado. |
Possui? |
sim / não |
| | Funcionando corretamente? | sim / não |
| | Em português? | sim / não |
|
iii) Acelerador Desligado. |
Possui? |
sim / não |
| | Funcionando corretamente? | sim / não |
| | Em português? | sim / não |
|
b) Sinalização de advertência. |
Possui? |
sim / não |
| | Funcionando corretamente? | sim / não |
| | Em português? | sim / não |

2.5. Operações de Segurança – Serviço de Radioproteção

- | | |
|---|------------------|
| a) O Serviço de Radioproteção é certificado e autorizado ? | sim / não |
| b) O Serviço de Radioproteção possui quadro de pessoal adequado? | sim / não |
| c) O Serviço de Radioproteção possui Supervisor de Radioproteção (com autoridade para parar operações inseguras)? | sim / não |
| d) O Serviço de Radioproteção possui recursos adequados para treinamento de pessoal? | sim / não |
| e) O Serviço de Radioproteção possui equipamentos adequados e suficientes? | sim / não |
| e) A administração realiza revisão periódica programa de radioproteção? | sim / não |
| Data da última revisão: _____ | |

2.6. Operações de Segurança – técnico

- a) O SPR (Supervisor de Radioproteção) possui conhecimento e perícia adequados? sim / não
- b) O SPR possui formação específica na área de radioproteção? sim / não
- c) O SPR esta ciente dos requisitos da autoridade reguladora e possui certificação da CNEN? sim / não
- d) O SPR tem suficiente tempo e recursos para o trabalho? sim / não
- e) O SPR mantém conhecimento das atividades dos trabalhadores (IOE)? sim / não
- f) O SPR dá treinamento inicial e periódico aos trabalhadores (IOE)? sim / não
- g) O SPR mantém registros adequados para demonstrar proteção dos trabalhadores (IOE) e do público? sim / não

2.7. Investigações e garantia da qualidade – Acidentes

- a) Possui registros de acidentes ou incidentes? sim / não
- b) Possui relato de investigação do acidente ou incidente? sim / não
- c) Os itens e procedimentos de segurança foram refeitos baseados em lições aprendidas de acidentes em instalações similares? sim / não
- d) Possui um programa de garantia de qualidade? sim / não
- e) Os trabalhos de manutenção e reparo são realizados de acordo com as recomendações do fabricante? sim / não
- f) Possui procedimentos de manutenção e reparo? sim / não

3 – VERIFICAÇÃO DA PROTEÇÃO DO TRABALHADOR (INDIVÍDUO OCUPACIONALMENTE EXPOSTO - IOE)

3.1. Classificação de Áreas

- a) Possui demarcação de áreas controladas? sim / não
- b) Sinalização nos pontos de acesso?
 - i) Possui? sim / não
 - ii) Legível? sim / não
 - iii) Em português? sim / não
- c) Possui demarcação de áreas supervisionadas? sim / não

b) Sinalização nos pontos de acesso?

- | | |
|---------------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Legível? | sim / não |
| iii) Em português? | sim / não |

3.2. Regulamentos e Supervisão

a) Os regulamentos e instruções estão escritos em português? **sim / não**

b) Os regulamentos incluem níveis de investigação e níveis autorizados e procedimentos a seguir quando um nível é excedido? **sim / não**

c) Os trabalhadores têm o conhecimento sobre estes regulamentos? **sim / não**

d) Os trabalhadores têm adequada supervisão para assegurar cumprimento das regras, procedimentos, medidas de proteção e medidas de segurança? **sim / não**

e) Possui procedimentos específicos para:

I - Operação do acelerador

- | | |
|----------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Adequado? | sim / não |
| iii) Executa? | sim / não |

II – Carga de produto

- | | |
|----------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Adequado? | sim / não |
| iii) Executa? | sim / não |

III – Resposta a alarmes

- | | |
|----------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Adequado? | sim / não |
| iii) Executa? | sim / não |

IV – Reparos e manutenção dos sistemas de segurança

- | | |
|----------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Adequado? | sim / não |
| iii) Executa? | sim / não |

V – verificação do funcionamento

- | | |
|----------------------|------------------|
| i) Possui? | sim / não |
| ii) Adequado? | sim / não |

iii) Executa? sim / não

3.3. Monitoramento

a) Possui dosímetros pessoais (monitores individuais de dose) fornecidos por laboratório credenciado? sim / não

b) Os dosímetros são:

i) usados adequadamente? sim / não

ii) calibrados? sim / não

iii) trocados com a frequência correta? sim / não

c) As exposições pessoais estão dentro dos limites? sim / não

d) Os monitores de área fixos e portáteis são:

i) apropriados? sim / não

ii) calibrados? sim / não

iii) aferidos com micro-fonte radioativa antes do uso? sim / não

iv) verificados quanto à carga das baterias? sim / não

e) Os levantamentos radiométricos realizados pelo Serviço de Radioproteção indicam que, a blindagem da sala de irradiação e os níveis de taxa de dose estão de acordo com os níveis autorizados? sim / não

