

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD

**Ailson Soares Alves
Rubens Ricardo Arantes**

Análise de Segurança no Laboratório de Radioproteção na Indústria

**Rio de Janeiro
2012**

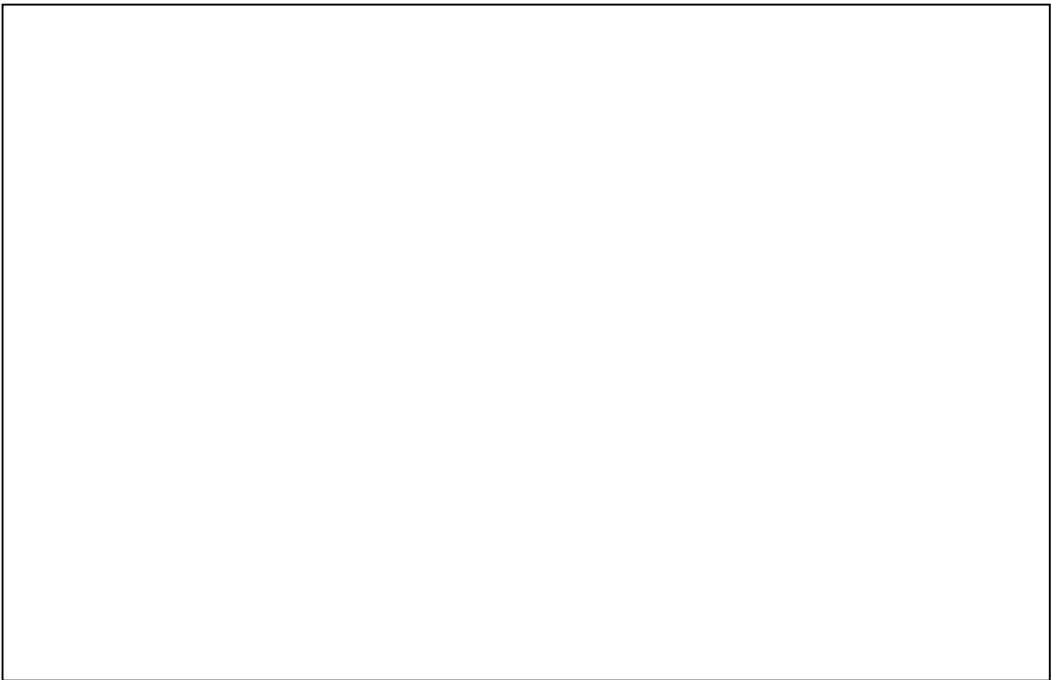
**Ailson Soares Alves
Rubens Ricardo Arantes**

Análise de Segurança no Laboratório de Radioproteção na Indústria

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de Especialista em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas, pelo Programa de Pós-Graduação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, em parceria com a Agência Internacional de Energia Atômica.

Orientador: Dr. Manuel Lourenço – IRD/CNEN

Rio de Janeiro – Brasil
Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de energia Nuclear
Coordenação de Pós-Graduação
Setembro de 2012



**Ailson Soares Alves
Rubens Ricardo Arantes**

Análise de Segurança no Laboratório de Radioproteção na Indústria

Rio de Janeiro, 01 de Outubro de 2012.

Prof. Dr. Manuel Lourenço

Prof.^a Dr.^a Adriana Teixeira Ramalho

Prof. Dr. João Carlos Leocadio

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação do Dr. Manuel Lourenço.

AGRADECIMENTOS

Ao DEUS que existe dentro de nós, que nos deu a convicção de que não há gigante Golias que a pedra não derrube.

Às nossas esposas, filhos e familiares, que nos apoiaram durante toda essa jornada, não nos deixando desistir, mostrando o verdadeiro sentido das palavras amor e união.

Ao nosso grande amigo e orientador Manuel Lourenço, que mesmo em momento de grande perda e dor, não nos abandonou, pelo contrário, assumiu a responsabilidade e transmitiu de forma irrestrita todo seu conhecimento, colocando mais uma vez em prática um dos ensinamentos de seu ente querido, como pode nos dizer.

À direção do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, pela oportunidade concedida para participação no curso de Pós-Graduação do IRD/AIEA.

A todos os professores, coordenadores e secretárias, que nos ajudaram nesta caminhada, com conhecimentos, dedicação e atenção.

A todos nós, formandos da turma do curso de Pós-graduação de 2012 que, com êxito, concluímos o percurso. Isso é a prova de que todos, sem exceção, podemos ir ainda mais longe. Parabéns!

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Nosso muitíssimo obrigado!

RESUMO

O Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD é utilizado para treinamentos, aulas práticas, visitas técnicas e cursos nacionais e internacionais da AIEA. No presente trabalho, foi realizada uma avaliação qualitativa da radioproteção e uma análise semiquantitativa de segurança, e apresentadas as possíveis correções, com objetivo de garantir o menor risco possível na utilização do Laboratório. Para isso foi aplicado o método de Análise de Camadas de Proteção (LOPA), que visa a detectar irregularidades que possam vir a ocasionar acidentes, e propor a solução imediata das mesmas, com base nas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e recomendações internacionais. De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, foram sugeridas melhorias, com a intenção de tornar o Laboratório uma verdadeira referência, em termos de segurança radiológica.

Palavras chave: Análise de segurança. Segurança radiológica. Camada de proteção (LOPA). Cenários de acidentes. Frequência do evento.

ABSTRACT

The Laboratory of Radiation Protection in Industry of IRD is used for training, practical lessons, technical visits and national and international courses of the IAEA. In the present study was carried out a qualitative evaluation of the radiation protection and a semiquantitative analysis of safety, and presented the possible corrections, in order to ensure the lowest possible risk in the use of the laboratory. For this purpose the method of Layer of Protection Analysis (LOPA) was applied, which aims to detect irregularities that may cause accidents, and propose the immediate solution of them, on the basis of the norms of National Commission of Nuclear Energy (CNEN) and international recommendations. According to the results obtained in this study were suggested improvements, with the intention to make the laboratory a real reference in terms of radiation safety.

Keywords: Security analysis. Radiation safety. Layer of protection analysis (LOPA). Accident scenarios. Frequency of event.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO	11
1.2 RELEVÂNCIA	11
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.3 MEDIDORES NUCLEARES	12
2.2 IRRADIADORES DE GAMAGRAFIA INDUSTRIAL	13
2.3 PARA-RAIOS RADIOATIVOS	14
2.4 PERFILAGEM DE POÇOS	14
2.5 DETECTORES DE FUMAÇA	15
2.6 PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA RADIOLÓGICA	15
2.6.1 OBJETIVOS GERAIS DA SEGURANÇA RADIOLÓGICA	15
2.6.2 FILOSOFIA DE SEGURANÇA	15
2.7 ANÁLISES DE SEGURANÇA	16
2.7.1 ANÁLISES DE CAMADA DE PROTEÇÃO - LOPA	17
2.7.2 IDENTIFICANDO CONSEQUÊNCIAS E SEVERIDADES	19
2.7.3 SELECIONANDO CENÁRIOS DE ACIDENTES	19
2.7.4 DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS DE ACIDENTES - LOPA	21
2.7.5 IDENTIFICANDO A FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR - LOPA	21
2.7.6 SELEÇÃO DAS TAXAS DE FALHAS - LOPA	22
2.7.7 IDENTIFICANDO CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES - LOPA	23
2.7.8 REGRAS PARA IPL - LOPA	23
2.7.8.1 EFICIÊNCIA	23
2.7.8.2 INDEPENDÊNCIA	24
2.7.8.3 AUDITABILIDADE	25
2.7.8.4 AVALIAÇÃO DO IPL	25
2.7.8.5 VALOR DA PFD PARA UMA IPL	25
2.7.8.6 IPL PASSIVA	25
2.7.8.7 IPL ATIVA	25
2.7.8.8 IPL HUMANA	26
2.7.8.9 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DOS CENÁRIOS	26
2.7.8.10 ESTIMANDO O RISCO	27
2.7.8.11 USANDO A LOPA PARA TOMAR A DECISÃO DO RISCO	28
2.8 INSTALAÇÃO PARA ANÁLISE - LOPA	29

