

UMA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO
(LOPA) NA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIOS NAS ROTAS DE
CABOS DE DESLIGAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR

Camille Lelis Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
NUCLEAR.

Aprovada por:

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

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL DE 2007

ALVES, CAMILLE LELIS

Uma Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) na Avaliação de Risco de Incêndios nas Rotas de Cabos de Desligamento de um Reator Nuclear [Rio de Janeiro] 2007

XI, 73 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Nuclear, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Análise de Camadas de Proteção
2. Desligamento Seguro do Reator
3. Análise de Perigo de Incêndio
4. Proteção contra Incêndio

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, pelos ensinamentos e pela orientação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Antonio Carlos Marques Alvim e ao Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, pela participação na Banca Examinadora.

Ao Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, da Comissão Nacional de Energia Nuclear, pela dedicação, incentivo, comentários e sugestões que contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos meus pais, Samir e Ivani, e ao meu irmão, Júnior, pela compreensão, incentivo incondicional e enorme entusiasmo, tão essenciais para a realização deste trabalho.

Ao querido Emile, pela compreensão, paciência, incentivo e entusiasmo.

À amiga Flavia Moço Vasconcelos, pelas inúmeras horas de estudo e trabalho, pelas sugestões, pelo apoio e grande incentivo.

À FAPERJ e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

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

UMA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO
(LOPA) NA AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIOS NAS ROTAS DE
CABOS DE DESLIGAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR

Camille Lelis Alves

Abril / 2007

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta uma aplicação da técnica de Análise de Camadas de Proteção a uma usina nuclear. O objetivo é propor a utilização da Análise de Camadas de Proteção para obter uma quantificação do risco de incêndio associado às rotas de cabos elétricos de potência, de equipamentos necessários ao desligamento seguro de um reator nuclear, na indisponibilidade de uma Análise Probabilística de Segurança para eventos internos.

São identificadas zonas de incêndio críticas do edifício auxiliar de uma usina nuclear, por onde passam cabos necessários para o desligamento seguro do reator, assim como as fontes de ignição presentes, as cargas de incêndio e os meios de detecção e extinção de incêndio. São determinadas as frequências de incêndio de cada zona crítica identificada, e as propriedades de falha na demanda das camadas de proteção independentes.

Através da Análise de Camadas de Proteção, são estimados os riscos de incêndios das zonas críticas, e são analisadas alternativas de mitigação de risco pela intensificação de sistemas de proteção contra incêndio.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AN APPLICATION OF LAYERS OF PROTECTION ANALYSIS (LOPA)
IN THE EVALUATION OF FIRE RISK ASSOCIATED TO SHUTDOWN
CABLE ROUTES FROM A NUCLEAR REACTOR

Camille Lelis Alves

April / 2007

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

This work presents an application of the Layer of Protection Analysis technique to a nuclear power plant. The objective is to propose the Layer of Protection Analysis utilization to evaluate the fire risk associated to the routes of power cables of equipments necessary to a safe nuclear reactor shutdown, when a Level 1 Probabilistic Safety Assessment for internal events is unavailable.

Critical fire zones in a nuclear power plant auxiliary building, where there are safe shutdown cable trays, as well as the existing ignition sources, fire loads, fire detection and suppression systems are identified. The fire frequencies from each critical fire zone and the probability of failure on demand from the independent protection layers are determined.

Using the Layer of Protection Analysis, the fire risks of critical zones are estimated and alternative fire protection improvement measures are analyzed.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	DESCRIÇÃO DO TRABALHO	4
2	ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	QUANDO UTILIZAR A ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	7
2.3	CONCEITOS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	8
2.4	ETAPAS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	10
2.4.1	Etapa 1 – Identificar as conseqüências para montar os cenários	10
2.4.2	Etapa 2 – Desenvolvimento de Cenários de Acidentes	11
2.4.2.1	Identificação de Cenários	12
2.4.2.2	Desenvolvimento de Cenários	12
2.4.3	Etapa 3 – Estimar a Frequência do Evento Iniciador	14
2.4.4	Etapa 4 – Identificar as Camadas de Proteção Independentes Disponíveis e Estimar as Probabilidades de Falha na Demanda	16
2.4.4.1	Regras para Camadas de Proteção Independentes	17
2.4.4.2	Camadas de Proteção Independentes Humanas	18
2.4.5	Etapa 5 – Determinar a Frequência do Cenário e Estimar o Risco	21
2.4.5.1	Cálculo da Frequência do Cenário	21
2.4.5.2	Cálculo da Frequência para Resultados Adicionais	21
2.4.5.3	Soma das Frequências Para Cenários Múltiplos	23
2.4.5.4	Cálculo do Risco do Cenário	24
2.4.6	Etapa 6 – Avaliar o Risco para Tomar Decisões	25
2.5	BENEFÍCIOS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	26
2.6	LIMITAÇÕES DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	27
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	28
3.1	INTRODUÇÃO	28

3.2	ZONA DE AVALIAÇÃO EAN-1	30
3.2.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	30
3.2.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	31
3.3	ZONA DE AVALIAÇÃO EAN-2	31
3.3.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	31
3.3.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	31
3.4	ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-1	32
3.4.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	32
3.4.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	33
3.5	ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-2	33
3.5.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	33
3.5.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	34
3.6	ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-3	34
3.6.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	34
3.6.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	34
3.7	ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-4	35
3.7.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	35
3.7.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	35
3.8	ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-5	35
3.8.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	35
3.8.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	36
3.9	ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-1	36
3.9.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	36
3.9.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	40
3.10	ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-2	40
3.10.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	40
3.10.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	40

3.11	ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-3	41
3.11.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	41
3.11.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	41
3.12	ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-4	41
3.12.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	41
3.12.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	42
3.13	ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-4	42
3.13.1	Descrição Física e Conteúdo da Zona	42
3.13.2	Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio	42
3.14	RESUMO DA DESCRIÇÃO DAS ZONAS DE AVALIAÇÃO	43
4	APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO	44
4.1	INTRODUÇÃO	44
4.2	ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DAS CONSEQÜÊNCIAS	45
4.3	ETAPA 2 – DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS	45
4.4	ETAPA 3 – DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR	47
4.5	ETAPA 4 – IDENTIFICAÇÃO DAS IPL's E DETERMINAÇÃO DAS PFD's	51
4.6	ETAPA 5 – DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E DO RISCO DOS CENÁRIOS	53
4.6.1	Cálculo da Frequência dos Cenários	53
4.6.2	Cálculo do Risco dos Cenários	54
4.7	ETAPA 6 – AVALIAÇÃO DO RISCO PARA TOMADA DE DECISÕES	55
4.7.1	Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EAS-1	55
4.7.2	Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EDS-1	57
4.7.3	Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EAN-1	58
4.7.4	Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EDS-2	60
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	62
	APÊNDICE A: DOCUMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS	64
	REFERÊNCIAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Camadas de Proteção contra um possível acidente	6
Figura 2.2 Ciclo de vida de um processo mostrando onde a LOPA é geralmente aplicada	8
Figura 2.3 Comparação entre LOPA e Análise por Árvore de Eventos	9
Figura 2.4 Etapas da LOPA	10
Figura 3.1 Zonas de Avaliação de Incêndio da Elevação + 5,15 m	29

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 Exemplo de Tabela para Documentação e Cálculos de Cenários de LOPA	13
Tabela 2.2 Exemplos de Salvaguardas Normalmente não Consideradas IPL's ...	20
Tabela 3.1 Resumo das Características das Zonas de Avaliação da Elevação +5,15m	43
Tabela 4.1 Relação de Cenários Identificados	47
Tabela 4.2 Freqüências de Incêndio Genéricas para as Fontes de Ignição	49
Tabela 4.3 Fatores de Fonte de Ignição, $W_{IS,J,L}$	50
Tabela 4.4 Freqüência de Incêndio das Zonas de Avaliação	51
Tabela 4.5 Freqüências de Mitigação dos Cenários e das Zonas de Avaliação ...	54
Tabela 4.6 Estimativa do Risco das Zonas de Avaliação	54
Tabela 4.7 Freqüência de Mitigação da Zona EAS-1 Após Mitigação Adicional ..	56
Tabela 4.8 Freqüência de Mitigação da Zona EDS-1 Após Mitigação Adicional ..	58
Tabela 4.9 Freqüência de Mitigação da Zona EAN-1 Após Mitigação Adicional ..	59
Tabela 4.10 Freqüência de Mitigação da Zona EDS-2 Após Mitigação Adicional ..	60
Tabela 4.11 Sumário dos Resultados Obtidos Após as Recomendações	61
Tabela A.1 Tabela-Resumo do Cenário EAN-1 [1]	64
Tabela A.2 Tabela-Resumo do Cenário EAN-1 [2]	65
Tabela A.3 Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [1]	66
Tabela A.4 Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [2]	67
Tabela A.5 Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [3]	68
Tabela A.6 Tabela-Resumo do Cenário EDS-2 [1]	69
Tabela A.7 Tabela-Resumo do Cenário EAS-1 [1]	70
Tabela A.8 Tabela-Resumo do Cenário EAS-1 [2]	71

NOMENCLATURA

APP	Análise Preliminar de Perigos
APS	Análise Probabilística de Segurança
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
CCM	Centro de Controle de Motores
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
EAN	Edifício Auxiliar Norte
EAS	Edifício Auxiliar Sul
EDS	Edifício de Segurança
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> – Análise de Perigos e Operabilidade
IPL	<i>Independent Protection Layer</i> – Camada de Proteção Independente
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> – Análise de Camadas de Proteção
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i> – Comissão Regulatória Nuclear
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
$P_{\text{ignição}}$	Probabilidade de Ignição
P_{pessoa}	Probabilidade de Pessoas Presentes na Área Afetada
$P_{\text{ferimentos}}$	Probabilidade de Ferimentos
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

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Um dos aspectos mais importantes na segurança do projeto e da operação de usinas nucleares é a proteção contra incêndio, pois este tipo de acidente ocorre com frequência relativamente alta, e possui um grande potencial de afetar sistemas críticos, necessários à manutenção da segurança da usina e ao desligamento seguro do reator.

Logo após ao incêndio extremamente severo ocorrido em 1975, em uma usina nuclear da central de *Browns Ferry*, nos EUA, um novo nível de requisitos de proteção contra incêndio foi desenvolvido. A NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) passou a estabelecer critérios extremamente conservativos, e o conceito de defesa em profundidade passou a ser aplicado.

O conceito de defesa em profundidade requer sistemas de segurança redundantes, diversificados e confiáveis. Dois ou mais sistemas de segurança realizam funções-chave independentemente, de forma que, se um falhar, outro pode sempre ser acionado, fornecendo proteção contínua.

A proteção contra incêndio consiste em uma combinação de medidas para:

- prevenir a ocorrência de incêndios;
- detectar e extinguir incêndios rapidamente, limitando os danos;
- projetar usinas de forma que danos a funções essenciais sejam limitados, e que o desligamento seguro esteja assegurado.

Em relação à aplicação da defesa em profundidade, nenhum dos níveis de proteção contra incêndio deve ser considerado perfeito ou completo, e cada nível deve atingir requisitos mínimos. Entretanto, o reforço de um nível pode compensar a deficiência de outro (NRC, 2000).

A principal questão em relação a incêndios internos é seu potencial de danificar simultaneamente componentes elétricos de equipamentos de segurança redundantes.

Ao longo dos anos seguintes, a NRC desenvolveu uma regulamentação com requisitos detalhados relacionados à prevenção, detecção e treinamentos de combate a incêndio.

Em 1981, esses requisitos foram documentados no Apêndice R do 10CFR50 (*Title 10 of the Code Federation Regulations, Part 50*) (NRC, 2000). Essa regulamentação, ainda utilizada, exige que as usinas protejam estruturas críticas e equipamentos necessários à parada segura, no caso de um evento de incêndio.

Para minimizar a possibilidade de um incêndio danificar equipamentos e cabos elétricos de sistemas de segurança redundantes, NRC (2000) estabelece os seguintes requisitos aplicados à proteção contra incêndio: os equipamentos e cabos elétricos devem ser separados fisicamente por barreiras de três horas de resistência ou pela distância horizontal mínima de 20 pés (6,1 metros), sem material combustível entre eles. No caso dos trens redundantes estarem localizados no mesmo compartimento, é estabelecido que o compartimento deve dispor de sistemas automáticos de detecção e supressão, e que no caso de distância horizontal inferior a 20 pés, pelo menos um trem redundante deve ser protegido contra incêndio por envelopamento de uma hora de resistência.

Em diversos casos, o critério de separação de sistemas redundantes contido no Apêndice R tende a ser muito conservativo. Sua aplicação possui custo elevado e difícil implementação, especialmente no caso de usinas com projetos antigos. Além disso, a aplicação indiscriminada da defesa em profundidade pode comprometer a operação de cabos elétricos. Ao se proteger cabos elétricos por envelopamento, a dissipação de calor pode diminuir de tal forma que a elevação da temperatura do isolante diminuiria a vida útil do mesmo.

Resultados de análises de riscos já realizadas em usinas nucleares, nos EUA em particular, têm mostrado que incêndios devem ser considerados como significativos contribuintes de danos ao núcleo do reator. Como consequência desses resultados, uma Análise Probabilística de Segurança (APS) incluindo eventos de incêndio é uma prática comum nos EUA e em parte da Europa (BERG *et al.*, 1997).

Em relação à APS, os eventos iniciadores da categoria incêndio, têm tido importância tanto pela natureza do evento como potencial de falhas de causa comum, quanto para suporte da reavaliação de melhorias ou alteração de rotinas operacionais.

Em destaque, a rota dos trens redundantes e os compartimentos nos quais a ocorrência de um incêndio poderia levar à perda dos trens redundantes, comprometendo o desligamento do reator por falha de causa comum (GRUND, 2001).

Na indisponibilidade da APS, é necessário obter uma quantificação do risco associado às rotas de cabos elétricos, de força e controle, de equipamentos necessários ao desligamento seguro do reator, em casos de incêndio em compartimentos.

O objetivo deste trabalho é propor a utilização da técnica de Análise de Camadas de Proteção, e fornecer uma abordagem simplificada para avaliação deste risco das rotas de cabos elétricos de potência.

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) não é apenas outra ferramenta de análise de perigos ou de risco. É uma ferramenta 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 específicas 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, uma ou diversas camadas de proteção podem ser necessárias, 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. Seus 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 apresenta grande crescimento durante os últimos anos. Além disso, outras aplicações para esta técnica estão sendo desenvolvidas: LOPA para explosões (MARKOWSKI, 2006), LOPA para fatores humanos (BAYBUTT, 2002), entre outras.

Este trabalho apresenta uma nova abordagem que pode simplificar a avaliação de segurança de usinas nucleares.

1.2 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 introduz a técnica de análise de camadas de proteção, descrevendo o que é a LOPA, seus conceitos, quando ela pode ser utilizada, como funciona e como é implementada. As limitações e os benefícios da LOPA também são discutidos.

O Capítulo 3 explica a escolha do sistema a ser analisado, e apresenta uma descrição do mesmo para a aplicação da LOPA. A elevação +5,15 m da Usina de Angra 1 foi selecionada por se tratar de um dos pontos mais críticos relacionados ao risco de incêndios, que podem afetar cabos correspondentes a sistemas redundantes necessários para a parada segura do reator. Para cada compartimento desta área, são apresentadas informações de conteúdo, descrição física e sistemas de proteção contra incêndio.

O Capítulo 4 descreve cada passo da aplicação da LOPA no sistema selecionado. As etapas da LOPA apresentadas no Capítulo 2 são discutidas, adaptadas para eventos de incêndio, e aplicadas de acordo com as informações apresentadas no Capítulo 3. Estima-se o risco de incêndio associado às rotas de cabos redundantes de desligamento seguro das zonas críticas da elevação + 5,15m da Usina de Angra 1.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões finais e sugestões sobre a aplicação da técnica de Análise por Camadas de Proteção na avaliação de risco de incêndios, na rota de cabos de desligamento de um reator nuclear.

O Apêndice A apresenta as tabelas de documentação da LOPA para os cenários analisados.