Resultado do Levantamento Radiométrico realizado durante a inspeção:

Monitor de radiação utilizado: (Fabricante, modelo, no. de série)

Data da última calibração:

Os valores medidos pelo inspetor são concordantes com os registrados pelo Serviço de Radioproteção? sim / não

Registrar e documentar alguma diferença significativa encontrada e possíveis procedimentos para soluções.

4 – VERIFICAÇÃO DA PROTEÇÃO DO PÚBLICO

4.1. Controle de visitantes

a) Os visitantes são acompanhados por trabalhador (IOE) autorizado na área controlada? sim / não

b) Os visitantes recebem instruções adequadas para entrar na área controlada? sim / não

c) Possui controle adequado para entrada e saída nas áreas supervisionadas? sim / não

4.2. Fontes de exposição

a) Possui blindagens e outras medidas de proteção para restringir exposições do público? sim / não

b) As plantas e a colocação dos equipamentos estão de acordo com o descrito no Plano de Radioproteção e consideram adequadamente as áreas de público adjacentes a instalação? sim / não

4.3. Monitoramento da exposição de público

a) Possui levantamentos radiométricos periódicos das áreas de público adjacentes, realizado por trabalhador (IOE) qualificado? sim / não

b) Estes levantamentos mostram que as blindagens da sala de irradiação esta de acordo com os limites autorizados? sim / não

c) Registro de medidas efetuadas durante a inspeção:

Monitor de radiação utilizado: (Fabricante, modelo, no. de série)

Data da última calibração:

Os valores medidos pelo inspetor são concordantes com os registrados pelo Serviço de Radioproteção? sim / não

Registrar e documentar alguma diferença significativa encontrada e possíveis procedimentos para soluções.

5 – RESPOSTAS A EMERGÊNCIAS

5.1. Plano de emergência

a) Possui Plano de Emergência? sim / não

b) O Plano de Emergência é periodicamente revisto e atualizado? sim / não

c) O Plano de Emergência esta baseado nas lições aprendidas em experiências de operação e acidentes em instalações semelhantes? sim / não

5.2. Treinamento e simulações

a) Os IOEs envolvidos na implementação do Plano de Emergência receberam treinamento específico? sim / não

b) As medidas de atendimento ao Plano de Emergência são exercitadas periodicamente em conjunto com autoridade oficial de resposta a emergência? sim / não

c) Data do último exercício:

ANEXO 3

CLASSIFICAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE ACELERADORES					
INSTITUIÇÃO	ACELERADOR	FEIXE	ENERGIA	CLASS. CNEN	CLASS. IAEA
CBPF	Linear	elétron	4 MeV	Grupo IX	Categoria II
PUC/RJ	Van de Graaff	Próton, Deuteron, He ⁺ , C ⁺ , N ⁺ , N ⁺²	3,8 MeV	Grupo IX	Categoria II
	Tandem	elétron	30 KeV	Grupo X	Categoria I
IEN	Ciclotron – CV 28	Alfa, Próton, Deuteron, H ₃	24 MeV	Grupo IX	Categoria II
	Ciclotron–RDS111	íons negativos	30 MeV	Grupo X	Categoria I
UFRJ-LaCAM	Pelletron	Próton	1,7 MeV	Grupo IX	Categoria II
IPEN	Ciclotron	Próton	30 MeV	Grupo IX	Categoria II
	Ciclotron – CV 28	Alfa, Próton, Deuteron, H ₃			
	Linear	elétron	1,5 MeV	Grupo IX	Categoria II
USP-LAMFI	Pelletron	H, Li, B, C, O, F, Si, Cl	1,6 MeV	Grupo IX	Categoria II
USP-LAL	Microtron	elétron	38 MeV	Grupo IX	Categoria II
UNICAMP-LNLS	Sincrotron	elétron/raios-X	1,37 GeV	Grupo IX	Categoria II
UFRGS-LII	Tandem	elétron	3,0 MeV	Grupo IX	Categoria II

O Brasil possui em suas Instituições de pesquisa aceleradores classificados nas categorias I e II, de acordo com a classificação internacional da publicação *Safety Series 107* da IAEA (1992), ou nos grupos IX e X, segundo a norma nacional (CNEN, 1998).

- *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.