2.8.1 LABORATÓRIO DE radioproteção NA indústria DO IRD/CNEN	29
3. METODOLOGIA	30
3.1 ESTUDO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DE PROTEÇÃO radiológica NO LABORATÓRIO DE radioproteção NA indústria DO IRD	30
3.2 ANÁLISE DE SEGURANÇA	30
3.3 INVENTÁRIO DE FONTES radioativas	30
4. RESULTADOS	35
4.1 AVALIAÇÃO	35
4.2 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SEGURANÇA – LOPA	35
4.3 CENÁRIOS	38
4.3.1 CENÁRIO 1	38
4.3.2 CENÁRIO 2	39
4.3.3 CENÁRIO 3	40
4.3.4 CENÁRIO 4	41
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
5.1 CONCLUSÕES	42
5.2 RECOMENDAÇÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das Instalações Radiativas no País.....	10
Figura 2 - Evolução do número de instalações no país.....	11
Figura 3 - Medidores Nuclear do Laboratório	12
Figura 4 - Irradiadores do Laboratório	13
Figura 5 - Para-Raios.....	14
Figura 6 - Sonda de Medição	14
Figura 7 - Etapas da LOPA.....	18
Figura 8 - Informações da HAZOP e LOPA	20
Figura 9 - Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD/CNEN.....	20
Figura 10 - Vista lateral do Laboratório.....	42
Figura 11 - Blindagem de urânio exaurido.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Documentação e cálculos de cenários para a LOPA	27
Tabela 2- Inventário de Fontes.....	31
Tabela 3- Classe de probabilidades de ocorrência de eventos danosos.....	32
Tabela 4- Categoria da consequência (Amplitude da consequência)	33
Tabela 5- Matriz de classificação de risco	34
Tabela 6- Matriz de risco com zonas individuais de ação.....	34
Tabela 7- Cenários para a aplicação da LOPA no laboratório de radioproteção na indústria	36
Tabela 8- Tabela de frequências para cada evento iniciador.....	36
Tabela 9- Camadas de Proteção Independentes e suas respectivas Probabilidades de Falha na demanda para cada Cenário	37
Tabela 10- Tabela-resumo do cenário 1	38
Tabela 11- Tabela-resumo do cenário 2	39
Tabela 12- Tabela-resumo do cenário 3	40
Tabela 13- Tabela-resumo do cenário 4	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Amplitude da Consequência
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALARA	<i>As low as reasonably achievable</i> – tão baixo quanto razoavelmente praticável
APP	Análise Preliminar de Perigos
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
FCC	Falha de Causa Comum
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> – Análise de Perigos e Operabilidade
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Committee on Radiological Protection</i>
IOE	Indivíduo ocupacionalmente exposto
IPL	<i>Independent Protection Layer</i> – Camada de Proteção Independente
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> – Análise de Camada de Proteção
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
PO	Probabilidade de Ocorrência

1. INTRODUÇÃO

A utilização das radiações ionizantes em práticas médicas, industriais e de pesquisa, tem como grande oponente, em todo mundo, a opinião pública. As bombas de Hiroshima e Nagasáki, os testes nucleares aéreos e subterrâneos, bem como alguns acidentes relativamente graves, ocorridos ao longo dos últimos 50 anos, vêm sendo responsabilizados pela maneira sombria com que o tema nuclear é percebido pela população. O fato da radiação ionizante não poder ser diretamente detectada pelos cinco sentidos e a falta de conhecimento básico sobre suas propriedades, contribuem para consolidar, cada vez mais, sob a forma de medo, a rejeição ao emprego das radiações ionizantes para fins pacíficos.

Para reverter esse quadro e permitir que a sociedade se beneficie das inúmeras vantagens que a tecnologia nuclear oferece, é preciso colocar na correta perspectiva os reais riscos associados à radiação ionizante, bem como transmitir conhecimentos sobre os requisitos de segurança e proteção radiológica a serem adotados de modo a torná-los insignificantes.

O uso das radiações ionizantes vem se desenvolvendo rapidamente no mundo. Na área da saúde, através de radiodiagnósticos, tratamento de patologias, medicina nuclear e radioterapia. Na indústria, no controle de qualidade, através das práticas de radiografia industrial, medidores nucleares, perfilagem de poços de petróleo, aceleradores de partículas e irradiadores de grande porte.

No Brasil, de acordo com levantamento realizado por MARECHAL (2009), utilizando o banco de dados da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, as aplicações das radiações ionizantes correspondiam a um total de 3.721 instalações radiativas no país, ilustradas na Figura 1.

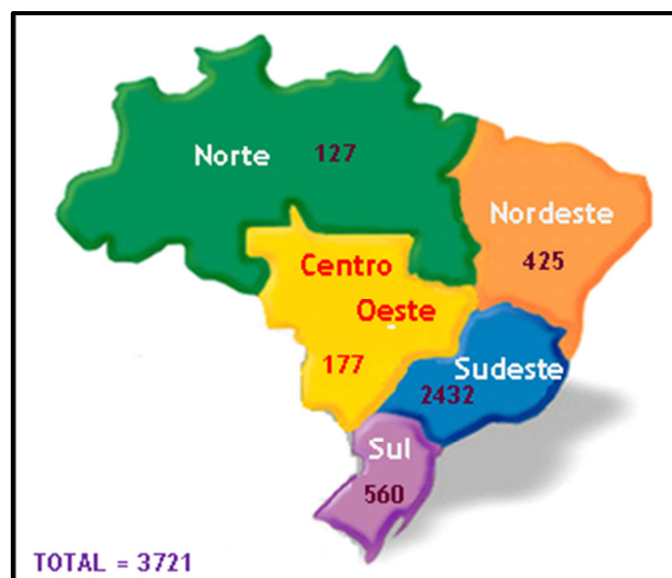


Figura 1 - Distribuição das instalações radiativas no país.

De acordo com a referência acima, pode-se notar uma evolução do número de instalações no país, entre os anos de 2004 a 2009, como mostra a Figura 2.

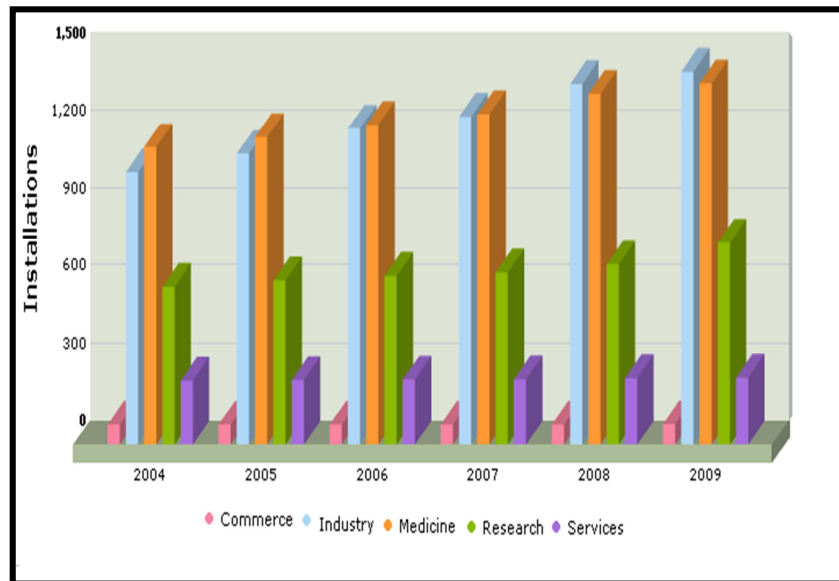


Figura 2 - Evolução do número de instalações no país.