2 ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Em um processo químico típico, são utilizadas diversas camadas de proteção para reduzir a frequência de conseqüências indesejáveis: o projeto do processo (incluindo conceitos inerentemente mais seguros), o sistema de controle básico, sistemas instrumentados de segurança (SIS), dispositivos passivos (como diques e barreiras), dispositivos ativos (como válvulas de alívio), intervenção humana, etc.

Houve muita discussão entre equipes de projeto, analistas de perigos e gerências sobre o número e a eficácia das camadas de proteção (CCPS, 2001). A LOPA tem sua origem na necessidade de se responder a estas questões, utilizando uma aproximação racional, objetiva e baseada no risco.

O conceito de camada de proteção, e também uma abordagem para o número de camadas necessárias, foi primeiramente publicado em CCPS (1993). A partir desses conceitos, diversas empresas americanas desenvolveram procedimentos internos para a realização da LOPA. Em 2001, foi publicado o CCPS (2001), livro que descreve a Análise de Camadas de Proteção.

A LOPA é uma técnica simplificada de análise de riscos. O seu propósito primário é determinar se existem camadas de proteção suficientes, proporcionando uma defesa em profundidade, para fazer frente a um cenário de acidente. Diversos tipos de camadas de proteção são possíveis, como ilustra a Figura 2.1. Um cenário pode demandar uma ou diversas camadas de proteção, dependendo da complexidade do processo e da severidade potencial de uma conseqüência. Em um determinado cenário, apenas uma camada deve funcionar perfeitamente para que a conseqüência seja evitada. Porém, como nenhuma camada é perfeitamente eficaz, camadas de proteção suficientes devem ser fornecidas, de forma que o risco de acidente se torne tolerável.

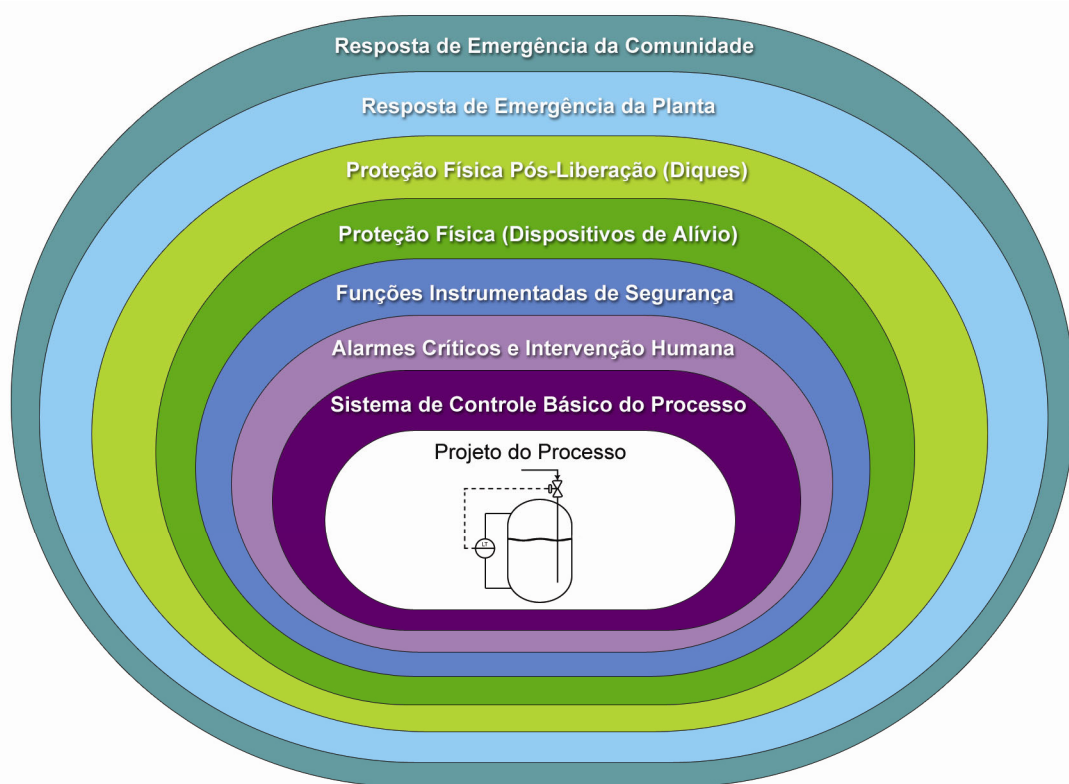


Figura 2.1. Camadas de Proteção contra um possível acidente.

A LOPA proporciona uma base consistente para o julgamento do número de camadas de proteção independentes (IPL's) necessárias para controlar o risco de acidentes de um dado cenário. Se o risco estimado não for aceitável, podem ser acrescentadas IPL's adicionais. A LOPA não sugere quais IPL's devem ser adicionadas ou qual projeto deve ser escolhido, mas auxilia no julgamento entre as alternativas de mitigação do risco.

A LOPA não é uma aproximação de análise de risco completamente quantitativa. É um método simplificado para a avaliação do valor das camadas de proteção para um cenário de acidente bem definido. Descreve-se a LOPA como uma técnica semi-quantitativa porque é gerada uma estimativa numérica do risco. Os números são selecionados de modo a estimarem conservativamente a probabilidade de falha das camadas, geralmente com uma ordem de magnitude de precisão, ao invés de representarem o desempenho real de equipamentos e dispositivos. O resultado tende a ser conservativo, superestimando o risco, sendo adequado para avaliar o nível de integridade (SIL) para Funções Instrumentadas de Segurança (SIF).

Se for necessária uma compreensão mais ampla e completa do risco, métodos quantitativos mais rigorosos, tais como análise por árvores de falhas e/ou de eventos, ou Análise Quantitativa de Riscos (AQR) podem ser necessários. Percebe-se que essa compreensão pode afetar tanto o cálculo de frequências como o de conseqüências.

2.2 QUANDO UTILIZAR A ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

A LOPA é geralmente aplicada após uma avaliação qualitativa de perigos (APP, HAZOP, etc.) utilizando os cenários de acidentes identificados pela equipe. Porém, a LOPA também pode ser usada para analisar cenários que se originam de qualquer fonte, inclusive através da análise de alternativas de projeto, investigações de incidentes, e revisões de projeto. Também pode ser aplicada quando uma equipe de avaliação de perigos acredita que um cenário é muito complexo, ou quando as conseqüências são muito severas, para se fazer um julgamento razoável utilizando apenas aspectos puramente qualitativos.

A equipe pode julgar o cenário como muito complexo se não:

- entende suficientemente o evento iniciador,
- entende suficientemente a sucessão de eventos, ou
- sabe determinar se as salvaguardas são realmente IPL's.

A LOPA também pode ser utilizada como uma abordagem prévia antes de se executar uma Avaliação Quantitativa de Riscos, mais rigorosa. A decisão para prosseguir com a AQR é geralmente baseada no nível do risco determinado pela LOPA, ou na opinião do analista de risco. Mas a LOPA não deve ser usada em substituição à análise quantitativa. Se forem exigidos modelos complexos de comportamento humano ou de falhas de equipamento para avaliar o risco de um cenário, então uma análise quantitativa é mais apropriada.

A LOPA pode ser usada efetivamente em qualquer ponto no ciclo de vida de um processo ou planta, como ilustra a Figura 2.2. Porém, ela é mais utilizada durante:

- a fase de projeto, quando o fluxograma de processo e os diagramas P&ID estão disponíveis. A LOPA é usada para examinar cenários normalmente gerados por outras ferramentas de análise de perigos de processo como parte do projeto de Função Instrumentada de Segurança, ou como parte de um estudo de projeto para classificar as várias alternativas de processo e selecionar a melhor;
- modificações de um processo existente ou de seus sistemas de controle e segurança.

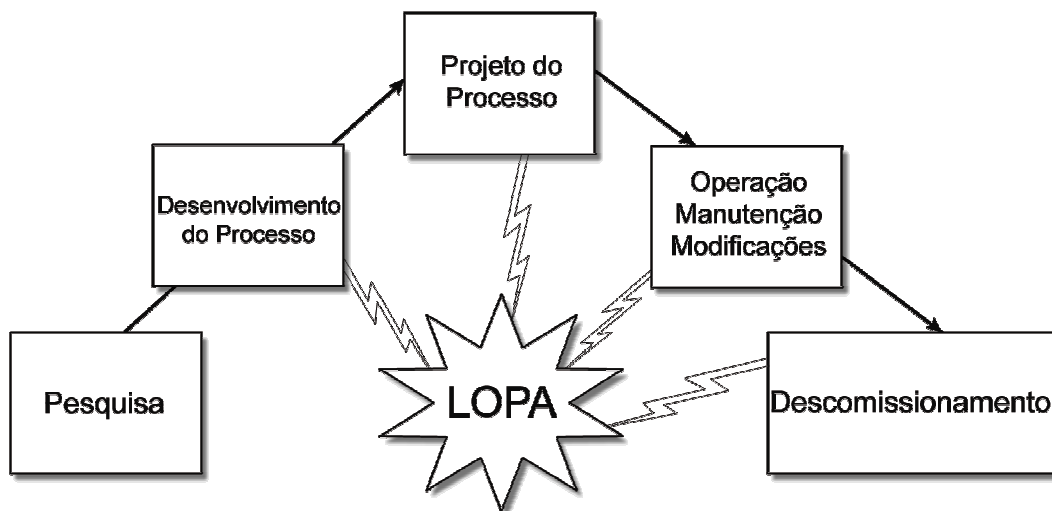


Figura 2.2. Ciclo de vida de um processo mostrando onde a LOPA é geralmente aplicada.

2.3 CONCEITOS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

A LOPA é aplicada depois que uma consequência inaceitável e uma causa crível são selecionadas. Esta técnica avalia um par causa-consequência como um cenário de cada vez.

Quando um par causa-consequência é selecionado, o analista de LOPA pode usá-la para determinar que controles administrativos ou de engenharia, geralmente chamados de salvaguardas, atendem à definição de IPL, e então estimar o risco do cenário. Os resultados podem ser usados para a tomada de decisão baseada em risco, e para auxiliar o analista a decidir que redução adicional de risco pode ser necessária para se alcançar um nível tolerável.

Outra forma de se entender a LOPA é compará-la com a Análise Quantitativa de Riscos. Neste contexto, um cenário de LOPA representa um ramo de uma árvore de eventos. Tipicamente, escolhe-se o ramo que leva à pior consequência, como mostra a Figura 2.3. Uma árvore de eventos mostra todos os possíveis resultados (consequências) de um evento iniciador. Em uma LOPA, o analista (ou a equipe) tem que limitar cada análise a uma única consequência associada a uma única causa (evento iniciador). Em muitas aplicações de LOPA, o objetivo do analista é identificar todos os pares causa-consequência que podem exceder o critério de risco da organização. A aproximação adotada depende da experiência do analista com a LOPA e com o processo em consideração.

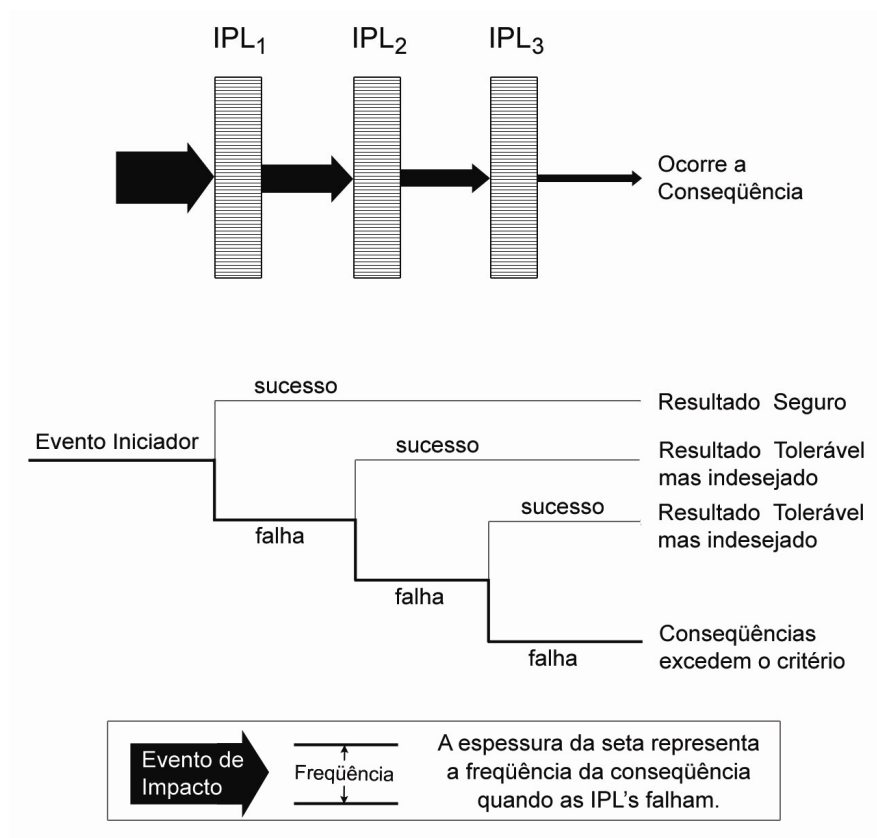


Figura 2.3. Comparação entre LOPA e Análise por Árvore de Eventos.

Na prática, o analista de LOPA não tem o benefício de escolher um cenário de uma árvore de eventos completamente desenvolvida. Ao contrário, a LOPA geralmente começa com cenários identificados por uma equipe de avaliação qualitativa de perigos.

2.4 ETAPAS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

Como todos os métodos analíticos, a LOPA é implementada através de uma série de regras e pode ser dividida em etapas. As etapas da LOPA estão resumidas e ilustradas na Figura 2.4.

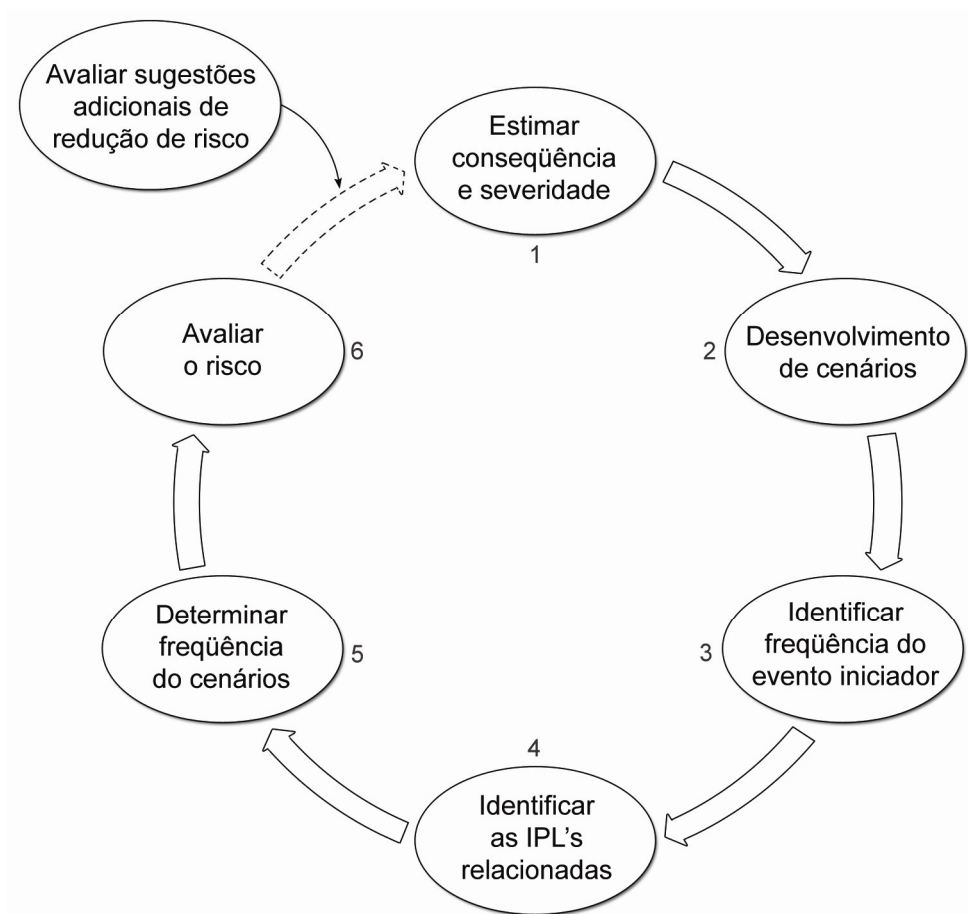


Figura 2.4. Etapas da LOPA.

