

UMA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO  
(LOPA) NA AVALIAÇÃO DO RISCO DO SISTEMA DE HIDROGÊNIO DE  
REFRIGERAÇÃO DO GERADOR ELÉTRICO PRINCIPAL DE UMA USINA NUCLEAR

Flavia Moço Vasconcelos

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. Antônio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

---

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

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2008

VASCONCELOS, FLAVIA MOÇO

Uma Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) na Avaliação do Risco do Sistema de Hidrogênio de Refrigeração do Gerador Elétrico Principal de uma Usina Nuclear [Rio de Janeiro] 2008

XII, 72 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Nuclear, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. LOPA

2. Sistema de Hidrogênio

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*À minha mãe e meu pai  
(in memoriam), pelo amor,  
carinho, dedicação,  
compreensão e contribuição  
nos momentos mais difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

Sou grata a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e por tudo que cada um representa ou representou em minha vida como profissional e como pessoa, pois tenho a certeza de que as coisas não acontecem por acaso e que as pessoas não se cruzam ao acaso. Meu muito obrigada:

À Deus, por tudo que tenho e por tudo que sou.

Ao meu querido pai, apesar de hoje não estar mais aqui, mas se fez de vento, sonho, nuvem, saudades, e que de uma forma ou de outra, sempre está comigo.

À minha querida mãe, que me ensinou muitas coisas, que sempre me deu apoio, mesmo nos momentos mais difíceis que passamos e por ser a pessoa mais importante da minha vida.

Ao meu querido namorado Fabio, pela compreensão, incentivo, entusiasmo e apoio em todos os momentos, por me encorajar e sempre acreditar no meu sucesso.

À minha família, pelo carinho, pela paciência em tolerar minha ausência em alguns momentos e pela confiança em acreditar no meu sucesso.

Ao Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, pelo interesse, disponibilidade, ensinamentos, orientação e apoio durante o curso e principalmente no desenvolvimento deste trabalho.

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

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

À todos meus amigos, em especial a amiga Camille Alves, pela amizade e carinho, pelas inúmeras horas de estudo e trabalho, pelas sugestões, pelo apoio e grande incentivo e as amigas Roberta e Anelise, pela amizade, carinho e apoio.

À CAPES, 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 DO RISCO DO SISTEMA DE HIDROGÊNIO DE  
REFRIGERAÇÃO DO GERADOR ELÉTRICO PRINCIPAL DE UMA USINA NUCLEAR

Flavia Moço Vasconcelos

Março / 2008

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 do sistema de hidrogênio de refrigeração do gerador elétrico de uma usina nuclear.

São identificados possíveis desvios e os possíveis eventos iniciadores que possam causar danos ao sistema de refrigeração do gerador elétrico e com isso uma parada da usina nuclear. Em seguida são determinadas as frequências de ocorrência desses eventos e as propriedades de falha na demanda das camadas de proteção independentes.

Através da Análise de Camadas de Proteção, são estimados os riscos de cada cenário e verificado se é necessária alguma proteção adicional para mitigar o risco.

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) TO RISK  
EVALUATION OF THE HYDROGEN COOLING SYSTEM OF THE MAIN ELECTRIC  
GENERATOR OF A NUCLEAR PLANT

Flavia Moço Vasconcelos

March / 2008

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 use the Layer of Protection Analysis to evaluate the risk of the electric generator hydrogen cooling system of a nuclear plant.

The possible deviations and initiating events that can cause damages to the cooling system of the electric generator and a possible shutdown of the nuclear plant are identified. After that, the frequencies of occurrence of these events and the probability of failure on demand from the independent protection layers are determined.

Using the Layer of Protection Analysis, the risks of each scenario are estimated and it is verified whether some additional safeguard is necessary to mitigate the risk.