1.1 OBJETIVO

O objetivo global do presente trabalho foi o de realizar uma avaliação das condições de segurança radiológica do Laboratório de Radioproteção na Indústria, utilizando para tal um método semiquantitativo de análise probabilística de segurança, mostrando os riscos das práticas realizadas neste laboratório. Esse método é uma ferramenta de engenharia usada para assegurar que os riscos das práticas sejam suficientemente mitigados a um nível aceitável.

1.2 RELEVÂNCIA

A relevância deste trabalho está na contribuição para o preenchimento dos requisitos necessários para o licenciamento do Laboratório de Indústria do IRD junto à CNEN, na aplicação prática da filosofia de segurança radiológica pregada pela AIEA e na consequente elevação do referido laboratório a um padrão de segurança que garanta a manutenção dos equipamentos em condições de segurança física e radiológica, sem danos à saúde dos IOE (indivíduos ocupacionalmente expostos) e indivíduos do público.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.3 MEDIDORES NUCLEARES

Os medidores nucleares são equipamentos de baixa complexidade, que permitem a obtenção de dados em tempo real e podem ser utilizados para controle de sistemas e processos industriais.

O Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD possui os seguintes medidores nucleares, medidor nuclear de nível, medidor nuclear de densidade, e medidor nuclear de umidade, conforme Figura 3.



Figura 3 – Medidores nucleares do Laboratório do IRD: (a) medidor nuclear de nível; (b) medidor nuclear de densidade; e (c) medidor nuclear de umidade.

2.2 IRRADIADORES DE GAMAGRAFIA INDUSTRIAL

Os irradiadores de gamagrafia são equipamentos que possuem em seu interior material radioativo capaz de emitir constantemente radiação gama, muito utilizado em radiografia convencional nas indústrias.

O Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD possui os seguintes irradiadores: cobalto-60; selênio-75; e irídio-192, conforme apresentado pela Figura 4. Devido à utilização para fins de ensino e prática, os irradiadores de irídio-192 e selênio-75 possuem fontes frias.

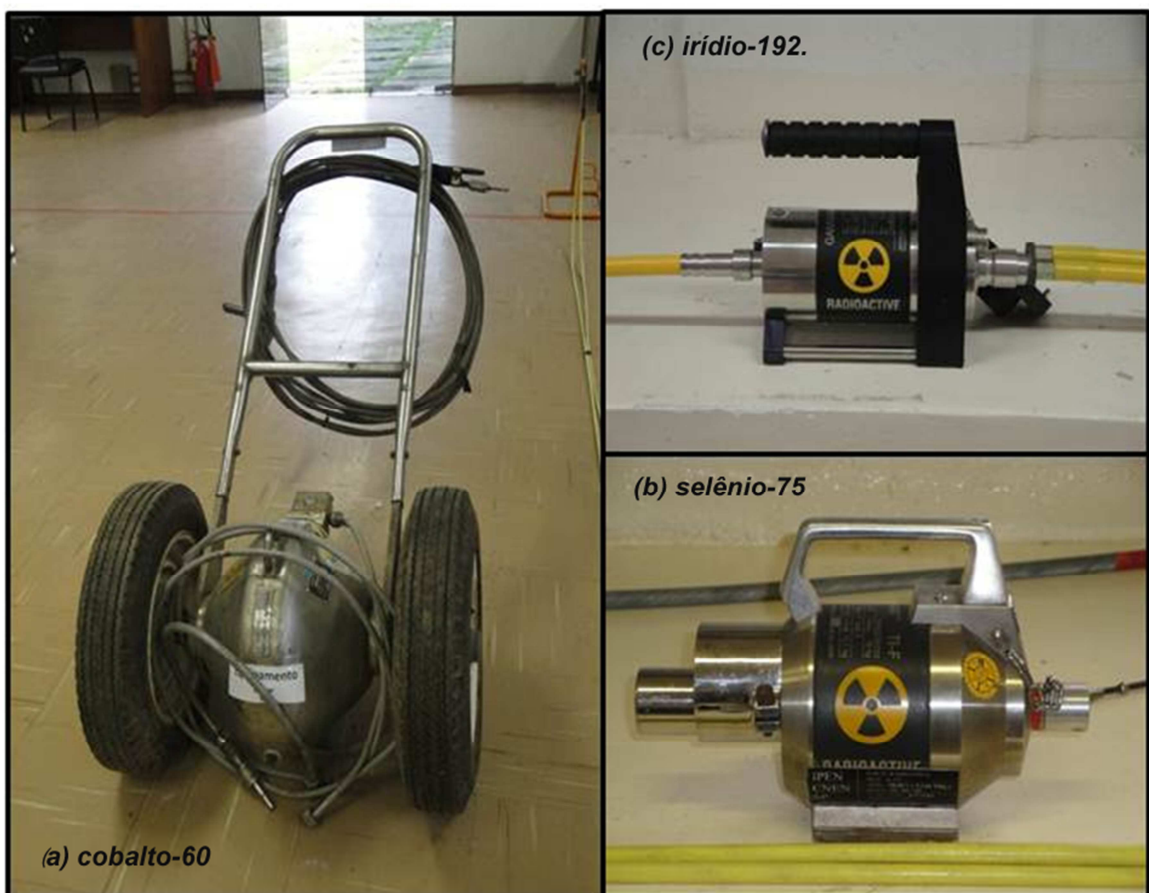


Figura 4 – Irradiadores do Laboratório: (a) cobalto-60; (b) selênio-75 e (c) irídio-192.

2.3 PARA-RAIOS RADIOATIVOS

Os para-raios radioativos, apresentados pela Figura 5, tiveram sua fabricação autorizada no Brasil em 1970. Porém, em 1989, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por meio da Resolução Nº 4/89, suspendeu a produção e instalação desse modelo de captador, recomendando a retirada de uso, tornando-se isso um problema até os dias atuais, devido a serem considerados rejeito radioativo.



Figura 5 – Para-raios.

2.4 PERFILAGEM DE POÇOS

No setor petrolífero, as técnicas nucleares são utilizadas na perfilagem de poços de petróleo, ajudando a determinar a localização, quantidade e produtividade de óleo e gás do poço, empregando sonda de medição, apresentada pela Figura 6, que se utilizam de fontes radioativas de césio-137, cobalto-60 e amerício-berílio-241.



Figura 6 – Sonda de medição para perfilagem.

2.5 DETECTORES DE FUMAÇA

São aparelhos encarregados de fazer a vigilância permanente de um local, usando uma câmara de ionização e uma fonte de radiação ionizante (amerício-241) para detectar fumaça.

2.6 PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA RADIOLÓGICA

O principal objetivo da proteção radiológica é proporcionar um padrão de proteção ao ser humano sem limitar os benefícios decorrentes da utilização das radiações. As recomendações publicadas pelo Comitê Internacional de Proteção Radiológica – ICRP (1991) servem de subsídio para a elaboração de normas e regulamentos emitidos pelos órgãos nacionais de regulamentação de diversos países. As práticas recomendadas pela IAEA têm como base experiências acumuladas através da ocorrência de acidentes no mundo inteiro e em trabalhos técnico-científicos desenvolvidos por “*experts*” no assunto. O gerenciamento administrativo da atividade e as filosofias a serem adotadas para o desenvolvimento mais seguro do trabalho durante as operações também estão presentes. Em relação às instalações radiativas e nucleares brasileiras, cabe à Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN emitir normas e regulamentações pertinentes ao uso de materiais radioativos e de fontes de radiação ionizante, assim como estabelecer as normas de proteção radiológica (CNEN-NN-3.01, 2005).