2.4.1 Etapa 1 – Identificar as conseqüências para montar os cenários

Como a LOPA tipicamente avalia cenários que foram desenvolvidos em um estudo anterior, o primeiro passo é examinar estes cenários. O método mais comum para examiná-los é baseado em conseqüência. A conseqüência é identificada durante uma análise de perigos qualitativa (por exemplo, HAZOP). A seguir, a conseqüência é avaliada e sua magnitude é estimada.

Conseqüências são os resultados indesejáveis de cenários de acidentes. Uma das primeiras decisões que uma organização tem que tomar quando escolhe implementar a LOPA é como definir o estado final de uma conseqüência. Todos esses estados finais de conseqüência são quantificados por algum método de estimativa. Por exemplo, no caso de uma liberação, sua severidade e magnitude podem ser medidas em termos da quantidade de material liberada, uma dispersão em termos da distância/área de dispersão (para concentrações específicas), etc.

A avaliação de conseqüências é uma parte integrante de qualquer metodologia de avaliação de risco. As conseqüências a serem avaliadas e a profundidade da avaliação dependem de diversos fatores, incluindo o risco associado aos cenários de acidente, a metodologia de avaliação de risco adotada, e os recursos que a organização está disposta a fornecer para refinar a estimativa. O método usado para a categorização de conseqüências deve ser consistente com os critérios de tolerância de risco da organização.

2.4.2 Etapa 2 – Desenvolvimento de Cenários de Acidentes

A LOPA é aplicada em um cenário de cada vez, isto é, um único par causa-conseqüência é analisado por vez. Um cenário é um evento não planejado, ou uma sucessão de eventos que resultam em uma conseqüência indesejável. Cada cenário deve ter apenas um evento iniciador e uma conseqüência. Se o mesmo evento iniciador puder resultar em conseqüências diferentes, devem ser desenvolvidos cenários adicionais.

Além do evento iniciador e da conseqüência, um cenário pode incluir também:

- condições ou eventos habilitadores, que precisam ocorrer ou estar presente antes que o evento iniciador resulte em uma conseqüência;
- falhas de salvaguardas (que podem ser IPL's).

Na maioria dos cenários haverá ao menos uma salvaguarda que pode ser considerada uma camada de proteção independente. Se esta IPL operar como o planejado, ela interromperá a série de eventos e impedirá que ocorra a conseqüência indesejada.

2.4.2.1 Identificação de Cenários

A fonte mais comum de informação para identificar cenários são avaliações de perigos desenvolvidas durante o projeto de processos novos ou modificados. A maioria dos métodos de avaliação de perigos são qualitativos e não habilitam um analista a quantificar se o risco associado ao perigo documentado é aceitável. A análise de perigos pode identificar eventos iniciadores, mas eventos habilitadores e salvaguardas são freqüentemente desprezados ou não são incluídos adequadamente.

Relatórios de HAZOP, por exemplo, normalmente contêm informações adequadas para descrever os componentes de um cenário. A LOPA pode utilizar informações do HAZOP e atribuir valores numéricos para a freqüência do evento iniciador e para probabilidades de falha na demanda (PFD) das IPL's (caso seja determinado, pelas as regras da LOPA, que alguma salvaguarda seja IPL).

Outras fontes para identificação de cenários para LOPA são:

- questões relacionadas à operação da planta. Podem envolver comportamento inesperado, condições operacionais fora dos padrões, etc.;
- incidentes no processo que revelam um evento iniciador ou cenário não considerado previamente;
- a exigência para alterar o processo, que pode envolver novos cenários modificados;
- revisões para avaliar se uma SIF (intertravamento) é necessária, e se for o caso, que tipo de SIF atende os critérios de risco da empresa.

2.4.2.2 Desenvolvimento de Cenários

Uma vez que um cenário é identificado, deve ser desenvolvido e documentado. Inicialmente, o cenário pode não ser entendido completamente, podendo sofrer algumas revisões. A Tabela 2.1 apresenta um método para apresentar as informações necessárias para o desenvolvimento completo de um cenário (CCPS, 2001). Outros formatos de tabela são aceitáveis, contanto que sejam compreensíveis e aplicados constantemente dentro de uma organização.

Tabela 2.1. Exemplo de Tabela para Documentação e Cálculos de Cenários de LOPA.

Número do Cenário	Número do Equipamento	Título do Cenário	
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (ano ⁻¹)
Conseqüência (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 Conseqüência não mitigada			
Camadas de Proteção Independentes			
Sistema de Controle Básico			
Intervenção Humana			
SIF			
Dispositivo de Alívio			
Outras Camadas de Proteção (devem ser justificadas)			
Salvaguardas não-IPL's			
Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's			
Frequência da Conseqüência Mitigada			
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não):			
Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância:			
Observações:			

Uma vez que o evento iniciador é identificado para um cenário específico, o analista de LOPA tem que determinar se alguma condição ou evento habilitador é necessário para que o evento iniciador conduza à conseqüência.

O próximo passo é identificar as salvaguardas existentes, e se elas operam como o planejado, impedindo que a conseqüência ocorra. É melhor listar todas as salvaguardas para um cenário antes de decidir quais são verdadeiramente IPL's.

Esta prática documenta as questões consideradas e permite que outros analistas entendam porque algumas salvaguardas foram ou não consideradas IPL's.

Qualquer fator que possa afetar o cálculo da frequência da consequência deve ser incluído e documentado.

Ao longo da análise, informações adicionais se tornam disponíveis e as suposições feitas anteriormente são frequentemente questionadas. Em alguns casos, esta análise pode conduzir ao desenvolvimento de novos cenários, já que se adquire uma maior compreensão do sistema.

2.4.3 Etapa 3 – Estimar a Frequência do Evento Iniciador

Eventos iniciadores são agrupados em três tipos gerais:

- Eventos externos:
 - Terremotos, tornados, furacões ou enchentes,
 - Quedas de aeronaves,
 - Grandes acidentes em plantas adjacentes,
 - Sabotagem ou terrorismo.

- Falhas de equipamentos:
 - Sistemas de controle: falhas em softwares ou falhas de componentes,
 - Sistemas mecânicos: desgaste, corrosão, vibração, defeitos, etc.

- Falhas humanas:
 - Erro operacional
 - Erro de manutenção
 - Erro a respostas críticas,
 - Erros de programação.

A frequência do evento iniciador é normalmente expressa em eventos por ano. Algumas fontes usam outras unidades, como eventos por 10^6 horas.

Várias fontes de dados de taxa de falha estão disponíveis para atribuir valores consistentes às frequências de evento iniciador. Estas incluem:

- Dados industriais como o *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* (CCPS, 1989a) e a segunda edição (CCPS, 2000), *Guidelines for Process Equipment Reliability Data* (CCPS, 1989b), e outras fontes de domínio público como IEEE (1984) e EuReData (1989). O CCPS também tem um projeto de compartilhamento de dados de taxa de falhas entre organizações.
- Experiência da empresa (incluindo a experiência da equipe de análise de perigos), onde estão disponíveis dados históricos suficientes. Observa-se que a experiência do operador é uma fonte melhor para eventos específicos, uma vez que dados de taxa de falhas genéricos são melhores para falhas de equipamentos globais, e muitas empresas não possuem um bom banco de dados interno para taxas de falha (CCPS, 2001).
- Dados de fabricantes.

Quando uma causa tiver origem em falhas de componentes múltiplos, o uso de árvores de falhas ou árvores de eventos simplificadas pode ser apropriado para obter a frequência combinada de falhas. Em geral, tais técnicas só deveriam ser usadas seletivamente para evitar que o processo de LOPA se torne muito complexo. A LOPA é uma metodologia que está entre técnicas simples de análise qualitativa e técnicas mais elaboradas de análise quantitativa.

As taxas de falhas selecionadas devem ser consistentes com o projeto básico da planta, e com o método de tomada de decisões baseadas em risco da organização. Além disso, devem ser representativas da indústria ou operação em consideração.

Se forem utilizados dados gerais de indústria, eles devem ser ajustados para refletir condições e situações locais. Quando tais dados não estiverem diretamente disponíveis, deve-se utilizar julgamento para decidir quais dados de fontes externas são aplicáveis à situação.

Suposições estão sempre envolvidas na seleção de dados de taxa de falhas. Regularmente incluem, entre outros fatores, suposições do intervalo de parâmetros operacionais, substâncias químicas processadas, testes e frequência de inspeção, operador e treinamentos de manutenção, e qualidade de projetos de equipamento. É importante assegurar que os dados de taxa de falhas utilizados para um processo sejam consistentes com as suposições básicas. Estas suposições devem ser

documentadas de forma que as futuras seleções de dados sejam feitas consistentemente.

A LOPA também assume que a taxa de falhas é constante. Isto nem sempre é verdade, já que taxas de falhas são tipicamente mais altas quando o equipamento é novo (mortalidade infantil) ou antigo (envelhecimento). Para a finalidade da LOPA, uma taxa constante é adequada, já que para a maioria dos equipamentos, o período mais longo de operação, isto é, o período de vida útil envolve uma taxa de falhas constante.

Para sistemas que não são continuamente operados (carregamento, descarregamento, operação em batelada, etc.), dados de taxa de falhas devem ser ajustados para refletir o tempo sob risco para o componente ou operação em consideração. Como a maioria dos dados é expressa em unidades por ano (ano^{-1}), são necessários ajustes para refletir que o componente ou operação não estão sujeitos à falhas durante o ano inteiro, mas só naquele período do ano que estão operando ou estão sob risco. Normalmente, isto é feito multiplicando a taxa de falhas básica pela fração do ano na qual o componente está operando.

2.4.4 Etapa 4 – Identificar as Camadas de Proteção Independentes Disponíveis e Estimar as Probabilidades de Falha na Demanda

O ponto central da LOPA é reconhecer as salvaguardas disponíveis que atendem as exigências de camadas de proteção independentes para um dado cenário.

Uma IPL é um dispositivo, um sistema, ou uma ação que seja capaz de impedir a ocorrência da consequência indesejada de um cenário, independente do evento iniciador ou da ação de qualquer outra camada de proteção associada ao cenário.

A distinção entre uma IPL e uma salvaguarda é importante. Uma salvaguarda é todo o dispositivo, sistema, ou ação que provavelmente interromperia a série de eventos que ocorrem após um evento iniciador. Entretanto, a eficácia de algumas salvaguardas não pode ser quantificada devido à falta dos dados, à incerteza a respeito da independência ou da eficácia, ou a outros fatores. Todas as IPL's são salvaguardas, mas nem todas as salvaguardas são IPL's.

2.4.4.1 Regras para Camadas de Proteção Independentes

Para que um dispositivo, sistema ou ação seja considerado IPL, deve ser:

- eficaz na prevenção da conseqüência;
- independente do evento iniciador e dos componentes de qualquer outra IPL já determinada para o mesmo cenário;
- auditável.

Em relação à eficácia, as seguintes perguntas são utilizadas como guias para a equipe ou analista de LOPA na realização do julgamento apropriado:

- A salvaguarda pode detectar a condição que exige sua ação? Pode ser uma variável de processo, um alarme, etc. Se a salvaguarda nem sempre puder detectar a condição ou circunstância e gerar uma ação específica, ela não é uma IPL.
- A salvaguarda pode detectar a condição a tempo de executar a ação corretiva que impedirá a conseqüência indesejada? O tempo requerido deve incluir o tempo para detectar a condição, processar a informação e tomar a decisão, executar a ação necessária, e para a ação executada fazer efeito.
- A IPL tem a capacidade adequada para executar a ação necessária dentro do tempo disponível? Se um tamanho específico (por exemplo, orifício da válvula de escape, volume do dique, etc.) é necessário, a salvaguarda atende a estes requisitos? Se a salvaguarda não atende a esses requisitos, não é uma IPL.

Na LOPA, a eficácia de uma IPL em reduzir a freqüência de uma conseqüência é quantificada usando sua probabilidade de falha na demanda (PFD), que é definida como a probabilidade de um sistema (neste caso a IPL) falhar na demanda da execução de uma função. Quanto menor for o valor da PFD para uma IPL, maior será a confiança de que ela operará corretamente interrompendo uma série de eventos. A redução na freqüência alcançada por uma IPL é algumas vezes denominada de fator de redução do risco.

Como a LOPA é um método simplificado, os valores das PFD's são normalmente aproximados à ordem de magnitude mais próxima. O intervalo de valores de PFD varia da mais fraca IPL (1×10^{-1}) à mais forte IPL ($1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$). A equipe ou o analista de LOPA deve determinar quando uma salvaguarda é uma IPL, e então analisar o valor da PFD apropriado para a IPL.

A LOPA utiliza independência para assegurar que os efeitos do evento iniciador, ou de outras IPL's, não interajam com uma IPL específica, e desse modo, não interfiram na sua capacidade de desempenhar sua função. Independência requer que a eficácia de uma IPL seja independente da ocorrência ou das conseqüências do evento iniciador, e de falhas de qualquer componente de uma IPL já considerada para o mesmo cenário.

É importante procurar falhas de causa comum ao analisar salvaguardas. As falhas de causa comum podem envolver o evento iniciador e uma ou mais salvaguardas, ou a interação de várias salvaguardas. Todas as salvaguardas afetadas por falhas de causa comum devem ser consideradas somente como uma única IPL (ao invés de cada salvaguarda ser considerada uma IPL).

Um componente, um sistema ou uma ação deve ser auditável para demonstrar que atende às exigências de mitigação de risco de uma IPL. O processo de auditoria deve confirmar que a IPL é eficaz em impedir a conseqüência se funcionar adequadamente. A auditoria também deve confirmar se o projeto, a instalação, os testes funcionais e os sistemas de manutenção da IPL estão aptos a alcançar a PFD especificada para a IPL. Testes funcionais devem confirmar se todos os componentes de uma IPL estão operando normalmente e se atendem aos requisitos da LOPA. A auditoria deve documentar a condição atual da IPL, as modificações feitas desde a última auditoria, e acompanhar a execução de ações corretivas caso sejam necessárias.

2.4.4.2 Camadas de Proteção Independentes Humanas

IPL's humanas envolvem a confiança em operadores para que a ação de impedir uma conseqüência indesejada seja realizada, em resposta a alarmes, ou após a verificação rotineira do sistema. O desempenho humano é geralmente considerado menos confiável do que controles de engenharia.

As exigências gerais para considerar uma ação humana como uma IPL são as mesmas apresentadas anteriormente, porém é necessário cautela nesta decisão. A ação humana deve ter as seguintes características:

- A indicação para a ação necessária ao operador deve ser detectável. A indicação deve estar sempre disponível e clara para o operador, mesmo sob circunstâncias de emergência, e deve ser simples para que o operador possa compreendê-la imediatamente.
- O tempo disponível para realizar a ação deve ser adequado. Isto inclui o tempo necessário para decidir se a ação é necessária e o tempo necessário para realizá-la. Quanto maior é o tempo disponível para a ação, menor é a PFD para a ação humana como uma IPL. Para o operador, tomar uma decisão não deve requerer cálculo ou diagnóstico complicado.
- Não se deve esperar que o operador execute outras tarefas ao mesmo tempo em que estiver ocupado com a ação requerida pela IPL, e a carga normal de trabalho deve permitir que o operador esteja disponível para agir como uma IPL.
- O operador deve ser capaz de executar a ação requerida sob qualquer circunstância que possa estar presente.
- O treinamento para a ação requerida deve ser realizado e documentado regularmente.
- A indicação e a ação devem ser independentes de qualquer alarme, instrumentação, SIF, ou outro sistema já considerado como parte de uma outra IPL, ou do evento iniciador.

CCPS (2001) fornece valores para PFD de diversas IPL's típicas. Se as condições da instalação ou da operação forem atípicas para uma IPL, o valor de sua PFD deve ser revisto e ajustado para condições específicas. Quando IPL's estiverem instaladas em circunstâncias severas (por exemplo, válvulas de escape, ambiente corrosivo), deve ser considerado o uso de valores mais elevados de PFD.

Os valores de PFD usados dentro de uma organização devem ser aplicados consistentemente, embora variações entre diferentes plantas sejam apropriadas, caso existam diferenças no projeto, construção, instalação, inspeção ou manutenção. Os valores de PFD também devem ser consistentes com as taxas de falhas usadas para desenvolver frequência de evento iniciador, e critérios de tolerância de risco.

Um panorama das salvaguardas que não são normalmente consideradas IPL's. é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Exemplos de Salvaguardas Normalmente não Consideradas IPL's.

Salvaguardas normalmente não consideradas IPL's	Comentários
Treinamento e Certificação	Podem ser considerados na avaliação da PFD para ação de operador, mas não são considerados IPL's.
Procedimentos	Podem ser considerados na avaliação da PFD para ação de operador, mas não são considerados IPL's.
Testes e Inspeções	Testes e inspeções normais afetam a PFD de determinadas IPL's. Aumentar os intervalos de testes e inspeções pode aumentar a PFD de uma IPL.
Manutenção	Manutenção afeta a PFD de determinadas IPL's.
Comunicações	É uma suposição básica que exista comunicação adequada em uma planta. Comunicação ruim afeta a PFD de determinadas IPL's.
Avisos	Os avisos não são IPL's. Eles podem ser confusos, obscuros, ignorados, etc. Podem afetar a PFD de determinadas IPL's.
Proteção contra Incêndio	<p>Freqüentemente, proteção contra incêndio não é considerada uma IPL porque atua após o evento, para a maioria dos cenários, e sua disponibilidade e eficácia pode ser afetada pelo incêndio ou explosão que se pretende conter.</p> <p>Entretanto, se uma organização puder demonstrar que a proteção contra incêndio atende às exigências de uma IPL para um determinado cenário, pode ser considerada como IPL.</p>

2.4.5 Etapa 5 – Determinar a Freqüência do Cenário e Estimar o Risco

Nesta etapa, os cenários identificados e as camadas de proteção independentes (IPL's) são usados para calcular a freqüência do cenário mitigado, combinando a freqüência do evento iniciador com as probabilidades de falha na demanda das IPL's. Isto inclui cálculos para o sistema ou projeto existente, e para o sistema ou projeto modificado após a incorporação das mudanças recomendadas.

Os cálculos podem ser quantitativos, utilizando estimativas numéricas, ou através do uso de tabelas de referência. A freqüência calculada para o cenário nesta fase é utilizada para tomar decisões baseadas em risco na etapa seguinte.

2.4.5.1 Cálculo da Freqüência do Cenário

Este é o procedimento geral para calcular a freqüência de um cenário de liberação, com um estado final de consequência específico. Para este cenário, a freqüência do evento iniciador da etapa 3 é multiplicada pelo produto das PFD's das IPL's determinadas na etapa 4.

$$f_i^C = f_i \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \quad (2.1)$$

onde

f_i^C é a freqüência da consequência C para o evento iniciador i

f_i é a freqüência do evento iniciador i

PFD_{ij} é a probabilidade de falha na demanda da j -ésima IPL que protege contra a consequência C do evento iniciador i

2.4.5.2 Cálculo da Freqüência para Resultados Adicionais

Algumas empresas calculam somente a freqüência de liberação. Porém, podem ocorrer outras situações provenientes de uma liberação e as empresas podem ter critérios de tolerância de risco para estes outros resultados:

- efeitos de inflamabilidade, tais como incêndio ou explosão,
- efeitos de toxicidade,
- exposição a efeitos inflamáveis ou tóxicos,
- ferimentos ou fatalidades.

Para calcular a freqüência de tais resultados, a equação (2.1) é modificada multiplicando a freqüência do cenário da liberação pelas probabilidades apropriadas de cada situação. Estas incluem:

- probabilidade de ignição ($P^{ignição}$), para liberações inflamáveis;
- probabilidade de pessoas presentes na área afetada ($P^{pessoas}$), um parâmetro precursor para calcular exposição e ferimentos;
- probabilidade de que ferimentos ocorram ($P^{ferimentos}$), para ferimentos ou fatalidades.

A equação (2.2) determina a freqüência de incêndio para um único cenário de um sistema.

$$f_i^{incêndio} = f_i \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignição} \quad (2.2)$$

A equação (2.3) determina a freqüência de pessoas expostas a um incêndio.

$$f_i^{exposição} = f_i \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignição} \times P^{pessoas} \quad (2.3)$$

A equação (2.4) determina a freqüência de pessoas feridas em um incêndio.

$$f_i^{ferimentos} = f_i \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{ignição} \times P^{pessoas} \times P^{ferimentos} \quad (2.4)$$

Equações similares podem ser escritas para efeitos tóxicos, omitindo a probabilidade da ignição. A probabilidade de pessoas presentes e a probabilidade de ferimentos podem ser diferentes para efeitos inflamáveis e tóxicos. Neste caso, a equação (2.4) torna-se:

$$f_i^{\text{exposição tóxica}} = f_i \times \left(\prod_{j=1}^J PFD_{ij} \right) \times P^{\text{pessoas}} \times P^{\text{ferimentos}} \quad (2.5)$$

A probabilidade de ignição e a probabilidade de uma pessoa estar presente estão freqüentemente ligadas ao evento iniciador – uma ação da pessoa pode ser uma fonte de ignição. O evento iniciador, por sua natureza, pode aumentar uma ou ambas as probabilidades. O analista da LOPA deve tomar cuidado para poder identificar tais ligações.

Uma empresa pode escolher uma aproximação conservativa para determinar as probabilidades de ferimentos, de pessoas presentes e de ignição, ou pode estabelecer critérios para diferentes categorias de probabilidades.

A equação (2.1) é aplicável para situações de baixa demanda - isto é, a f_i é duas vezes menor que a freqüência de testes para a primeira IPL. O cálculo para cenários com alta freqüência de eventos iniciadores (demanda elevada) é discutido em CCPS (2001). As equações (2.1) a (2.5) supõem que todas as IPL's são verdadeiramente independentes – uma premissa básica da LOPA.

2.4.5.3 Soma das Freqüências Para Cenários Múltiplos

Algumas organizações calculam o risco de alguma área, com múltiplos cenários. Dessa forma, é necessário somar as freqüências (como índice de risco) de todos os cenários que afetam a área geográfica ou a população em consideração:

- na mesma área geográfica,
- na mesma unidade de processo,
- afetando o mesmo local de interesse,
- na mesma categoria da severidade da consequência.

Cada cenário deve ser avaliado individualmente, usando a equação (2.1), já que diferentes IPL's podem existir para os diferentes cenários, mesmo que os vários cenários resultem na mesma consequência. Para a área analisada, a freqüência de uma determinada consequência é dada por:

$$f^C = \sum_{i=1}^I f_i^C = f_1^C + f_2^C + \dots + f_I^C \quad (2.6)$$

onde f_i^C é a frequência da consequência C para o i -ésimo evento iniciador.

O analista de LOPA pode encontrar processos onde a mesma consequência é resultado de dois ou mais eventos iniciadores. Algumas empresas somam as frequências de todos os cenários que têm a mesma consequência. Porém, muitas empresas não somam as frequências dos cenários individuais para a mesma consequência, mas escolhem a frequência de cenário mais elevada (par evento iniciador – consequência com risco elevado). A aproximação utilizada deve ser consistente com os critérios de tolerância do risco da organização.

2.4.5.4 Cálculo do Risco do Cenário

Se o resultado desejado for um índice do risco do cenário, a frequência do mesmo deve ser multiplicada por um fator relacionado à magnitude da consequência:

$$R_k^C = f_k^C \times C_k \quad (2.7)$$

onde

R_k^C é o índice do risco do resultado do incidente de interesse k, expresso como um valor das consequências por unidade de tempo. As unidades específicas variam de acordo com o risco que está sendo estimado. Alguns exemplos podem incluir: risco de fatalidades por ano, número de fatalidades por ano, quilos de poluentes liberados por dia, etc.,

f_k^C é a frequência do resultado do incidente de interesse k, por unidades de tempo. Por exemplo, ano⁻¹, hora⁻¹, etc.,

C_k é uma medida específica das consequências do resultado do incidente de interesse k. Algumas medidas de consequências podem ser: uma fatalidade individual, número de fatalidades, quilos de poluentes liberados, número de pessoas expostas a uma concentração específica de um poluente do ar. C_k também pode ser expressa como uma categoria.

A conseqüência do resultado de interesse indesejado k deve ser expressa como uma medida numérica para poder ser utilizada na equação (2.7).

CCPS (2001) apresenta outro método para estimar o risco de um cenário que utiliza tabelas de referências na categorização de conseqüências, entre outros fatores. Este método não foi abordado neste capítulo, porque o mesmo não é aplicável a este estudo. Como se trata de uma nova abordagem para a LOPA, ainda não existem tabelas de referência específicas.

2.4.6 Etapa 6 – Avaliar o Risco para Tomar Decisões

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 IPL's. 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 (IPL's). 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 1000 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 IPL's candidatas. Essa análise compara o custo da consequência evitada e sua frequência, com o custo da redução do risco que determinada IPL promove.

2.5 BENEFÍCIOS DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

Os principais benefícios da LOPA são:

- Requer menos tempo do que uma análise quantitativa de risco.
- Ajuda a solucionar conflitos durante a tomada de decisão, proporcionando uma base consistente e simplificada para se estimar o risco de um cenário.
- Fornece aproximações de risco úteis para se fazer comparações que ajudam a alocar recursos limitados para a redução de risco.
- Facilita a determinação mais precisa de pares causa-consequência e, conseqüentemente, melhora a identificação de cenários.
- Proporciona meios para comparar o risco entre unidades ou plantas, se a mesma aproximação for utilizada.
- Documentação mais rigorosa, maior clareza e consistência.

- Informações obtidas com a LOPA ajudam na decisão de quais salvaguardas devem ser focalizadas durante a operação, manutenção e treinamento.
- Para muitos propósitos, a LOPA tem precisão suficiente para quantificar adequadamente o risco de um cenário particular.

2.6 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

As limitações impostas à LOPA resultam em um processo de trabalho bem menos complexo que uma análise de risco quantitativa, e que gera estimativas de risco úteis, de alguma forma conservativas. A LOPA está sujeita às seguintes limitações:

- Comparações do risco de cenários são válidas somente se o mesmo método de LOPA (isto é, mesmo método de escolha de dados de falha) e as comparações forem baseados nos mesmos critérios de tolerabilidade de risco. Os números gerados por um cálculo de LOPA não são valores precisos do risco de um cenário.
- É uma abordagem simplificada e não deve ser aplicada a todos os cenários. O esforço requerido para implementá-la pode ser excessivo para algumas decisões baseadas em risco e extremamente simplista para outras.
- Requer mais tempo para se chegar a uma decisão baseada em risco do que métodos qualitativos (HAZOP, APP, etc.). Para decisões simples, tem valor discutível, podendo poupar tempo para cenários mais complexos, pois focaliza a tomada de decisão.
- Não é uma ferramenta de identificação de perigos. Em geral, seu procedimento mais rigoroso esclarece cenários mal definidos em revisões de perigo.
- Diferenças em critérios de tolerabilidade de riscos e na implementação da LOPA dificultam comparações de resultados (como também ocorre na AQR).

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como base a Usina de Angra 1. Porém, as informações apresentadas neste capítulo, baseadas em GRUND (2001) e SALDANHA & GRUND (1996), podem não refletir a realidade atual da usina. Os sistemas de proteção contra incêndio de Angra 1 já sofreram diversas melhorias e modificações de projeto. Os dados apresentados aqui têm o único objetivo de ilustrar o caso estudo da aplicação da LOPA em uma usina nuclear, verificando sua possibilidade, desempenho, funcionalidade e dificuldades.

Os pontos críticos de risco de incêndios que poderiam afetar cabos correspondentes a sistemas redundantes, necessários para a parada segura do reator da Usina Angra 1, estão concentrados fundamentalmente na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Norte, do Edifício de Segurança e do Edifício Auxiliar Sul (SALDANHA & GRUND, 1996), onde diversos compartimentos não atendem os critérios de separação física entre trens redundantes.

Uma usina é dividida em Áreas de Incêndio definidas como um edifício, ou parte de um edifício, limitado por barreiras resistentes a fogo que impedem a propagação de incêndios para edifícios, ou parte de edifícios, adjacentes. Uma Zona (ou compartimento) de Incêndio é uma subdivisão de uma Área de Incêndio, introduzida para proteger equipamentos ou sistemas de segurança. Também pode ser limitada por barreiras que impedem a propagação de incêndios para outras zonas.

A elevação +5,15 m está dividida em zonas de avaliação de incêndios, como ilustrado na Figura 3.1. As zonas destacadas nesta figura são as que contêm equipamentos ou bandejas de cabos de força necessários para a parada segura do reator. Portanto, estas serão as zonas de avaliação analisadas:

- Do Edifício Auxiliar Norte: EAN-1 e EAN-2;
- Do Edifício de Segurança: EDS-1, EDS-2, EDS-3, EDS-4 e EDS-5;
- Do Edifício Auxiliar Sul: EAS-1, EAS-2, EAS-3, EAS-4 e EAS-6.

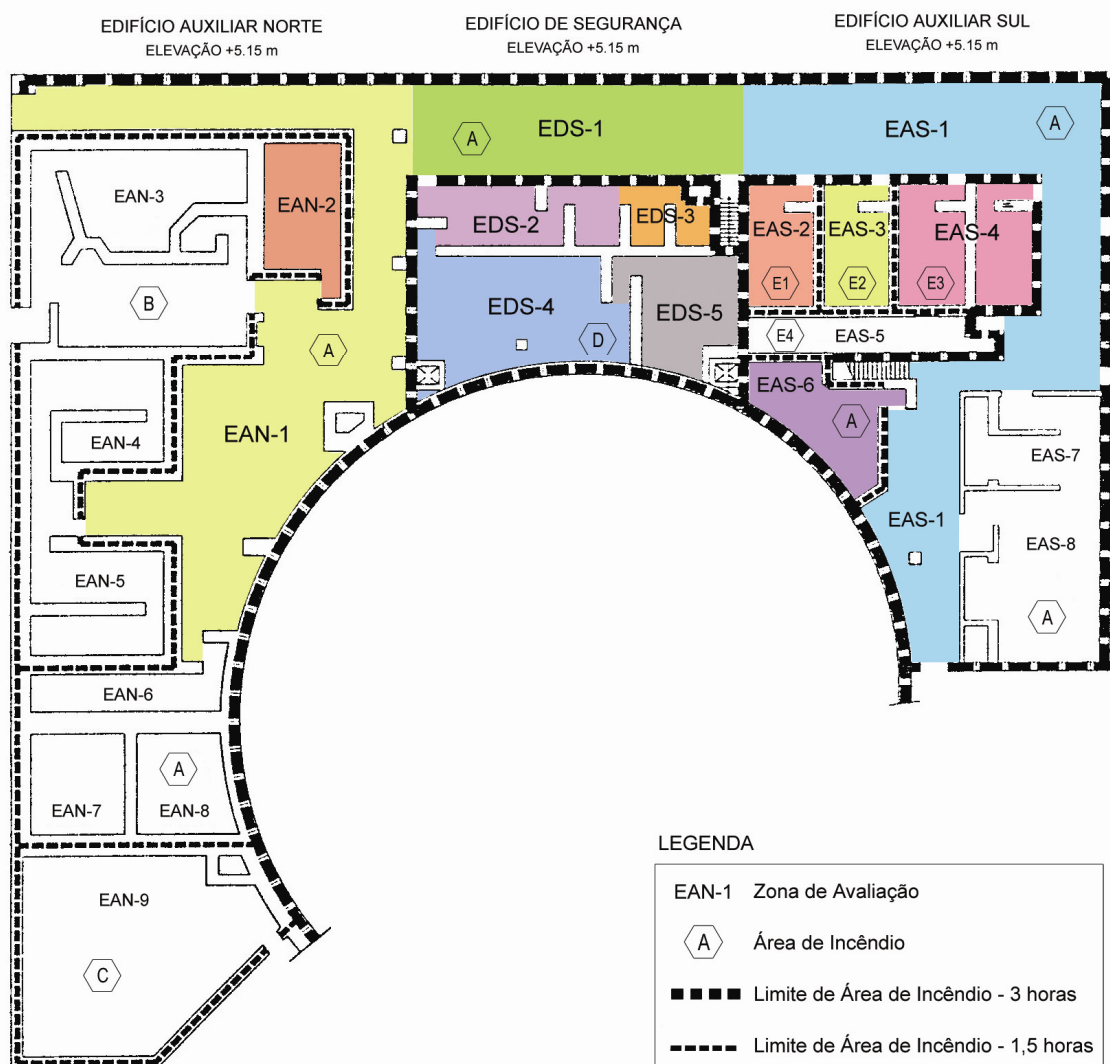


Figura 3.1. Zonas de Avaliação de Incêndio da Elevação + 5,15 m.