2.6.1 OBJETIVOS GERAIS DA SEGURANÇA RADIOLÓGICA

Utilizar-se de medidas que visam proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados por radiação ionizantes, sem limitar os benefícios decorrentes de sua utilização é um dos meios para atingir os principais objetivos da proteção radiológica, evitar ocorrência de efeitos determinísticos e diminuir a probabilidade de ocorrência dos efeitos estocásticos. Para isso baseia-se em três princípios básicos: justificação, otimização e limitação de doses.

Limitaremos apenas no princípio da otimização, para garantir que a probabilidade de eventos que possam acarretar exposições significantes, assim como a magnitude de tais exposições, seja mantida tão baixa quanto razoavelmente possível, com fatores econômicos e sociais sendo levados em consideração (ALARA).

2.6.2 FILOSOFIA DE SEGURANÇA

A ideia de se estabelecer uma cultura de segurança em um projeto pode soar simples, porém difícil de implementar caso os indivíduos envolvidos não

estejam completamente comprometidos com a mesma. Em uma cultura de segurança, esta não é uma prioridade que pode ser mudada dependendo das exigências da situação; ao contrário, a segurança é um valor que está ligado a todas as outras prioridades. Porém, isso é mais fácil ser dito do que ser feito. Em outras palavras, a segurança deve ser componente integrante de cada elemento do empreendimento. Segurança não é algo que possa ser isolado, devendo estar ligada de modo consistente a todos os aspectos do trabalho, quer se referindo à produtividade, qualidade, lucratividade ou eficiência.

O projeto de uma instalação de radiação deve ser determinado por fatores tais como o propósito da operação e a categoria da instalação. Portanto, não é possível recomendar-se um projeto de sistema específico que iria alcançar o nível necessário de segurança. Contudo, é possível expor vários princípios que devem ser aplicados, se necessário em conjunto, para alcançar e manter a confiabilidade necessária. Os princípios fundamentais que devem ser observado são a “defesa em profundidade”, a “redundância”, a “diversidade”, a “independência” e a “análise de segurança”.

2.7 ANÁLISES DE SEGURANÇA

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 para mitigar os impactos adversos se um acidente ocorrer. Isto é, a determinação do risco auxilia substancialmente a tomada de decisão sobre a segurança do projeto e operação de plantas de processo. Além disso, a quantificação do risco associado à liberação de uma substância perigosa tornou-se um pré-requisito para um planejamento eficiente de emergências (SUMMERS, 2003).

Métodos quantitativos de risco são usados para avaliar riscos potenciais quando métodos qualitativos, como a Análise Preliminar de Perigos (APP) e a Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP), não conseguem fornecer um entendimento adequado dos riscos.

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

A direção da instalação é obrigada a demonstrar à autoridade regulatória 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 é necessária e 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” são obrigadas a 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.

2.7.1 ANÁLISES DE CAMADA DE PROTEÇÃO - LOPA

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma técnica simplificada de análise de riscos, que é elaborada em sequência ao uso de uma técnica qualitativa de identificação de perigos, como o HAZOP ou APP. Pode ser definida como uma técnica semiquantitativa, pois gera uma estimativa do risco, sendo seus resultados deliberadamente conservadores. Um estudo que usa uma análise quantitativa de risco completa (árvore de eventos, árvore de falhas, etc.) deve apresentar um menor risco associado quando comparado aos resultados da LOPA. Mas apesar de apresentar um risco maior, esse valor é consistente, pois a LOPA utiliza categorias em ordem de magnitude para a frequência do evento iniciador, severidade das consequências e probabilidade de falhas para camadas de proteção independente (IPL), para calcular o risco aproximado de um cenário (CCPS, 2001).

Dessa forma, a LOPA é uma metodologia que fica entre uma simples técnica de análise qualitativa e uma técnica de análise quantitativa mais elaborada.

Assim como muitos outros métodos de análise de perigos, a primeira proposta da LOPA é determinar se há números de camadas de proteção independentes (IPL) suficientes num cenário de acidente.

A LOPA estabelece se há IPLs suficientes para controlar o risco em dado cenário de acidente. Se o risco estimado de um cenário não for aceito, IPLs adicionais devem ser acrescentadas. Porém, esta técnica não informa quais IPLs devem ser acrescentadas ou que projeto deve ser escolhido. O cenário é tipicamente identificado durante a análise de perigos, na 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, que estão descritos abaixo e resumidos, conforme Figura 7 (CCPS, 2001).

- Passo 1: Identificar consequências para proteger os cenários. A consequência é identificada durante a análise qualitativa de perigos, como HAZOP.
- 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 IPLs. Outros fatores podem ser incluídos durante os cálculos, dependendo da definição de consequência (impacto do evento). Aproximações incluem fórmulas aritméticas e métodos gráficos.

- 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.

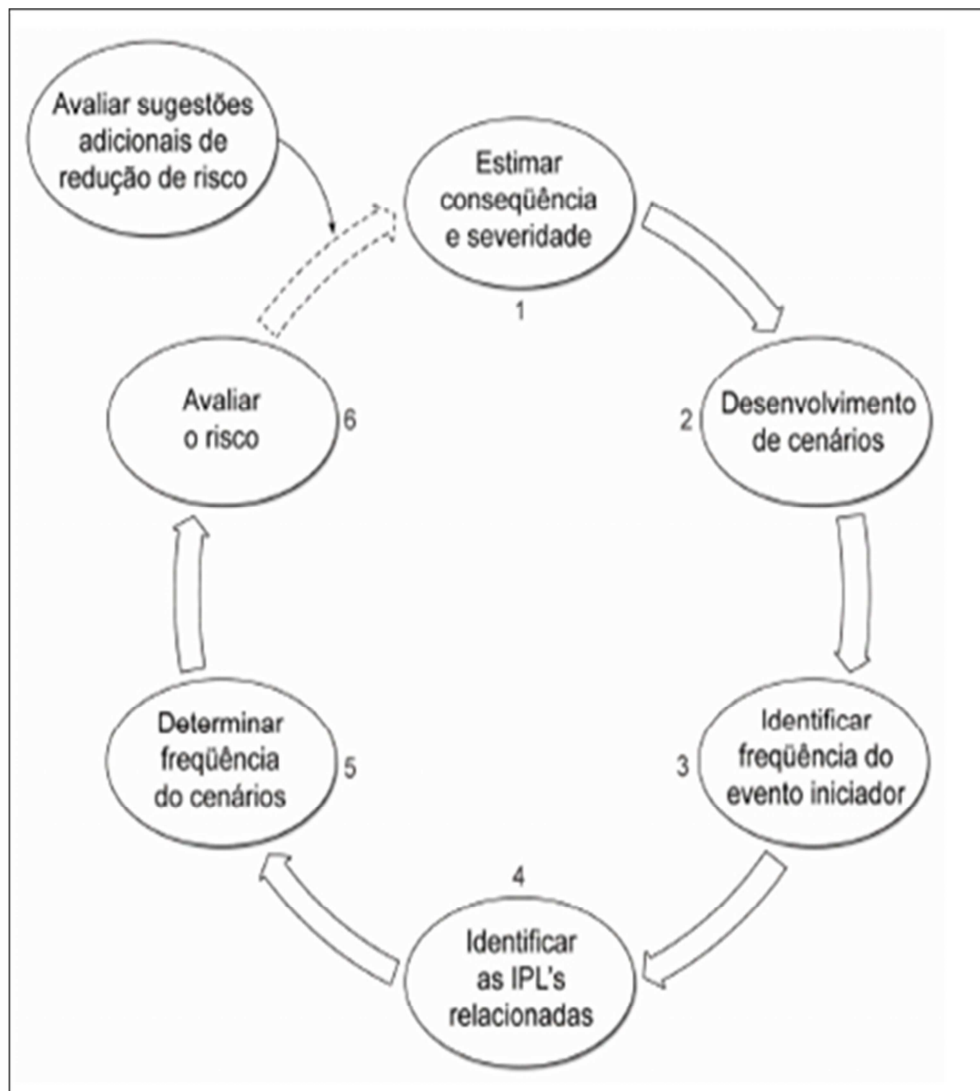


Figura 7 – Etapas da LOPA.