Para cada zona de avaliação foram listados os principais equipamentos existentes, combustíveis (fontes de ignição) encontrados, carga de incêndio e meios de detecção e extinção de incêndio presentes (GIBBS & HILL).

Os detalhes das zonas de avaliação críticas, situadas nos Edifícios Auxiliar Norte, de Segurança e Auxiliar Sul da elevação + 5,15 m, são descritos a seguir.

3.2 ZONA DE AVALIAÇÃO EAN-1

3.2.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta é uma zona ampla situada dentro da Área de Incêndio A, na elevação + 5,15m do Edifício Auxiliar Norte, compreendendo 8 salas contínuas. Estão presentes os seguintes componentes necessários para a parada segura do reator:

- Centro de Controle de Motores CCM-B1 (Trem B),
- Cabos de força dos trens A e B.

Nesta zona se situam trechos de 10 cabos de força (Trens A e B) que alimentam equipamentos necessários para a parada segura, porém apenas 6 são redundantes.

Do Trem A, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1A.

Do Trem B, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1B;
- cabo que alimenta o Centro de Controle de Motores CCM-B1;
- cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento do Retorno de Refrigeração dos Mecanismos do Motor das Bombas de Refrigeração do Reator VIBRR-1B;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Trocador de Calor Residual VDTC-2.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 15000 Btu/ft², devido principalmente ao isolamento de cabos.

3.2.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

É uma zona ampla, separada das áreas adjacentes mediante barreiras resistentes ao Incêndio (1,5 a 3 horas). Possui detecção de fumaça do tipo iônica, extintores portáteis de CO₂ (6 kg) e de pó químico (12 kg), assim como cobertura por estações de mangueira situadas na própria zona ou em zonas adjacentes.

3.3 ZONA DE AVALIAÇÃO EAN-2

3.3.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta é uma zona fechada e reduzida, situada dentro da Área de Incêndio B, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Norte, compreendendo apenas uma sala.

O único componente presente necessário para a parada segura é o cabo de força do trem B que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2. Seu cabo redundante encontra-se fora dessa Área de Incêndio. Logo, um possível incêndio não afetaria nenhum componente redundante.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 59000 Btu/ft², devido principalmente ao isolamento de cabos.

3.3.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona de avaliação fechada e reduzida, e separada das áreas adjacentes mediante barreiras resistentes a Incêndio de 1,5 horas.

A zona dispõe de detectores de fumaça, e como meios de extinção, um aparelho de CO₂ (6 kg) situado em seu acesso, assim como um hidrante situado na zona EAN-1.

3.4 ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-1

3.4.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada dentro da Área de Incêndio A, na elevação +5,15 m do Edifício de Segurança, compreendendo 2 salas. Encontram-se os seguintes componentes necessários para a parada segura do reator:

- Cabos de força dos trens A e B;
- Aquecedor do tanque de surto de injeção de boro ATSIB (Trem A).

Nesta zona, se situam trechos de 12 cabos de força (Trens A e B) que alimentam equipamentos necessários para a parada segura, porém apenas 8 são redundantes.

Do Trem A, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-1;
- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-1;
- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Surto de Injeção de Boro ATSIB;
- cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-1;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1A.

Do Trem B, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 32000 Btu/ft², devido principalmente ao isolamento de cabos.

3.4.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Ao longo do corredor de aproximadamente 18 metros que constitui esta zona, existe detecção de fumaça do tipo iônica, extintores de CO₂ (6 kg), de pó químico e um hidrante.

3.5 ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-2

3.5.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada na Área de Incêndio D, na elevação +5,15 m do Edifício de Segurança, compreendendo 2 salas. Estão presentes os seguintes componentes necessários para a parada segura:

- Cabos de força dos trens A e B;
- Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-1 (Trem A);
- Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-2 (Trem B);
- Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-1 (Trem A);
- Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-2 (Trem B).

Nesta zona, se situam trechos de 7 cabos de força (Trens A e B) que alimentam equipamentos necessários para a parada segura, porém apenas 4 são redundantes.

Do Trem A, estão presentes:

- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-1;
- cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-1.

Do Trem B, estão presentes:

- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-2;
- cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-2;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento do Retorno de Refrigeração dos Mecanismos do Motor das Bombas de Refrigeração do Reator VIBRR-1B;

- cabo que alimenta a Bomba de Remoção de Calor Residual BRGR-2;
- cabo que alimenta a Válvula da Bomba de Água de Alimentação Auxiliar VBAA-2.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 43500 Btu/ft², devido principalmente ao isolamento de cabos.

3.5.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona pequena. Possui equipamentos mecânicos e bandejas de cabos. Dispõe de detecção iônica de fumaça e a cobertura de hidrantes situados em áreas próximas.

3.6 ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-3

3.6.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada na Área de Incêndio D, na elevação +5,15 m do Edifício de Segurança, compreendendo 2 salas.

Os únicos componentes, necessários para a parada segura do reator, encontrados nesta zona são cabos de força do Trem B. Dessa forma, um possível incêndio não afetará nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 12000 Btu/ft², devido ao isolamento de cabos.

3.6.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona reduzida com pequenas salas que abrigam trocadores de calor e cabos de força para a parada segura do reator de um só trem. Possui detecção de fumaça do tipo iônica e meios manuais de extinção de incêndio, situados em zonas próximas.

3.7 ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-4

3.7.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada na Área de Incêndio D, na elevação +5,15 m do Edifício de Segurança, compreendendo 2 salas.

Os únicos componentes, necessários para a parada segura do reator, encontrados nesta zona são cabos de força do Trem B. Dessa forma, um possível incêndio não afetará nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 20000 Btu/ft², devido ao isolamento de cabos.

3.7.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona de penetrações mecânicas. Só abriga cabos de força do Trem B. A zona possui detecção de fumaça do tipo iônica e meios manuais de extinção de incêndio situados em zonas próximas.

A comunicação com a zona EDS-5 que contém cabos do Trem A não possui barreira qualificada resistente ao Incêndio. Contudo, a distância existente entre as rotas de ambos os trens cumpre o critério de separação exigido pelo Apêndice R, sempre que por Procedimento Administrativo se garanta a ausência de materiais combustíveis na área, o que poderia propagar um incêndio entre ambas as zonas.

3.8 ZONA DE AVALIAÇÃO EDS-5

3.8.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada na Área de Incêndio D, na elevação +5,15 m do Edifício de Segurança, compreendendo apenas uma sala.

Os únicos componentes, necessários para a parada segura do reator, encontrados nesta zona são cabos de força do Trem A. Dessa forma, em caso de incêndio não serão afetados equipamentos redundantes.

A carga de incêndio é de 39500 Btu/ft², devido ao isolamento dos cabos.

3.8.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona de penetrações mecânicas. Abriga somente cabos de força do Trem A. Possui detecção de fumaça e dispositivos manuais de extinção situados em zonas próximas.

A comunicação com a zona EDS-4 que contém cabos do Trem B não possui barreira qualificada resistente a fogo. Contudo, a distância existente entre as rotas de ambos os trens cumpre o critério de separação exigido pelo Apêndice R, sempre que por procedimentos administrativos se garanta a ausência de materiais combustíveis na área, o que poderia propagar um incêndio entre ambas as zonas.

3.9 ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-1

3.9.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada dentro da Área de Incêndio A, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Sul, compreendendo 7 salas.

Encontram-se os seguintes componentes necessários para a parada segura do reator:

- Centro de Controle de Motores CCM-A1 (Trem A);
- Centro de Controle de Motores CCM-B2 (Trem B);
- Cabos de força dos trens A e B.

Encontram-se, ainda, outros equipamentos tais como “chillers” e painéis elétricos de instrumentação.

Nesta zona, se situam trechos de 66 cabos de força (Trens A e B) que alimentam equipamentos necessários para a parada segura, porém apenas 53 são redundantes.

Do Trem A, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Serviço BAS-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Serviço BAS-1C;
- cabo que alimenta o Transformador das Bombas de Lavagem da Telas Rotativas TBL-1A;
- cabo que alimenta a Bomba de Carregamento BC-1;
- cabo que alimenta o Exaustor de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado EAV-1A;
- cabo que alimenta o Exaustor de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado EAV-1C;
- cabo que alimenta o Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VA-1A;
- cabo que alimenta o Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VA-1C;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VDV-1A;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VDV-2A;
- cabo que alimenta o Inversor que alimenta o Balanço da Planta IVBP-1;
- cabo que alimenta o Inversor IV-1;
- cabo que alimenta o Inversor IV-2;
- cabo que alimenta o Exaustor de Sala de Baterias ESB-1A;
- cabo que alimenta o Exaustor de Sala de Baterias ESB-2A;
- cabo que alimenta a Válvula da Quebra de Vácuo da Contenção VQVC-1A;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Sucção da Bomba do Circuito 1 (*loop*) do Sistema de Refrigeração do Reator VISB-1A;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Sucção da Bomba do Circuito 1 (*loop*) do Sistema de Refrigeração do Reator VISB-2A;

- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Descarga do Acumulador 1 VDA-1A;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento das Válvulas de Alívio do Pressurizador VIAP-1A;
- cabo que alimenta a Ventilação de Refrigeração da Contenção VRC-1A;
- cabo que alimenta a Ventilação de Refrigeração da Contenção VRC-1C;
- cabo que alimenta o Painel de Controle de Resistência de Aquecimento do Duto de Ar Condicionado da Sala de Controle CRAD-1A;
- cabo que alimenta o Carregador de Baterias CB-1;
- cabo que alimenta o Carregador de Baterias CB-3;
- cabo que alimenta o Centro de Controle de Motores CCM-A3;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Trocador de Calor Residual VDTC-1;
- cabo que alimenta a Válvula da Bomba de Água de Alimentação Auxiliar VBAA-1;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1A;
- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-1;
- cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Surto de Injeção de Boro ATSIB;
- cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-1;
- cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-1;
- cabo que alimenta a Refrigeração do Poço de Detectores de Radiação Externos ao Núcleo RDR-1A;
- cabo que alimenta o Transformador para o Painel de Distribuição do Controle de Aquecimento da Linha de Ácido Bórico TRF-1A.

Do Trem B, estão presentes:

- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Serviço BAS-1B;
- cabo que alimenta a Bomba de Água de Serviço BAS-1C;
- cabo que alimenta o Transformador que Alimenta as Bombas de Lavagem da Telas Rotativas TBL-1B;
- cabo que alimenta o Exaustor de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado EAV-1B;

- cabo que alimenta o Exaustor de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado EAV-1D;
- cabo que alimenta o Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VA-1B;
- cabo que alimenta o Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VA-1D;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VDV-1B;
- cabo que alimenta a Válvula de Descarga do Ventilador de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado VDV-2B;
- cabo que alimenta o Inversor que alimenta o Balanço da Planta IVBP-2;
- cabo que alimenta o Inversor IV-3;
- cabo que alimenta o Inversor IV-4;
- cabo que alimenta o Exaustor de Sala de Baterias ESB-1B;
- cabo que alimenta o Exaustor de Sala de Baterias ESB-2B;
- cabo que alimenta a Válvula da Quebra de Vácuo da Contenção VQVC-1B;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Sucção da Bomba do Circuito 1 (*loop*) do Sistema de Refrigeração do Reator VISBSR-1B;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Sucção da Bomba do Circuito 1 (*loop*) do Sistema de Refrigeração do Reator VISBSR-2B;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento da Descarga do Acumulador 1 VDA-1B;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento das Válvulas de Alívio do Pressurizador VIAP-1B;
- cabo que alimenta a Ventilação de Refrigeração da Contenção VRC-1B;
- cabo que alimenta a Ventilação de Refrigeração da Contenção VRC-1D;
- cabo que alimenta o Painel de Controle de Resistência de Aquecimento do Duto de Ar Condicionado da Sala de Controle CRAD-1B;
- cabo que alimenta o Carregador de Baterias CB-2;
- cabo que alimenta a Bomba de Remoção de Calor Residual BRRC-2;
- cabo que alimenta a Válvula de Isolamento do Retorno de Refrigeração dos Mecanismos do Motor das Bombas de Refrigeração do Reator VIRR-1B.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 52000 Btu/ft², devido ao isolamento de cabos e a combustíveis líquidos, principalmente dos “chillers”.

3.9.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

A zona EAS-1 é uma zona constituída por sucessivos corredores. O primeiro é continuação dos corredores situados no Edifício de Segurança (zona EDS-1) e no Edifício Auxiliar Norte (zona EAN-1). A continuação, na direção leste-oeste, se estende em torno das zonas EAS-7 e EAS-8 (salas de operação e oficinas). O final da EAS-1 constitui a área de penetrações elétricas para o edifício do reator.

Esta zona é a mais conflitante da Usina, uma vez que nela se encontram grandes quantidades de bandejas e eletrodutos de cabos redundantes de parada segura, junto com equipamentos mecânicos e equipamentos elétricos com alto risco de incêndio.

A zona possui detectores de fumaça do tipo iônico, extintores portáteis de CO₂ (6 kg) e de pó químico, e cobertura por estações de mangueira. Não possui nenhum sistema automático de extinção.

3.10 ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-2

3.10.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada dentro da Área de Incêndio E1, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Sul, compreendendo apenas uma sala.

O único componente necessário para a parada segura do reator encontrado nesta zona é a Bomba de Carregamento BC-1 (Trem A). Dessa forma, um possível incêndio não afetará nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 33000 Btu/ft², devido principalmente ao óleo lubrificante da bomba.

3.10.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona separada das Áreas de Incêndio adjacentes mediante barreiras resistentes a fogo de 3 horas.

Possui detecção de fumaça do tipo iônica. Os dispositivos de extinção são um hidrante e extintores portáteis de pó químico, situados em zona adjacente.

3.11 ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-3

3.11.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada dentro da Área de Incêndio E2, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Sul, compreendendo apenas uma sala.

O único componente necessário para o desligamento seguro do reator encontrado nesta zona é a Bomba de Carregamento BC-2 (Trem B). Dessa forma, um possível incêndio não afetará nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 33000 Btu/ft², devido principalmente ao óleo lubrificante da bomba.

3.11.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona separada das Áreas de Incêndio adjacentes mediante barreiras resistentes a fogo de 3 horas. Possui detecção de fumaça do tipo iônica. Os dispositivos de extinção são um hidrante e extintores portáteis de pó químico, situados em zona adjacente.

3.12 ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-4

3.12.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está situada dentro da Área de Incêndio E3, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Sul, compreendendo 2 salas.

Nesta zona não se encontram componentes necessários para a parada segura. Encontra-se apenas uma bomba do Sistema de Controle Químico e Volumétrico, não necessária para a parada segura.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 33000 Btu/ft², devido principalmente ao óleo lubrificante da bomba.

3.12.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona separada das Áreas de Incêndio adjacentes mediante barreiras resistentes a fogo de 3 horas.

A zona possui detecção de fumaça do tipo iônica. Os dispositivos de extinção são um hidrante e extintores portáteis de pó químico, situados em zona adjacente.

3.13 ZONA DE AVALIAÇÃO EAS-6

3.13.1 Descrição Física e Conteúdo da Zona

Esta zona está incluída dentro da Área de Incêndio A, na elevação +5,15 m do Edifício Auxiliar Sul, compreendendo uma sala.

Os componentes necessários para a parada segura do reator encontrados nesta zona são cabos de força do Trem A. Dessa forma, um possível incêndio não afetará nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem.

Atribui-se à zona uma carga de incêndio de 42500 Btu/ft², devido principalmente ao isolamento de cabos.

3.13.2 Descrição Relacionada ao Programa de Combate a Incêndio

Trata-se de uma zona reduzida e fechada, que se constitui de área de passagem de pessoal. A zona possui detecção de fumaça do tipo iônica, aparelhos de CO₂ (5kg) e um hidrante situado no acesso.

3.14 RESUMO DA DESCRIÇÃO DAS ZONAS DE AVALIAÇÃO

As informações das zonas de avaliação de incêndio da elevação + 5,15 m (SALDANHA & GRUND, 1996) estão resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Resumo das Características das Zonas de Avaliação da Elevação +5,15m.

Zona de Avaliação	Componentes necessários para Parada Segura	Nº de Cabos Redundantes Necessários p/ a Parada Segura	Carga de Incêndio (Btu/ft ²)	Proteção Contra Incêndio
EAN-1	CCM (1) Cabos de Força - Trem A Cabos de Força - Trem B	6	15000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAN-2	Cabo de Força – Trem B	-	59000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EDS-1	Aquecedor (1) Cabos de Força - Trem A Cabos de Força - Trem B	8	32000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EDS-2	Aquecedores (2) Bombas (2) Cabos de Força - Trem A Cabos de Força - Trem B	4	43500	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EDS-3	Cabos de Força - Trem B	-	12000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EDS-4	Cabos de Força - Trem B	-	20000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EDS-5	Cabos de Força - Trem A	-	39500	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAS-1	CCM's (2) Cabos de Força - Trem A Cabos de Força - Trem B "Chiller" ¹	53	52000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAS-2	Bomba de Carregamento	-	33000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAS-3	Bomba de Carregamento	-	33000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAS-4	Bomba ¹	-	33000	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual
EAS-6	Cabos de Força - Trem A	-	42500	Detecção Iônica de Fumaça Extinção Manual

¹ Componente não necessário para a parada segura.

4 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Esta aplicação da LOPA em uma usina nuclear é baseada no trabalho original de CCPS (2001), porém algumas adaptações serão feitas para se considerar alguns fatores típicos apropriados para incêndio. Estes fatores incluem a probabilidade de incêndio em uma determinada área da usina, de acordo com as possíveis fontes de ignição presentes, assim como as probabilidades de falha na demanda para meios apropriados de prevenção e mitigação de incêndio.

A análise de incêndios aplicada aqui será realizada com base na suposição de que os danos são fundamentalmente causados pela elevação de temperatura que um incêndio proporciona.

Existem outros efeitos secundários de incêndio, como por exemplo, o alto grau de umidade resultante da geração de vapor como produto de combustão, ou do uso de água como agente de supressão; a fumaça gerada que pode causar problemas relacionados à supressão manual, como dificuldades de acesso, visibilidade, respiração, etc., ou a atuação espúria de sistemas automáticos de supressão localizados em áreas diferentes, se estes forem atuados por detectores de fumaça; inundações causadas por excessiva descarga de água e escassez de drenagem; etc. O problema relacionado a esses aspectos é a falta de dados e informações aplicáveis para a quantificação de um possível impacto na avaliação do risco (FERNANDEZ, 1996). Dessa forma, não é do alcance deste estudo analisar estes efeitos.

Assume-se que um incêndio em um determinado compartimento tem o potencial de danificar todos os equipamentos e cabos presentes, e a falha de um cabo em qualquer compartimento pode levar à mesma consequência da falha do próprio componente.

4.2 ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DAS CONSEQÜÊNCIAS

Na indústria de processos químicos, os cenários são geralmente identificados através de um estudo de avaliação de perigos, como o HAZOP. Neste estudo, a LOPA será aplicada na análise do risco de incêndio nas rotas de cabos necessários para a parada segura do reator da Usina de Angra 1. Dessa forma, as conseqüências são definidas como danos (causados por incêndio) aos cabos de desligamento do reator que podem afetar a parada segura.

A severidade das conseqüências deve ser estimada. Portanto, o estado final da conseqüência é definido como o número de cabos redundantes necessários à parada segura do reator, que seriam afetados por um possível cenário de incêndio.

4.3 ETAPA 2 – DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS

Os cenários a serem considerados consistem de incêndios dentro de zonas de avaliação da usina, e são identificados a partir das informações apresentadas no Capítulo 3, onde o sistema estudado foi apresentado.

Esta etapa inclui um processo qualitativo inicial, realizado para identificar zonas de incêndio críticas. Não deve ser tão conservativo, ao ponto de resultar em um número impraticável de cenários a serem avaliados. Por outro lado, deve-se assegurar a condição de que todas as áreas relevantes serão investigadas. Este processo identifica áreas que não contém equipamentos necessários para o desligamento seguro do reator, ou áreas nas quais um incêndio não causa impacto adverso em equipamentos necessários para o desligamento seguro do reator de outras áreas. Essas zonas de incêndio são excluídas da análise (DEY, 1999).

Na elevação + 5,15m, algumas zonas de avaliação possuem equipamentos ou cabos de apenas um trem. Dessa forma, um possível incêndio não afetaria nenhum componente de função redundante, pertencente ao outro trem, e não causaria impacto no desligamento seguro do reator.

Sendo assim, são selecionadas para a aplicação da LOPA as zonas de avaliação críticas, isto é, apenas as zonas que possuem equipamentos e cabos redundantes necessários para a parada segura. Estas são:

- Do Edifício Auxiliar Norte: EAN-1;
- Do Edifício de Segurança: EDS-1 e EDS-2;
- Do Edifício Auxiliar Sul: EAS-1.

Cada cenário deve ter apenas um evento iniciador e uma consequência. O evento iniciador de cada cenário é definido como o incêndio piloto em determinada zona. A consequência, definida na etapa anterior, são os danos causados por incêndio, aos cabos de desligamento do reator.

As salvaguardas candidatas a IPL's são: detecção automática e supressão manual de incêndios. A detecção automática consiste em detectores de fumaça do tipo iônico presentes em todas as zonas. A supressão manual consiste na ação de operadores para extinguir o incêndio piloto através do uso de extintores e mangueiras presentes nas zonas.

Verifica-se se há interação entre as zonas para que sejam identificadas possíveis situações de risco envolvendo mais de um compartimento. Por exemplo, em algumas zonas, a mesma consequência pode ocorrer devido a eventos iniciadores diferentes, isto é, trechos de cabos de uma determinada zona podem ser danificados por um incêndio originado em uma zona adjacente, que se desenvolveu e se propagou por não haver entre elas uma barreira resistente a fogo qualificada. Conexões entre zonas através de dutos de ventilação não foram consideradas.

As zonas EAN-1, EDS-1 e EAS-1 formam um grande corredor de comunicação sem barreiras entre os Edifícios Auxiliar Norte, de Segurança e Auxiliar Sul.

É importante observar que, apesar da zona EDS-4 possuir apenas cabos de força do Trem B, enquanto a zona EDS-5 possui apenas cabos de força do Trem A, a comunicação entre ambas as zonas não possui barreira qualificada resistente a fogo, portanto, um incêndio em qualquer uma destas zonas poderia afetar cabos dos dois trens. Contudo, a distância existente entre as rotas de ambos os trens cumpre o critério de separação exigido pelo Apêndice R, sempre que por procedimento administrativo se garanta a ausência de materiais combustíveis na área, o que poderia propagar um incêndio entre ambas as zonas. Como a presença de combustíveis transientes nesta área é controlada cuidadosamente, um possível cenário de propagação de incêndio entre estas zonas não é considerado. Portanto, as mesmas podem continuar fora da análise.

Neste estudo, não serão consideradas falhas das barreiras que limitam áreas e zonas de incêndio. NRC (2006) diz que um aumento de pressão que leva à falhas prematuras de barreiras devido a incêndios dentro de um compartimento de usina nuclear é considerado altamente improvável. Nos compartimentos projetados de acordo com o critério de contenção de incêndio (IAEA, 1992), deve-se considerar que os elementos passivos das barreiras de incêndio não serão destruídos por um incêndio iniciado dentro de um compartimento. Entretanto, é necessário confirmar que não há concentração de materiais combustíveis próximos das barreiras, o que pode invalidar esse critério. Sendo assim, não é considerada a propagação de incêndio entre zonas separadas por barreiras com resistência a fogo de 1,5 e 3 horas.

A relação dos cenários identificados para a análise do risco de incêndio das zonas da elevação +5,15 m dos Edifícios Auxiliar Norte, Auxiliar Sul e de Segurança estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Relação de Cenários Identificados.

Zona de Avaliação	Cenário	Evento Iniciador
EAN-1	EAN-1 [1]	Incêndio piloto na zona EAN-1
	EAN-1 [2]	Incêndio piloto na zona EDS-1
EDS-1	EDS-1 [1]	Incêndio piloto na zona EDS-1
	EDS-1 [2]	Incêndio piloto na zona EAN-1
	EDS-1 [3]	Incêndio piloto na zona EAS-1
EDS-2	EDS-2 [1]	Incêndio piloto na zona EDS-2
EAS-1	EAS-1 [1]	Incêndio piloto na zona EAS-1
	EAS-1 [2]	Incêndio piloto na zona EDS-1

4.4 ETAPA 3 – DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR

O evento iniciador de cada cenário é um incêndio piloto em uma determinada zona de avaliação. Portanto, nessa etapa, o objetivo é determinar a frequência de incêndio de cada zona.

Dados históricos da usina ou similares não estavam disponíveis. O procedimento utilizado para estimar as frequências de incêndio tem como base um banco de dados genérico disponível em EPRI/NRC-RES (2005).

A frequência de cada compartimento (Zona de Avaliação) é calculada através da soma de todas as frequências associadas às diferentes fontes de ignição presentes no compartimento.

A frequência para cada fonte de ignição, $\lambda_{IS,J}$, num compartimento J , é estimada através da equação (4.1):

$$\lambda_{IS,J} = \lambda_{IS} W_L W_{IS,J,L} \quad (4.1)$$

onde

λ_{IS} é a frequência de incêndio genérica associada à fonte de ignição IS

W_L é o fator de localização associado à fonte de ignição

$W_{IS,J,L}$ é o fator de fonte de ignição que reflete a quantidade de cada tipo de fonte de ignição presente no compartimento J da localização L

Então, para cada compartimento, a frequência de incêndios, $\lambda_{J,L}$, é obtida pela soma das frequências para casa fonte ignição:

$$\lambda_{J,L} = \sum \lambda_{IS,J} = \sum \lambda_{IS} W_L W_{IS,J,L} \quad (4.2)$$

EPRI/NRC-RES (2005) fornece valores tabelados para a frequência de incêndio genérica, λ_{IS} , de diversos locais e fontes de ignição encontrados em uma usina nuclear.

O fator de localização W_L ajusta as frequências para situações onde um local, ou um conjunto de equipamentos, é compartilhado entre unidades múltiplas. Assim, este fator só é aplicável para usinas com mais de uma unidade. Para usinas com apenas uma unidade, como é o caso de Angra 1, $W_L = 1,0$ deve ser utilizado.

O fator de fonte de ignição, $W_{IS,J,L}$, é a fração de um determinado tipo de fonte de ignição que está presente em um compartimento específico, da localização L . Conseqüentemente, para determinar esses fatores, é necessário obter uma conta da quantidade de cada tipo de fonte de ignição para cada compartimento, e para toda a localização.

Este modelo é baseado nas seguintes hipóteses:

- as freqüências de incêndio permanecem constantes ao longo do tempo;
- dentro de cada planta, a probabilidade de incêndio é sempre a mesma para um determinado tipo de equipamento. Por exemplo, assume-se que qualquer bomba tenha a mesma freqüência de ignição de incêndio, sem levar em conta o tamanho, o nível de utilização ou o ambiente de trabalho.

As fontes de ignição presentes em cada zona devem ser identificadas. Em geral, cabos elétricos e óleos lubrificantes são as fontes de incêndio primárias encontradas em usinas nucleares (NRC, 2006).

A partir das informações apresentadas no Capítulo 3, determinam-se as fontes de ignição de cada zona. Estas incluem os cabos de força, painéis elétricos (Centro de Controle de Motores) e bombas. Os cabos são considerados em duas categorias: incêndios originados por auto-ignição e incêndios originados por trabalhos de soldagem e corte.

Os valores da freqüência de incêndio genérica, λ_{IS} , para cada fonte de ignição foram obtidos em EPRI/NRC-RES (2005) e estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Freqüências de Incêndio Genéricas para as Fontes de Ignição.

Fontes de Ignição	λ_{IS} (ano ⁻¹)
Cabos - incêndios causados por soldagem / cortes	$1,6 \times 10^{-3}$
Cabos - incêndios causados por auto-ignição	$4,4 \times 10^{-3}$
Painéis Elétricos	$4,5 \times 10^{-2}$
Bombas	$9,7 \times 10^{-3}$

Os fatores de fonte de ignição, $W_{IS,J,L}$, para cabos, foram determinados a partir das cargas de incêndio das zonas. Foi possível determinar a fração de cabos em cada zona de avaliação, dividindo a carga de incêndio, devido a cabos, de uma determinada zona pela soma das cargas de incêndio de todas as zonas da elevação analisada que contêm cabos.

No caso das bombas e dos painéis elétricos, o procedimento é mais simples, pois são equipamentos que podem ser contados facilmente. O fator de fonte de ignição, $W_{IS,J,L}$, é determinado pelo número de bombas (ou painéis) de cada zona dividido pelo número total de bombas (ou painéis) das zonas da elevação.

O sistema de “chillers” encontrado na zona EAS-1 foi incluído na análise como uma bomba, pois não havia informação específica em EPRI/NRC-RES (2005).

A Tabela 4.3 apresenta os valores utilizados para o cálculo dos fatores de fonte de ignição, $W_{IS,J,L}$, e os resultados obtidos.

Tabela 4.3. Fatores de Fonte de Ignição, $W_{IS,J,L}$.

CABOS (soldagem e auto-ignição)			
Zona de Avaliação	Carga de Incêndio da Zona (Btu/ft²)	Carga de Incêndio da Elevação (Btu/ft²)	$W_{IS,J,L}$
EAN-1	15000	315500	$4,75 \times 10^{-2}$
EDS-1	32000		$1,01 \times 10^{-1}$
EDS-2	43500		$1,38 \times 10^{-1}$
EAS-1	52000		$1,65 \times 10^{-1}$
PAINÉIS ELÉTRICOS			
Zona de Avaliação	Número de Painéis Elétricos na Zona	Número de Painéis Elétricos na Elevação	$W_{IS,J,L}$
EAN-1	1	3	$3,33 \times 10^{-1}$
EAS-1	2		$6,67 \times 10^{-1}$
BOMBAS			
Zona de Avaliação	Número de Bombas na Zona	Número de Bombas na Elevação	$W_{IS,J,L}$
EDS-2	2	6	$3,33 \times 10^{-1}$
EAS-1	1		$1,67 \times 10^{-1}$

Utilizando a equação (4.1) e fazendo $W_L = 1$, estima-se as frequências para cada fonte de ignição, $\lambda_{IS,J}$, de cada uma das zonas. Logo após, utilizando a equação (4.2), somam-se os resultados obtidos para cada zona de avaliação, obtendo-se a frequência de incêndios total.

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para as frequências de cada fonte de ignição, $\lambda_{IS,J}$, e os resultados das frequências de incêndio de cada zona de avaliação.

Tabela 4.4. Frequência de Incêndio das Zonas de Avaliação.