2.7.2 IDENTIFICANDO CONSEQUÊNCIAS E SEVERIDADES

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 implementar a LOPA é como definir as consequências finais. Algumas empresas avaliam até a perda de material, outras estimam o impacto final em termos de prejuízo ou danos.

2.7.3 SELECIONANDO CENÁRIOS DE ACIDENTES

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 inicia 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 proposta de uma avaliação de perigos é identificar, avaliar e documentar os perigos associados ao 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 pegar 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 8 mostra como os dados obtidos na HAZOP podem ser usados na LOPA, e assim identificar os cenários (CCPS, 2001).

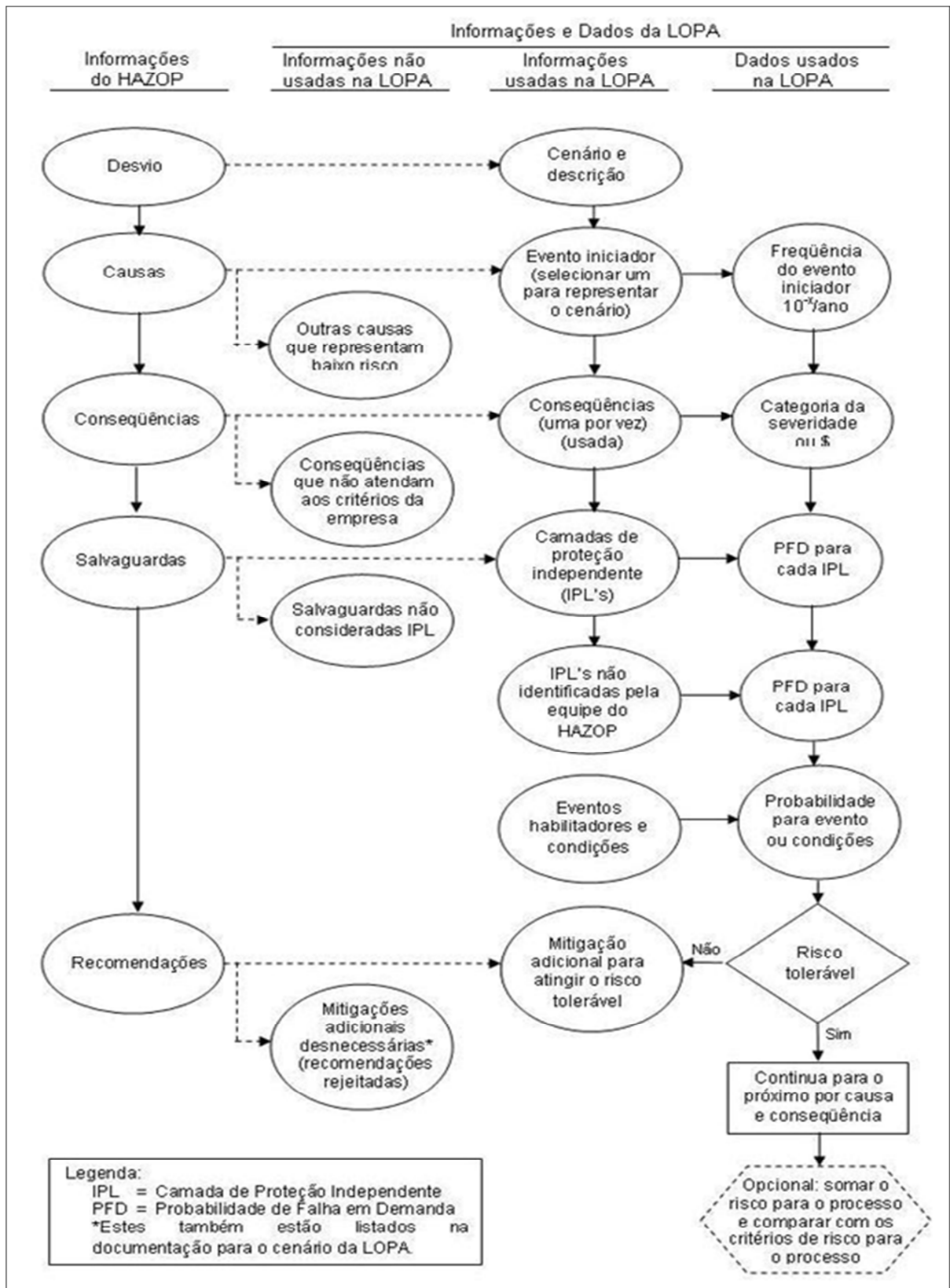


Figura 8 – Informações da HAZOP e LOPA.

2.7.4 DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS DE ACIDENTES - 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.

2.7.5 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 ou quebra 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, sobrepessão, 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 ocorrência do cenário. 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).

2.7.6 SELEÇÃO DAS TAXAS DE FALHAS - 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.

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 (HYATT, 2002):

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);
- *OREDA - Offshore Reliability Data* (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 mudanças 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.

2.7.7 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 com 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;
- Preventivas ou mitigadoras.

2.7.8 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.

2.7.8.1 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 as proteções não podem sempre detectar condições e gerar uma ação específica, não será uma IPL;
- Para ser IPL, as proteções têm que detectar condições em tempo de 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.

2.7.8.2 INDEPENDÊNCIA

O método da LOPA usa independência para assegurar que os efeitos do evento iniciador, ou de outras IPLs, não interagem 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 verdade (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 sequência de eventos. Isso se justifica porque o erro pode ser devido a doença, incapacidade (drogas ou álcool), distração, trabalho sobrecarregado, inexperiência, instruções de operação imperfeita, 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.

2.7.8.3 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.

2.7.8.4 AVALIAÇÃO DO 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.

2.7.8.5 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;
- Enfraquecimento da intervenção humana para ser eficiente, etc.

2.7.8.6 IPL PASSIVA

Uma IPL passiva não é requerida para 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.

2.7.8.7 IPL ATIVA

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.

2.7.8.8 IPL HUMANA

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.

2.7.8.9 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DOS CENÁRIOS

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

- CÁLCULO GERAL

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 2.7.5 é multiplicada pelo produto das PFDs da IPL.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \quad (2-1)$$

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^{th} IPL que protege contra a consequência C para o evento iniciador i

Tal equação é aplicada para situações de baixa demanda. O resultado da Equação 2-1 pode ser usado como entrada para comparação do risco calculado para o cenário dos critérios de tolerância de risco para os métodos de tomada de decisão.

2.7.8.10 ESTIMANDO O RISCO

Nesta etapa, deve-se calcular o risco com os valores obtidos nas etapas anteriores. A Tabela 1 exemplifica como documentar e calcular o risco dos cenários (CCPS, 2001).

Tabela 1 - Documentação e cálculos de cenários para a LOPA.

Número do cenário	Zona de avaliação	Título do cenário	
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (/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:			

2.7.8.11 USANDO A LOPA PARA TOMAR A DECISÃO DO RISCO

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*).

Após os cenários terem sido desenvolvidos completamente e o risco existente ter sido estimado, chega-se à etapa de tomada de decisão, que é aplicada para determinar se o risco de um cenário está dentro dos critérios de tolerância, e se ele deve ser reduzido. Se o risco é inaceitável, camadas adicionais de proteção são necessárias.

Um fator importante na tomada de decisão em relação ao risco do cenário é o julgamento. Um julgamento requer uma boa compreensão do processo que está sendo analisado e da eficácia relativa das várias camadas protetoras encontradas durante a análise.

Três tipos básicos de julgamento do risco são usados conjuntamente com a LOPA:

- (1) Comparação do risco calculado com critérios de tolerância predeterminados. Este é o método predominante.
- (2) Julgamento feito por um especialista de risco qualificado.
- (3) Comparação relativa entre alternativas que competem para a redução do risco.

Para tomar alguma decisão, o resultado do risco calculado na etapa anterior é comparado a critérios que estão relacionados a uma medida de risco máximo tolerado. Essa comparação pode ser feita através de uma matriz, de um risco máximo tolerável por cenário (critérios numéricos), ou do requisito de um número específico de IPLs. Se o risco calculado for menor do que os critérios de risco, o cenário é julgado como tendo risco suficientemente baixo, ou como tendo suficiente mitigação (IPLs). Entretanto, se o risco excede os critérios, o cenário requer mitigação adicional (ou mais forte), ou requer mudanças no projeto, para que se torne inerentemente mais seguro, reduzindo a frequência ou a consequência do cenário, ou ainda, preferivelmente, eliminando-o.

Para o método de critérios numéricos, o risco máximo tolerado para um cenário é desenvolvido com base em uma variedade de categorias de consequência. Por exemplo, uma empresa pode estabelecer como seu critério a frequência máxima (por ano ou por 1.000 horas) de uma única fatalidade. Isto pode ser derivado de critérios como o risco individual máximo aos empregados. Outras empresas podem escolher a frequência de liberação de material, de incêndios, etc.

A análise custo-benefício também é frequentemente usada para comparar o valor de opções que competem entre si. Esta técnica suplementa as aproximações básicas de julgamento do risco. Por exemplo, é comum identificar mais de uma IPL potencial para reduzir o risco de um cenário. A análise custo-benefício pode ser usada para selecionar uma IPL entre diversas IPLs candidatas. Essa análise compara o custo da consequência evitada e sua frequência, com o custo da redução do risco que determinada IPL promove.

2.8 INSTALAÇÃO PARA ANÁLISE - LOPA

2.8.1 LABORATÓRIO DE RADIOPROTEÇÃO NA INDÚSTRIA DO IRD/CNEN

O laboratório, apresentado pela Figura 9, é o único na América Latina que contém a maioria dos equipamentos de todas as áreas de aplicação das radiações ionizantes na indústria. É utilizado para treinamento, aulas práticas, visitas técnicas, cursos nacionais e internacionais.

Podemos constatar a grande importância deste laboratório no ensino e treinamento quando observamos os dados apresentados nas figuras 1 e 2 da introdução deste trabalho. Ocorreram evoluções das aplicações das radiações ionizantes, principalmente nas áreas industriais, médicas e de pesquisas, importância esta que tende a aumentar com o crescimento do parque industrial em todo país.



Figura 9 – Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD/CNEN.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho desenvolve um estudo das condições de proteção e segurança radiológicas, utilizando para tanto a metodologia LOPA para a análise de segurança e a classificação, quanto ao risco, do Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD. Tal estudo visa a detectar irregularidades que possam vir a ocasionar acidentes e propor a solução imediata das mesmas, com base nas recomendações da LOPA, normas nacionais da CNEN e em recomendações internacionais.

3.1 ESTUDO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NO LABORATÓRIO DE RADIOPROTEÇÃO NA INDÚSTRIA DO IRD

Durante as visitas realizadas no Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD, foram coletados dados sobre os irradiadores de gamagrafia industrial, medidores nucleares, para-raios, detector de fumaça e das fontes existentes.

Foram observados os aspectos de proteção e segurança radiológica, tais como sinalizações, monitores de área, necessidade de proteção plástica do para-raios e da blindagem de urânio exaurido, presença ou não de cadeados no sistema de travamento de abertura dos obturadores dos medidores nucleares de umidade, e possíveis irregularidades no armazenamento de fontes radiativas. Foram também utilizados levantamentos radiométricos realizados anteriormente, os quais foram analisados tomando-se como referência a norma NN-3.01 da CNEN (2005). Os resultados assim obtidos forneceram os dados para a elaboração do presente trabalho.

3.2 ANÁLISE DE SEGURANÇA

O objetivo específico do presente trabalho é avaliar as condições de segurança radiológica do Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD, analisando os possíveis riscos que possam causar acidentes. 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.

3.3 INVENTÁRIO DE FONTES RADIOATIVAS

A Tabela 2 apresenta o inventário de fontes radioativas que se encontram localizadas no Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD.

Tabela 2 – Inventário de fontes radioativas do Laboratório.

Inventário de Fontes do Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD				
Fonte	Data atual	Atividade (TBq)	A/D *	No. de SÉRIE
Am-241	24/09/2012			10599
Am-241	24/09/2012	2,82E-08	4,71E-07	1262
Am-241	24/09/2012	2,82E-08	4,71E-07	3616
Am-241/Be	24/09/2012	3,09E-04	5,15E-03	x
Am-241/Be	24/09/2012	1,74E-03	2,90E-02	Ac-5019
Am-241/Be	24/09/2012	1,74E-03	2,90E-02	Ac-5017
Am-241/Be	24/09/2012	2,10E-03	3,49E-02	77D011
Am-241/Be	24/09/2012	5,67E-11	9,44E-10	77D010
Co-60	24/09/2012	7,59E-14	2,53E-12	2531
Co-60	24/09/2012	2,73E-03	9,09E-02	C797
Co-60	24/09/2012	3,09E-03	1,03E-01	Y-1015-2
Cs-137	24/09/2012	3,95E-03	3,95E-02	11337
Cs-137	24/09/2012	1,61E-03	1,61E-02	65352
Cs-137	24/09/2012	1,28E-04	1,28E-03	Ac-5019
Cs-137	24/09/2012	1,22E-04	1,22E-03	Ac-5017
Cs-137	24/09/2012	1,63E-04	1,63E-03	77D011
Cs-137	24/09/2012	1,63E-04	1,63E-03	77D010
Cs-137	24/09/2012	5,04E-07	5,04E-06	118S04
Cs-137	24/09/2012	5,56E-07	5,56E-06	117S04
Cs-137	24/09/2012			99S8
Cs-137	24/09/2012			101S08
Cs-137	24/09/2012	3,55E-08	3,55E-07	26S99
Cs-137	24/09/2012	1,55E-07	1,55E-06	3558GS
Cs-137	24/09/2012	2,07E-04	2,07E-03	3305GS
Cs-137	24/09/2012	1,18E-07	1,18E-06	3202GS
Cs-137	24/09/2012	1,18E-07	1,18E-06	3230GS
Cs-137	24/09/2012	1,18E-05	1,18E-04	3257
Cs-137	24/09/2012	5,87E-06	5,87E-05	3307GS
Cs-137	24/09/2012	1,18E-07	1,18E-06	3350GS
Cs-137	24/09/2012	5,89E-06	5,89E-05	3196GS
Cs-137	24/09/2012	1,55E-07	1,55E-06	3348GS
Cs-137	24/09/2012	7,76E-06	7,76E-05	3194GS
Cs-137	24/09/2012	7,35E-06	7,35E-05	3300GS
Cs-137	24/09/2012	1,47E-07	1,47E-06	3252GS
Cs-137	24/09/2012	1,18E-07	1,18E-06	3356GS
Cs-137	24/09/2012	5,89E-06	5,89E-05	3202GS
Ra-226	24/09/2012			X
Ra-226	24/09/2012			2891
Sr-90 (Y-90)	24/09/2012	1,10E-04	1,10E-04	3534
Sr-90 (Y-90)	24/09/2012	1,10E-04	1,10E-04	3536

* A/D = Relação Atividade da Fonte / Atividade de um radionuclídeo em uma fonte (valor tabelado).