Zona de Avaliação	Fontes de Ignição	$\lambda_{IS,J}$ (ano ⁻¹)	Frequência de incêndio (ano ⁻¹)
EAN-1	Cabos (soldagem)	$7,61 \times 10^{-5}$	$1,53 \times 10^{-2}$
	Cabos (auto-ignição)	$2,09 \times 10^{-4}$	
	Painel Elétrico (CCM-B1)	$1,50 \times 10^{-2}$	
EDS-1	Cabos (soldagem)	$1,62 \times 10^{-4}$	$6,09 \times 10^{-4}$
	Cabos (auto-ignição)	$4,46 \times 10^{-4}$	
EDS-2	Cabos (soldagem)	$2,21 \times 10^{-4}$	$4,05 \times 10^{-3}$
	Cabos (auto-ignição)	$6,07 \times 10^{-4}$	
	Bombas (BRIB-1 e BRIB-2)	$3,22 \times 10^{-3}$	
EAS-1	Cabos (soldagem)	$2,64 \times 10^{-4}$	$3,26 \times 10^{-2}$
	Cabos (auto-ignição)	$7,25 \times 10^{-4}$	
	Painéis Elétricos (CCM-A1 e CCM-B2)	$3,00 \times 10^{-2}$	
	“Chiller” (Bomba)	$1,61 \times 10^{-3}$	

4.5 ETAPA 4 – IDENTIFICAÇÃO DAS IPL's E DETERMINAÇÃO DAS PFD's

As salvaguardas identificadas na etapa de desenvolvimento dos cenários são analisadas para se verificar o atendimento às exigências de camadas de proteção independentes.

As salvaguardas presentes em todas as zonas são:

- detecção automática: detectores de fumaça do tipo iônico;
- supressão manual: ação de operadores para extinguir o incêndio piloto, através do uso de extintores, mangueiras e hidrantes presentes nas zonas.

Para que uma salvaguarda seja uma IPL, ela deve ser eficaz, independente e auditável, como visto na subseção 2.6.4.1. Uma rápida análise mostra que essas duas salvaguardas não podem ser consideradas como IPL's separadamente, pois a supressão manual não é independente da detecção automática. Além disso, somente a detecção automática não é eficaz em evitar a consequência.

Dessa forma, a ação combinada de detecção automática e supressão manual pode ser considerada uma IPL, uma vez que atende às exigências de eficácia, independência e auditabilidade.

Normalmente, sistemas de proteção contra incêndio não são considerados IPL's porque atuam após o evento, para a maioria dos cenários, e sua disponibilidade e eficácia podem ser afetadas pelo incêndio que se pretende conter. Porém, foi demonstrado que, dentro desta aplicação, a detecção automática e supressão manual de incêndios dos cenários analisados atendem às exigências de uma IPL.

Na ausência de dados específicos da planta, como registros de manutenção e testes, os dados de confiabilidade dos sistemas de detecção e supressão serão extraídos de fontes genéricas de informação.

GRUND (2001) determinou uma probabilidade de falha na demanda de 4×10^{-2} para sistemas de detecção automática.

A supressão manual envolve confiança em operadores, para que a ação de extinção de incêndio seja realizada, em resposta ao alarme proveniente da detecção automática. Não se encontravam disponíveis dados de falhas específicos para os equipamentos utilizados (extintores de CO₂, mangueiras, hidrantes). Considera-se a hipótese de que a probabilidade de falha desses equipamentos é muito pequena, portanto a PFD da supressão manual será determinada com base somente na ação do operador.

CCPS (2001) fornece valores para PFD de IPL's de ações humanas. É sugerida uma PFD igual a 1×10^{-1} , para ação humana com tempo de resposta de 10 minutos.

Combinando as PFD's para detecção automática e supressão manual, se obtém uma PFD para a IPL identificada:

$$(4 \times 10^{-2}) \cdot (1 \times 10^{-1}) = 4 \times 10^{-3}.$$

É importante mencionar que dados de confiabilidade dos equipamentos de proteção contra incêndio, utilizados em usinas nucleares, são razoavelmente maiores do que dados de indústrias não-nucleares. Isto pode ser explicado pelo fato de que na área nuclear se aplicam muito bem os conceitos de inspeção e manutenção, e os equipamentos utilizados são de alta qualidade devido a padrões industriais e padrões nucleares adicionais (BERG *et al.*, 1997). Além disso, usinas nucleares possuem brigadas de incêndio dedicadas e bem treinadas.

4.6 ETAPA 5 – DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS E DO RISCO DOS CENÁRIOS

Nesta etapa, os cenários identificados e as camadas de proteção independentes (IPL's) são utilizados para calcular a frequência de mitigação do cenário, combinando a frequência do evento iniciador com as PFD's das IPL's.

4.6.1 Cálculo da Frequência dos Cenários

A frequência dos cenários é determinada através da equação (2.1). Para cada cenário identificado na Etapa 2, a frequência do evento iniciador (incêndio piloto), determinada na Etapa 3, é multiplicada pela PFD da IPL, determinada na Etapa 4.

Para zonas de avaliação que possuem mais de um cenário, as frequências dos mesmos devem ser somadas, utilizando a equação (2.7), para que uma análise zona a zona possa ser realizada.

A Tabela 4.5 apresenta os dados utilizados nos cálculos, e os resultados obtidos para as frequências dos cenários e de cada zona de avaliação.

Tabela 4.5. Frequências de Mitigação dos Cenários e das Zonas de Avaliação.

Zona de Avaliação	Cenário	Frequência do Evento Iniciador (ano ⁻¹)	PFD da IPL	Frequência do Cenário (ano ⁻¹)	Frequência da Zona (ano ⁻¹)
EAN-1	EAN-1 [1]	$1,53 \times 10^{-2}$	4×10^{-3}	$6,11 \times 10^{-5}$	$6,36 \times 10^{-5}$
	EAN-1 [2]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-3}	$2,43 \times 10^{-6}$	
EDS-1	EDS-1 [1]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-3}	$2,43 \times 10^{-6}$	$1,94 \times 10^{-4}$
	EDS-1 [2]	$1,53 \times 10^{-2}$	4×10^{-3}	$6,11 \times 10^{-5}$	
	EDS-1 [3]	$3,26 \times 10^{-2}$	4×10^{-3}	$1,30 \times 10^{-4}$	
EDS-2	EDS-2 [1]	$4,05 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}	$1,62 \times 10^{-5}$	$1,62 \times 10^{-5}$
EAS-1	EAS-1 [1]	$3,26 \times 10^{-2}$	4×10^{-3}	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$
	EAS-1 [2]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-3}	$2,43 \times 10^{-6}$	

4.6.2 Cálculo do Risco dos Cenários

O risco de cada zona de avaliação é estimado através da equação (2.6), combinando a frequência de mitigação da zona com um fator relacionado à magnitude da consequência. Como definido na Etapa 1, o estado final da consequência, isto é, o fator C_k da equação (2.6), é o número de cabos redundantes necessários para a parada segura do reator, presentes na zona de avaliação do cenário. Assumiu-se que todos os cabos de um compartimento são danificados por um possível incêndio desenvolvido.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos para o risco de cada zona de avaliação.

Tabela 4.6. Estimativa do Risco das Zonas de Avaliação.

Zona de Avaliação	Frequência de Mitigação (ano ⁻¹)	Número de Cabos Redundantes Presentes na Zona	Risco (número de cabos danificados / ano)
EAN-1	$6,36 \times 10^{-5}$	6	$3,81 \times 10^{-4}$
EDS-1	$1,94 \times 10^{-4}$	8	$1,55 \times 10^{-3}$
EDS-2	$1,62 \times 10^{-5}$	4	$6,48 \times 10^{-5}$
EAS-1	$1,33 \times 10^{-4}$	53	$7,04 \times 10^{-3}$

As tabelas para documentação e cálculo dos cenários estudados foram elaboradas tomando como base a Tabela 2.1, e estão apresentadas no Apêndice A.

4.7 ETAPA 6 – AVALIAÇÃO DO RISCO PARA TOMADA DE DECISÕES

Após a estimativa do risco de cada zona de avaliação, chega-se à etapa de tomada de decisões. O risco deve ser comparado a um critério de tolerância pré-estabelecido. Se o risco for inaceitável, camadas adicionais de proteção devem ser acrescentadas.

Não existe um critério de tolerância de risco específico para a situação deste estudo, isto é, não há um critério que defina o risco máximo tolerado para danos em cabos de desligamento seguro de um reator nuclear. Porém, a LOPA permite um conhecimento melhor do risco, proporcionando uma base para julgamento.

Deve ser feita uma comparação entre os riscos estimados para cada zona, para que determinadas decisões e ações de redução de risco possam ser priorizadas, de acordo com a magnitude do risco.

A zona de avaliação que apresenta o maior risco é a zona EAS-1, com um risco estimado de $7,04 \times 10^{-3}$ cabos danificados por ano. Em seguida, a zona EDS-1, com um risco de $1,55 \times 10^{-3}$ cabos danificados por ano. Logo após, a zona EAN-1 possui um risco estimado de $3,81 \times 10^{-4}$ cabos danificados por ano. Por último, a zona EDS-2, com o menor risco, equivalente a $6,48 \times 10^{-5}$ cabos danificados por ano.

Ao se completar a análise, podem ser feitas recomendações para se reduzir o risco de incêndio, e também para avaliar a eficácia da implementação de diferentes modificações.

4.7.1 Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EAS-1

Conclui-se que a zona EAS-1 é, sem dúvida, a mais crítica da usina, portanto, requer prioridade no fornecimento de mitigação adicional. Recomenda-se intensificar as medidas de detecção e extinção de incêndios com os seguintes sistemas:

- sistema de detecção de fumaça antecipatório (de alta sensibilidade);
- sistema automático de extinção de incêndio por água pulverizada;
- cortina de água pulverizada na linha de fronteira entre as zonas EAS-1 e EDS-1.

Uma vez que a zona já possui detecção automática, a recomendação priorizada é a utilização de um sistema de supressão automática, em conjunto com a cortina de água pulverizada na fronteira entre as zonas EAS-1 e EDS-1. A cortina atuará como uma barreira para o cenário EAS-1 [2], onde um incêndio na zona adjacente EDS-1 danifica cabos da zona EAS-1.

Utilizando uma PFD de 10^{-2} (MARKOWSKI, 2006) para o sistema de supressão automática, assim como para a cortina de água pulverizada na linha de fronteira, através da equação (2.7), recalcula-se a frequência de mitigação para os cenários desta zona. A Tabela 4.7 apresenta o resultado.

Tabela 4.7. Frequência de Mitigação da Zona EAS-1 Após Mitigação Adicional.

Cenário	Frequência de Incêndio (ano ⁻¹)	PFD			Frequência do Cenário (ano ⁻¹)	Frequência de Mitigação da Zona (ano ⁻¹)
		Detecção Automática	Supressão Automática	Cortina de Água		
EAS-1 [1]	$3,26 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	10^{-2}	-	$1,30 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-5}$
EAS-1 [2]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	$2,43 \times 10^{-9}$	

Analisando os valores da Tabela 4.7, observa-se que a inclusão da cortina de água não influi no valor final da frequência de mitigação da zona. A frequência calculada com a cortina como IPL para o cenário EAS-1 [2] é igual a $1,30 \times 10^{-5}$ ano⁻¹. Já o cálculo sem considerar a cortina como IPL resulta em uma frequência igual a $1,33 \times 10^{-5}$ ano⁻¹, ou seja, os resultados são praticamente iguais. Dessa forma, para a zona EAS-1, a instalação de uma cortina de água pulverizada na sua fronteira com o Edifício de Segurança pode ser descartada.

Já a modificação de supressão manual para automática promove uma redução de 90,18 % da frequência de mitigação da zona. Conseqüentemente, se reduz significativamente o risco de cabos necessários à parada segura serem danificados por um incêndio nesta zona.

Multiplicando o valor da frequência de mitigação, com a substituição de supressão manual por automática, pelo número de cabos presentes (53 cabos redundantes), o novo risco da zona EAS-1 é determinado:

$$(1,30 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}) \times 53 \text{ cabos} = 6,91 \times 10^{-4} \text{ cabos danificados por ano.}$$

4.7.2 Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EDS-1

Esta zona possui fronteira sem barreira resistente a fogo com a zona mais crítica da elevação. Seu risco também está bem elevado, portanto, recomenda-se intensificar as medidas de detecção e extinção de incêndios com os seguintes sistemas:

- sistema de detecção de fumaça antecipatório (de alta sensibilidade);
- sistema automático de extinção de incêndio por água pulverizada;
- cortinas de água pulverizada nas linhas de fronteira entre a zona EDS-1 e as zonas EAS-1 e EAN-1.

Uma vez que a zona já possui detecção automática, a recomendação priorizada é a utilização de um sistema de supressão automática, em conjunto com as cortinas de água pulverizada nas linhas de fronteira entre a zona EDS-1 e as zonas EAS-1 e EAN-1. As cortinas atuarão como barreiras para os cenários EDS-1 [2] e EDS-1 [3], onde incêndios nas zonas adjacentes EAN-1 e EAS-1 danificam cabos da zona EDS-1.

Utilizando uma PFD de 10^{-2} (MARKOWSKI, 2006) para o sistema de supressão automática, assim como para a cortina de água pulverizada na linha de fronteira, através da equação (2.7), recalcula-se a frequência de mitigação para os cenários desta zona. A Tabela 4.8 apresenta o resultado.

Tabela 4.8. Frequência de Mitigação da Zona EDS-1 Após Mitigação Adicional.

Cenário	Frequência de Incêndio (ano ⁻¹)	PFD			Frequência do Cenário (ano ⁻¹)	Frequência de Mitigação da Zona (ano ⁻¹)
		Detecção Automática	Supressão Automática	Cortina de Água		
EDS-1 [1]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-2}	10^{-2}	-	$2,43 \times 10^{-7}$	$4,35 \times 10^{-7}$
EDS-1 [2]	$1,53 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	$6,11 \times 10^{-8}$	
EDS-1 [3]	$3,26 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	$1,30 \times 10^{-7}$	

Na seção anterior foi concluído que uma cortina de água pulverizada entre as zonas EDS-1 e EAS-1 não influenciaria o risco da zona EAS-1. Porém, analisando as informações da Tabela 4.8, conclui-se que essa mesma cortina promove uma redução significativa do risco da zona EDS-1. Portanto, deve ser recomendada, assim como a cortina entre as zonas EDS-1 e EAN-1, e o sistema de supressão automática.

Multiplicando o valor da frequência de mitigação recalculada pelo número de cabos presentes (8 cabos redundantes), o novo risco da zona EAS-1 é determinado:

$$(4,35 \times 10^{-7} \text{ ano}^{-1}) \times 8 \text{ cabos} = 3,48 \times 10^{-6} \text{ cabos danificados por ano.}$$

Esse conjunto de modificações promove uma redução de 99,78 % no risco de cabos necessários à parada segura serem danificados nesta zona por um incêndio.

4.7.3 Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EAN-1

Para se reduzir o risco de $3,81 \times 10^{-4}$ cabos danificados por ano nesta zona, também se recomenda intensificar as medidas de detecção e extinção de incêndios com os seguintes sistemas:

- sistema de detecção de fumaça antecipatório (de alta sensibilidade);
- sistema automático de extinção de incêndio por água pulverizada;
- cortina de água pulverizada na linha de fronteira entre as zonas EAS-1 e EDS-1.

Uma vez que a zona já possui detecção automática, a recomendação priorizada é a utilização de um sistema de supressão automática, em conjunto com a cortina de água pulverizada na linha de fronteira entre as zonas EAN-1 e EDS-1. A cortina atuará como uma barreira para o cenário EAN-1 [2], onde um incêndio na zona adjacente EDS-1 danifica cabos da zona EAN-1.

Utilizando uma PFD de 10^{-2} (MARKOWSKI, 2006) para o sistema de supressão automática, assim como para a cortina de água pulverizada na linha de fronteira, através da equação (2.7), recalcula-se a frequência de mitigação para os cenários desta zona. A Tabela 4.9 apresenta o resultado.

Tabela 4.9. Frequência de Mitigação da Zona EAN-1 Após Mitigação Adicional.

Cenário	Frequência de Incêndio (ano ⁻¹)	PFD			Frequência do Cenário (ano ⁻¹)	Frequência de Mitigação da Zona (ano ⁻¹)
		Detecção Automática	Supressão Automática	Cortina de Água		
EAN-1 [1]	$1,53 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	10^{-2}	-	$6,11 \times 10^{-6}$	$6,12 \times 10^{-6}$
EAN-1 [2]	$6,09 \times 10^{-4}$	4×10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	$2,43 \times 10^{-9}$	

Analisando os valores da Tabela 4.9, observa-se que a inclusão da cortina de água reduz muito pouco o valor final da frequência de mitigação da zona. A frequência calculada com a cortina como IPL para o cenário EAN-1 [2] é igual a $6,12 \times 10^{-6}$ ano⁻¹. Já o cálculo sem considerar a cortina como IPL resulta em uma frequência igual a $6,37 \times 10^{-6}$ ano⁻¹, ou seja, os resultados são muito próximos.

Esta cortina poderia ser descartada, porém sua utilização reduz significativamente o risco da zona adjacente EDS-1.

Multiplicando o valor da frequência de mitigação recalculada pelo número de cabos presentes (6 cabos redundantes), o novo risco da zona EAN-1 é determinado:

$$(6,12 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}) \times 6 \text{ cabos} = 3,67 \times 10^{-5} \text{ cabos danificados por ano.}$$

Esse conjunto de modificações promove uma redução de 90,37 % no risco de cabos necessários à parada segura serem danificados nesta zona por um incêndio.

4.7.4 Avaliação do Risco da Zona de Avaliação EDS-2

Para se reduzir o risco de $1,26 \times 10^{-4}$ cabos danificados por ano nesta zona, se recomenda intensificar o meio de extinção de incêndios com um sistema automático de extinção de incêndio por água pulverizada, atuado por detecção térmica.

Utilizando uma PFD de 10^{-2} (MARKOWSKI, 2006) para o sistema de supressão automática, através da equação (2.7), recalcula-se a frequência de mitigação para o cenário desta zona. A Tabela 4.10 apresenta o resultado.

Tabela 4.10. Frequência de Mitigação da Zona EDS-2 Após Mitigação Adicional.

Cenário	Frequência de Incêndio (ano^{-1})	PFD		Frequência de Mitigação da Zona (ano^{-1})
		Detecção Automática	Supressão Automática	
EDS-2	$4,05 \times 10^{-3}$	4×10^{-2}	10^{-2}	$1,62 \times 10^{-6}$

Multiplicando o valor da frequência de mitigação recalculada pelo numero de cabos presentes (4 cabos redundantes), o novo risco da zona EAN-1 é determinado:

$$(1,62 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}) \times 4 \text{ cabos} = 6,48 \times 10^{-6} \text{ cabos danificados por ano.}$$

A modificação de supressão manual para automática promove uma redução de 99,9 % no risco de cabos necessários à parada segura serem danificados nesta zona por um incêndio.

A Tabela 4.11 apresenta um sumário dos resultados obtidos com as modificações de projeto.

Tabela 4.11. Sumário dos Resultados Obtidos Após as Recomendações.

Zona de Avaliação	Risco Sem Modificações (cabos danificados/ano)	Risco Com Modificações (cabos danificados/ano)	Redução do Risco
EAN-1	$3,81 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-5}$	90,37 %
EDS-1	$1,55 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-6}$	99,78 %
EDS-2	$6,48 \times 10^{-5}$	$6,48 \times 10^{-6}$	99,90 %
EAS-1	$7,04 \times 10^{-3}$	$6,91 \times 10^{-4}$	90,18 %

Sugere-se a realização de uma análise custo-benefício para todas as zonas, com a finalidade de se comparar o valor das opções de melhoria. Esta técnica suplementa as aproximações básicas de julgamento do risco, comparando o custo da consequência evitada e sua frequência, com o custo da redução do risco que determinada IPL promove.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A Análise de Camadas de Proteção fornece uma abordagem racional, objetiva, simplificada e válida para a avaliação das camadas necessárias de proteção contra incêndio em determinados cenários de acidente de uma usina nuclear.

Na indisponibilidade da Análise Probabilística de Segurança, a LOPA proporciona resultados rápidos para a quantificação do risco de incêndios, facilitando a tomada de decisões e proporcionando certo conhecimento do impacto das medidas de proteção contra incêndio. A LOPA pode ser útil como uma abordagem prévia, não devendo ser utilizada em substituição à APS.

A maior dificuldade encontrada na realização deste trabalho foi a determinação das freqüências de incêndio dos compartimentos analisados, e a identificação das probabilidades de falha na demanda dos sistemas de detecção e supressão, devido à falta de informações relevantes específicas da usina (por exemplo, localização de todas as fontes de ignição, freqüências de incêndio de compartimentos, confiabilidade dos meios de detecção e extinção, etc.).

Uma base de dados atualizada mostra-se extremamente necessária para a realização de análises probabilísticas de incêndio. A base de dados deve considerar dados específicos das usinas brasileiras ou similares, para substituir dados genéricos de outros bancos de dados e fontes, reduzindo as incertezas da análise.

Além disso, dados, informações e referências relacionadas à LOPA estão voltados apenas para indústria de processos.

Estas restrições mencionadas acima são umas das principais fontes de incerteza introduzidas nos resultados da LOPA.

Ao longo da análise, são feitas simplificações para compensar a falta de conhecimento e informações. Por exemplo, o fato de se considerar apenas os efeitos de elevação da temperatura em eventos de incêndio pode ter sido muito conservativo.

Uma avaliação de incêndio mais detalhada requer modelos dinâmicos dos efeitos de incêndio, incluindo a modelagem física da propagação. Se modelos complexos de incêndio são necessários para se avaliar o risco de um cenário, então uma análise quantitativa mais rigorosa se torna mais apropriada.

Apesar de suas limitações, a LOPA é capaz de promover uma redução no esforço analítico e assegurar uma distribuição de recursos eficaz para a intensificação ou melhora dos sistemas de proteção contra incêndio. Seus resultados quantitativos são úteis para se determinar a urgência de medidas de reforço, podendo poupar tempo ao se analisar cenários mais complexos, pois focaliza a tomada de decisão.

As zonas da usina onde modificações de projeto devem ser priorizadas para redução de risco são determinadas através de análises e comparações entre os resultados estimados.

Os resultados da LOPA comprovam as vantagens de sistemas automáticos de detecção e supressão de incêndios. Também identificam quais as áreas que devem ser bem conhecidas pela brigada de incêndio, e as áreas que devem receber atenção especial durante treinamento de pessoal. Por outro lado, os resultados da LOPA podem evitar a instalação de sistemas de proteção redundantes que não contribuiriam para a segurança da usina.

A aplicação da LOPA é bem simples e pode ser realizada em todos os compartimentos da usina que possuem equipamentos necessários para o desligamento seguro do reator. Recomenda-se dar prioridade aos compartimentos onde os critérios de separação física entre trens redundantes não sejam atendidos. Recomenda-se, também, a aplicação da LOPA na Usina de Angra 2.

A LOPA ainda pode ser estendida a diversas outras situações que envolvam a tomadas de decisão baseadas na informação do risco, como por exemplo, na fase de projeto, na avaliação de modificações de projeto, no planejamento de respostas de emergência, na avaliação e classificação de eventos, etc.

APÊNDICE A

DOCUMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS

As tabelas para documentação e cálculo dos cenários estudados foram elaboradas tomando como base a Tabela 2.1, e serão apresentadas a seguir.

As Tabelas A.1 e A.2 documentam os dois cenários da zona de avaliação de incêndio EAN-1. As Tabelas A.3, A.4 e A.5 documentam os três cenários da zona de avaliação de incêndio EDS-1. A Tabela A.6 documenta o único cenário da zona de avaliação de incêndio EDS-2. Por fim, as Tabelas A.7 e A.8 documentam os dois cenários da zona de avaliação de incêndio EAS-1.

Tabela A.1. Tabela-Resumo do Cenário EAN-1 [1].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EAN-1	EAN-1 [1]	Incêndio na zona EAN-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 6 (seis) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EAN-1	$1,53 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$6,11 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
Observações: Cabos redundantes danificados por incêndio: <ul style="list-style-type: none">• cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A (Trem A);• cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem A);• cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1A (Trem A);• cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B (Trem B);• cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem B);• cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1B (Trem B).		

Tabela A.2. Tabela-Resumo do Cenário EAN-1 [2].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EAN-1	EAN-1 [2]	Incêndio na zona EAN-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Consequência (Descrição / Categoria)	Danos a 6 (seis) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EDS-1	$6,09 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Consequência Mitigada		$2,43 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Cabos redundantes danificados por incêndio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Reposição do Reator BAR-1B (Trem B). 		

Tabela A.3. Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [1].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EDS-1	EDS-1 [1]	Incêndio na zona EDS-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 8 (oito) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EDS-1	$6,09 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$2,43 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Cabos redundantes danificados por incêndio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-1 (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2 (Trem B). 		

Tabela A.4. Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [2].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EDS-1	EDS-1 [2]	Incêndio na zona EDS-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 8 (oito) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EAN-1	$1,53 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$6,11 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Cabos redundantes danificados por incêndio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-1 (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2 (Trem B). 		

Tabela A.5. Tabela-Resumo do Cenário EDS-1 [3].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EDS-1	EDS-1 [3]	Incêndio na zona EDS-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 8 (oito) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EAS-1	$3,26 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$1,30 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Cabos redundantes danificados por incêndio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1A (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-1 (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Refrigeração de Componentes BRC-1C (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Água de Alimentação Auxiliar BAA-1B (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Transferência de Ácido Bórico BTAB-2 (Trem B). 		

Tabela A.6. Tabela-Resumo do Cenário EDS-2 [1].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EDS-2	EDS-2 [1]	Incêndio na zona EDS-2, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 4 (quatro) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EDS-2	$4,05 \times 10^{-3} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$1,62 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Cabos redundantes danificados por incêndio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-1 (Trem A); • cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-1 (Trem A); • cabo que alimenta o Aquecedor do Tanque de Injeção de Boro ATIB-2 (Trem B); • cabo que alimenta a Bomba de Recirculação de Injeção de Boro BRIB-2 (Trem B). 		

Tabela A.7. Tabela-Resumo do Cenário EAS-1 [1].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EAS-1	EAS-1 [1]	Incêndio na zona EAS-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 53 (cinquenta e três) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EAS-1	$3,26 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$1,30 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Sistemas/Equipamentos afetados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bombas de Refrigeração de Componentes; • Bombas de Água de Alimentação Auxiliar; • Bombas de Água de Serviço; • Transformadores das Bombas de Lavagem da Telas Rotativas; • Bombas de Carregamento; • Exaustores de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado; • Ventiladores de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado; • Válvulas de Descarga dos Ventiladores de Suprimento de Ar para Acesso Controlado; • Inversores que alimentam o Balanço da Planta; • Inversores; • Exaustores de Sala de Baterias; • Válvulas da Quebra de Vácuo da Contenção; • Válvulas de Isolamento da Sucção da Bomba do Sistema de Refrigeração do Reator; • Válvulas de Isolamento da Descarga do Acumulador 1; • Válvulas de Isolamento das Válvulas de Alívio do Pressurizador; • Ventilação de Refrigeração da Contenção; • Painéis de Controle de Aquecimento do Duto de Ar Condicionado da Sala de Controle; • Carregadores de Baterias. 		

Tabela A.8. Tabela-Resumo do Cenário EAS-1 [2].

Zona de Avaliação	Número do Cenário	Título do Cenário
EAS-1	EAS-1 [2]	Incêndio na zona EAS-1, que resulta em danos a cabos de potência redundantes necessários à parada segura.
	Descrição	Frequência
Conseqüência (Descrição / Categoria)	Danos a 53 (cinquenta e três) cabos de potência redundantes necessários à parada segura do reator (ver observações abaixo).	
Evento Iniciador	Incêndio piloto na zona EDS-1	$6,09 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$
Camadas de Proteção Independentes (IPL's)	Detecção automática + Supressão manual (operador)	$4,0 \times 10^{-3}$ (PFD)
Frequência da Conseqüência Mitigada		$2,43 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$
Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Não há critério de tolerância.		
Ações Necessárias para Redução do Risco:		
<p>Observações:</p> <p>Sistemas/Equipamentos afetados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bombas de Refrigeração de Componentes; • Bombas de Água de Alimentação Auxiliar; • Bombas de Água de Serviço; • Transformadores das Bombas de Lavagem da Telas Rotativas; • Bombas de Carregamento; • Exaustores de Ar do Sistema de Ventilação de Acesso Controlado; • Ventiladores de Suprimento de Ar para Área de Acesso Controlado; • Válvulas de Descarga dos Ventiladores de Suprimento de Ar para Acesso Controlado; • Inversores que alimentam o Balanço da Planta; • Inversores; • Exaustores de Sala de Baterias; • Válvulas da Quebra de Vácuo da Contenção; • Válvulas de Isolamento da Sucção da Bomba do Sistema de Refrigeração do Reator; • Válvulas de Isolamento da Descarga do Acumulador 1; • Válvulas de Isolamento das Válvulas de Alívio do Pressurizador; • Ventilação de Refrigeração da Contenção; • Painéis de Controle de Aquecimento do Duto de Ar Condicionado da Sala de Controle; • Carregadores de Baterias. 		

REFERÊNCIAS

- BAYBUTT, P., 2002, "Layers of Protection Analysis for Human Factors (LOPA-HF)", *Process Safety Progress*, v. 21, pp. 119-129.
- BERG, H. P., BREILING, G., HOFFMANN, H. H., 1997, "Procedures and Applications to Enlarge the Level 1+ PSA to Internal Fires in German Nuclear Power Plants", *Reliability Engineering and System Safety*, v. 58, pp. 109-117.
- CCPS, 2001, *Layer of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*. New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
- CCPS, 2000, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2nd ed.. New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
- CCPS, 1993, *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes*. New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
- CCPS, 1989a, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
- CCPS, 1989b, *Guidelines for Process Equipment Reliability Data*. New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
- DEY, M. K., 1999, "A Conceptual Framework for Formulating a Focused and Cost-effective Fire Protection Program Based on Analysis of Risk and the Dynamics of Fire Effects", *Nuclear Engineering and Design*, v. 193, pp. 185-196.
- EPRI/NRC-RES, 2005, *Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities: Volume 2: Detailed Methodology*, EPRI TR-1011989 and NUREG/CR-6850, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, and U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Rockville, MD.
- EuReData, 1989, *Reliability Data Collection and Use in Risk and Availability Assessment*, Proceedings of the 5th EuReData Conference, Heidelberg, Germany April 9–11, 1986. Edited by H. J. Wingender. Berlin: Springer-Verlag.

- GIBBS & HILL, "Fire Hazard Analysis for Angra Unit 1, R3, ADD1 – Gibbs & Hill Project 3326-004".
- GRUND, M. S., 2001, *Análise Probabilística de Incêndio nas Rotas de Cabos de Potência Elétrica de Sistemas de Desligamento de um Reator Nuclear*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FERNANDEZ, P., 1996, "Probabilistic Fire Analysis Capabilities, Applications and Weak Points", *Nuclear Engineering and Design*, v. 167, pp. 77-83.
- IAEA, 1992, "Fire Protection in Nuclear Power Plants", Safety Series No. 50 P-4, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IEEE, 1984, *ANSI/IEEE Standard 500-1994: Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data For Nuclear-Power Generating Stations*, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- MARKOWSKI, A. S., 2006, "exLOPA for Explosion Risks Assessment", *Journal of Hazardous Materials*, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.06.070.
- NRC, 2006, "A Prioritization of Generic Safety Issues", NUREG-0933, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- NRC, 2000, "General Design Criteria", *Code of Federal Regulation. Title 10: Energy, Part 50 - 10 CFR 50, Fire Protection*, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- SALDANHA, P. L. C. & GRUND, M. S., 1996, *Avaliação das Rotas de Cabos Elétricos de Equipamentos Necessários ao Desligamento Seguro do Reator em Áreas Prioritárias à Implementação do Programa Fire Hazard Analysis de Angra 1*, NT-SUESI-02/96, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.
- SUMMERS, A. E., 2003, "Introduction to Layers of Protection Analysis", *Journal of Hazardous Materials*, v. 104, pp. 163-168.