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.

1º Passo: Classificar o evento quanto à probabilidade de ocorrência. Para tanto utilizamos o resultado da análise LOPA e a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Classe de Probabilidades de Ocorrência (PO) de Eventos Danosos.

CLASSE	DENOMINAÇÃO	PROBABILIDADE 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	$PO < < 10^0$	Ocorrência esperada uma ou outra vez em cada ano
G	Rotineira	$PO < < < 10^0$	Ocorrência esperada uma ou outra vez em cada mês

2º Passo: Determinar a amplitude da consequência (categoria da consequência). Para tal estudamos o cenário da LOPA e consultamos a Tabela 4, a seguir.

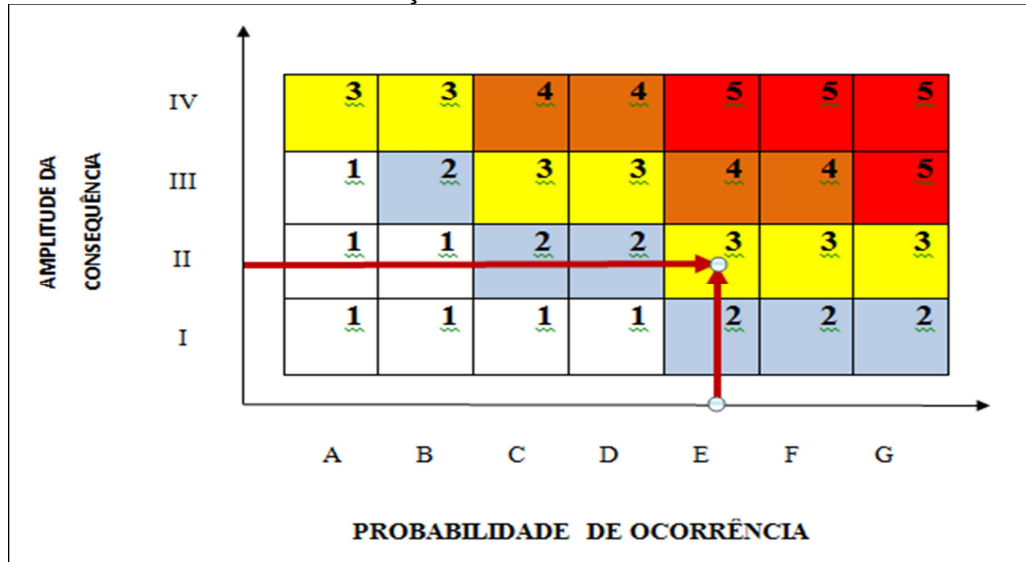
Tabela 4 - Categoria da consequência (Amplitude da consequência).

CLASSE	CARACTERÍSTICAS
I - DESPREZÍVEL	<p>Não provoca lesões e nem danos à saúde em funcionários e terceiros (não funcionários e público externo). 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 repercussão insignificante 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 é notado. 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 detectável ainda no processo ou pelo cliente, porém, 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. Alguma morte ou lesão incapacitante pode ocorrer em pessoas dentro da propriedade. Provoca danos severos ao meio ambiente interno à propriedade, às vezes irreversíveis, 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. Exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento catastrófico. Provoca parada de produção de longa duração. Provoca grandes alterações na qualidade do produto, passível de não ser detectada quando em processo. Pode provocar repercussão de grande monta entre os funcionários e terceiros dentro da propriedade e repercussão significativa na comunidade.</p>
IV - CATASTRÓFICA	<p>Pode provocar mortes, lesões graves, danos irreversíveis à saúde de funcionários, terceiros e membros da comunidade em geral. Pode provocar danos de grande monta e irreversíveis ao meio ambiente interno ou externo à propriedade. Pode 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 cenário, pode-se estimar o Nível de Risco desse evento danoso (Tabela 5).

Tabela 5 - Matriz de Classificação de Risco.



4º Passo: Determinação do grau de redução de risco.

A Tabela 6 foi adaptada de CCPS (2001), onde é feita uma combinação do Nível de risco e a frequência calculada, resultando numa célula que irá informar o grau de redução de risco requerido para o cenário.

Tabela 6 - Matriz de risco com zonas individuais de ação.

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

4. RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO

Foram avaliadas as condições de radioproteção e segurança radiológica do Laboratório de Radioproteção na Indústria do IRD. Verificou-se que a porta de acesso está sinalizada com adesivo de área supervisionada. Uma faixa vermelha no piso sinaliza o início da área controlada. Existe um livro onde é feito o registro de acesso de visitantes com as devidas anotações e um recipiente com canetas dosimétricas. Os equipamentos que contêm fontes radioativas encontram-se devidamente sinalizados e isolados.

O Laboratório possui também dois para-raios, um deles com fonte de Ra-226, contaminado, protegido por um saco plástico e outro com fonte de Am-241, íntegro. Armazenada precariamente em uma caixa plástica danificada, encontramos uma blindagem de irradiador com urânio exaurido, aparentemente também contaminado.

Dois medidores fixos de área com sondas estão posicionados em locais apropriados. Acessórios para resgate de fontes, tais como pinças, funis e blindagens são encontrados no laboratório. Um extintor de incêndio está localizado na entrada do prédio. As janelas com proteções de grade estão sinalizadas com adesivos de área controlada.

Levantamentos radiométricos realizados anteriormente foram analisados, estando de acordo com a norma NN-3.01 da CNEN (2005). Na visita realizada à instalação foram levantados os prováveis cenários de acidentes.

4.2 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SEGURANÇA – LOPA

Na análise de segurança do Laboratório de Indústria, foi escolhida para aplicação a LOPA, por ser aquela que melhor respeita as normas CNEN e recomendações da IAEA.

A LOPA é uma ferramenta para avaliar em um determinado cenário de acidente se o risco é aceitável. Caso não seja aceitável, permitirá adicionar camadas independentes de proteção (IPLs) para atingir o nível de segurança desejado.

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

Passos 1 e 2: Identificar cenários, eventos indicadores, eventos iniciadores e consequências, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Cenários para a aplicação da LOPA no laboratório de Radioproteção na indústria.

Cenário	Evento indicador	Evento iniciador
1	Roubo de material radiativo	Falha no controle de acesso
2	Incêndio	Falha no sistema de proteção contra incêndio
3	Erro de procedimento do IOE	Exposição da fonte inadvertidamente
4	Contato físico com o material contaminado	Proteção inadequada
Cenário	Evento iniciador	Consequência
1	Falha no controle de acesso	Exposição do público
2	Falha no sistema de proteção contra incêndio	Exposição do IOE e público
3	Exposição da fonte inadvertidamente	Exposição do IOE e público
4	Proteção inadequada	Contaminação do IOE e/ou público

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

Os dados para a frequência do evento iniciador foram estimados considerando o histórico de eventos da Instituição, analisando-se relatos de servidores presentes desde a fundação do IRD.

A Tabela 8 indica a frequência anual de falha para cada evento iniciador.

Tabela 8 - Tabela de frequências para cada evento iniciador.

Cenário	Evento iniciador	Frequência
1	Falha no controle de acesso	3×10^{-1}
2	Falha no sistema de proteção contra incêndio	1×10^0
3	Exposição da fonte inadvertidamente	1×10^{-1}
4	Proteção inadequada	2×10^{-1}

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

A Tabela 9 fornece as camadas de proteção independentes para cada cenário e suas respectivas probabilidades de falha na demanda. Os valores das PFDs foram retirados de CCPS (2001); IEC (1998) e IEC (2001).

Tabela 9 - Camadas de proteção independentes e suas respectivas probabilidades de falha na demanda para cada cenário.

Cenário	IPLs	PFD
1	Ação do segurança	1×10^{-1}
	Porta/Fechadura	$1,12 \times 10^{-1}$
2	Brigada de incêndio	1×10^{-1}
	Equipamento contra incêndio	4×10^{-3}
3	Ação do IOE	1×10^{-1}
	Monitor fixo de área	2×10^{-1}
4	Ação do IOE	1×10^{-1}
	Proteção plástica	1×10^0

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 os cenários são encontrados abaixo.

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

Para avaliar o risco dos cenários deve-se utilizar a Tabela 6, adaptada para este caso, já que não há nenhum parâmetro publicado. Tal Tabela indica se o risco calculado para os cenários necessita de mais alguma proteção.

4.3 CENÁRIOS

4.3.1 CENÁRIO 1

O cenário 1 é a ocorrência do roubo de material radioativo, causado por falha no controle de acesso. Uma falha nesse controle poderá causar exposição de pessoas do público. O resultado da LOPA indica **ação na oportunidade seguinte**, conforme apresentado pela Tabela 10.

Tabela 10 - Tabela-resumo do cenário1.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
1	Porta de acesso	Falha no controle de acesso	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição/Categoria)	Exposição do público/ Categoria III		
Evento Iniciador	Falha no controle de acesso		3×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			3×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Ação do segurança		1×10^{-1}	
Porta/Fechadura		$1,12 \times 10^{-1}$	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPLs		$1,12 \times 10^{-2}$	
Frequência da Consequência Mitigada			$3,36 \times 10^{-3}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Ação na oportunidade seguinte			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Construção de antessala			
Observações:			

4.3.2 CENÁRIO 2

O cenário 2 é a ocorrência de um incêndio, devido a queima da vegetação existente ao redor do Laboratório. Isso pode provocar uma falha na blindagem, que resultara na exposição do IOE e também do público. O resultado da LOPA indica **opcional (avaleie alternativa)**, conforme apresentado pela Tabela 11.

Tabela 11 - Tabela-resumo do cenário 2.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
2	Laboratório	Falha no sistema de proteção contra incêndio	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição do IOE /Categoria II		
Evento Iniciador	Falha no sistema de proteção contra incêndio		1×10^0
Frequência da Consequência não mitigada			1×10^0
Camadas de Proteção Independentes			
Brigada de incêndio		1×10^{-1}	
Equipamento contra incêndio		4×10^{-3}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's		4×10^{-4}	
Frequência da Consequência Mitigada			4×10^{-4}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaleie alternativa).			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Construção corta-fogo			
Observações:			

4.3.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 é a falha no procedimento do manuseio do equipamento, exposição da fonte radiativa inadvertidamente, tendo como consequência a exposição do IOE e/ou público, a dose indesejada. O resultado da LOPA indica **opcional (avaliar alternativa)**, conforme apresentado pela Tabela 12.

Tabela 12 - Tabela-resumo do cenário 3.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
3	Área Interna do Laboratório	Exposição da fonte inadvertidamente	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Exposição do IOE e público /Categoria II		
Evento Iniciador	Exposição da fonte inadvertidamente		1×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			1×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Ação do IOE		1×10^{-1}	
Monitor fixo de área		2×10^{-1}	
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's		2×10^{-2}	
Frequência da Consequência Mitigada			2×10^{-3}
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avaliar alternativa).			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Treino de procedimentos			
Observações:			

4.3.4 CENÁRIO 4

O cenário 4 é a contaminação (externa e interna) do IOE e/ou público, devido contato com material contaminado (para-raios, blindagem de urânio exaurido), por estarem com proteção inadequadas. O resultado da LOPA indica **opcional (avaliar alternativa)**, conforme apresentado pela Tabela 13.

Tabela 13 - Tabela-resumo do cenário 4.

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
4	Área Interna do Laboratório	Proteção inadequada	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
Consequência (Descrição / Categoria)	Contaminação do IOE e/ou público /Categoria II		
Evento Iniciador	Proteção inadequada		2×10^{-1}
Frequência da Consequência não mitigada			2×10^{-1}
Camadas de Proteção Independentes			
Ação do IOE		1×10^{-1}	
Proteção plástica		1×10^0	
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 alternativa).			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Proteção adequada			
Observações:			

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos pela técnica LOPA para o cenário 1, indicou para o critério de tolerância de risco a necessidade de uma ação na oportunidade seguinte.

Os resultados obtidos para os cenários 2, 3 e 4, obedecendo ao critério de risco utilizado, indicaram a necessidade de uma ação opcional.

A cultura de segurança é algo que devemos aplicar no nosso cotidiano. Por mais modesta que seja uma instalação, podemos verificar que possui riscos de acidentes.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Embasados nos resultados das análises realizadas, recomenda-se para o cenário 1, a construção de uma sala de controle, anterior à entrada atual do prédio do Laboratório, para um melhor e correto controle de acesso, delimitando de maneira correta e recomendada a área livre da área controlada. Em tal local, os visitantes receberiam todas as informações pertinentes, canetas dosimétricas e, se necessário, equipamentos de proteção individual (EPI), antes de entrarem na área controlada. Tal local serviria também como sala de guarda de equipamentos de medidas de radiação e como uma barreira na parte de segurança física, já que hoje a porta principal é em vidro *blindex* (Figura 9), o que não confere muita segurança física.

A recomendação apresentada para o cenário 2, é a construção, ou a continuação do caminho corta fogo em torno do Laboratório, já que o risco de incêndio existe, devido à vegetação que cresce muito perto do prédio (Figura 10).



Figura 10 – Vista lateral do Laboratório.

A avaliação do cenário 3, indicou como recomendação a reciclagem de treinamentos dos procedimentos. A experiência faz com que relaxemos, e com isso uma parte do procedimento é esquecida ou pulada. Um cronograma de treinamento é necessário. Mesmo que todos se sintam *experts*, ótimo, mas que estes ensinem de tempos em tempos aqueles que precisam. Uma forma de todos treinarem.

Recomenda-se para o cenário 4, a fabricação da proteção fixa adequada para o para-raios contaminado (Figura 5) e para a blindagem de urânio exaurido (Figura 11).



Figura 11 – Blindagem de urânio exaurido.

Devido às várias visitas, treinamentos, manutenções periódicas em equipamentos, recomendamos a divisão do Laboratório em salas, para melhor atendimento e separação por prática ou tipos de equipamentos.

Recomenda-se a construção de um banheiro com lavabo, para as diversas situações que possam surgir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ICRP, 1991. 1990 Recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica. ICRP publicação 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- CNEN, 2005, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Diretrizes Básicas de Radioproteção*, CNEN-NE-3.01, Rio de Janeiro, Brasil.
- MARECHAL, M.H., 2009, Licenciamento e Controle de Instalações Radiativas no Brasil, ENIR, www.cnen.gov.br.
- SUMMERS, A. E., 2003, "Introduction to Layers of Protection Analysis" , *Journal of Hazardous Materials*, v. 104, pp. 163-168.
- 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, *Guideline 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, *Guideline 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.
- 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.
- OREDA, 2002, *Offshore Reliability Data Handbook*, 4th edition, SINTEF Industrial Management, Trondheim, Noruega.
- SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E., 1983, *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, Albuquerque: Sandia National Laboratories.