# ÍNDICE

	PÁGINA
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA)</b> .....	3
2.1 IDENTIFICANDO CONSEQÜÊNCIAS E SEVERIDADE .....	6
2.1.1 MÉTODO 1: CATEGORIA APROXIMADA SEM REFERÊNCIA DIRETA AO FERIMENTO HUMANO .....	7
2.1.2 MÉTODO 2: ESTIMATIVAS QUALITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO .....	8
2.1.3 MÉTODO 3: ESTIMATIVAS QUALITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO COM AJUSTES PARA PROBABILIDADE PÓS LIBERAÇÃO .....	8
2.1.4 MÉTODO 4: ESTIMATIVAS QUANTITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO .....	9
2.2 SELECIONANDO CENÁRIOS DE ACIDENTE .....	9
2.2.1 IDENTIFICANDO CENÁRIOS CANDIDATOS .....	10
2.2.2 DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS .....	13
2.3 IDENTIFICANDO A FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR .....	13
2.3.1 SELEÇÃO DAS TAXAS DE FALHA .....	14
2.4 IDENTIFICANDO CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTE (IPL) .....	16
2.4.1 PROTEÇÕES .....	17
2.4.2 REGRAS PARA IPL .....	20
2.4.3 AVALIAÇÃO DA IPL .....	22
2.4.4 VALOR DA PFD PARA UMA IPL .....	23
2.4.5 IPL'S PASSIVAS .....	23
2.4.6 IPL'S ATIVAS .....	23
2.4.7 SISTEMAS INSTRUMENTADOS .....	24
2.4.8 SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA (SIS) .....	25

2.4.9 SISTEMAS DE INUNDAÇÃO, SPRAY, ESPUMA E OUTROS SISTEMAS DE MITIGAÇÃO DE INCÊNDIO .....	26
2.4.10 IPL'S HUMANAS .....	26
2.5 DETERMINANDO FREQUÊNCIA DOS CENÁRIOS .....	26
2.5.1 CÁLCULO GERAL .....	26
2.5.2 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE EVENTOS ADICIONAIS .....	27
2.6 ESTIMANDO O RISCO .....	29
2.7 USANDO A LOPA PARA TOMAR A DECISÃO DO RISCO .....	30
2.7.1 MÉTODO DA MATRIZ .....	31
2.7.2 MÉTODO DE CRITÉRIOS NUMÉRICOS (MÁXIMO RISCO TOLERADO PARA O CENÁRIO) .....	33
2.7.3 MÉTODO DO NÚMERO DE CRÉDITOS DE IPL'S .....	33
<b>3 SISTEMA DE HIDROGÊNIO .....</b>	<b>35</b>
3.1 CIRCUITO DE HIDROGÊNIO .....	36
3.2 GÁS CARBÔNICO .....	40
3.3 TROCA DE GASES DO GERADOR .....	40
3.4 EQUIPAMENTOS .....	42
3.4.1 SECADOR DE GÁS .....	42
3.4.2 MEDIDOR DE PUREZA DO GÁS .....	43
3.5 SISTEMAS AUXILIARES DO GERADOR .....	43
3.5.1 SISTEMA DE ÓLEO DE SELAGEM DO GERADOR (OSG) .....	43
3.5.2 SISTEMA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO DA TURBINA (RET) .....	44
3.6 CONTROLES E PROTEÇÕES .....	46
3.6.1 CONTROLE DE TEMPERATURA DO HIDROGÊNIO DO GERADOR – TV-01 .....	46
3.6.2 PROTEÇÕES .....	46
3.7 INTERTRAVAMENTOS .....	47
3.7.1 PROTEÇÃO DE ALTA TEMPERATURA NO SECADOR DE GÁS .....	47



3.7.2 DESLIGAMENTO DOS VENTILADORES POR SOBRECARGA NOS MOTORES .....	47
3.7.3 PARTIDA AUTOMÁTICA DA BOMBA DE ÓLEO DE SELAGEM .....	47
<b>4 APLICAÇÃO DA LOPA .....</b>	<b>48</b>
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
5.1 CENÁRIO 1 .....	55
5.2 CENÁRIO 2 .....	56
5.3 CENÁRIO 3 .....	57
5.4 CENÁRIO 4 .....	58
5.5 CENÁRIO 5 .....	59
5.6 CENÁRIO 6 .....	60
5.7 CENÁRIO 7 .....	61
5.8 CENÁRIO 8 .....	62
5.9 CENÁRIO 9 .....	63
5.10 CENÁRIO 10 .....	64
5.11 CENÁRIO 11 .....	65
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
FIGURA 2.1 CAMADAS DE PROTEÇÃO DE UM TÍPICO PROJETO DO PROCESSO .....	4
FIGURA 2.2 ETAPAS DA LOPA .....	6
FIGURA 2.3 INFORMAÇÕES DO HAZOP E DA LOPA .....	12
FIGURA 3.1 SISTEMA DE HIDROGÊNIO DO GERADOR .....	38
FIGURA 3.2 CORTE TRANSVERSAL DO GERADOR ELÉTRICO .....	39
FIGURA 3.3 ESQUEMÁTICO DA SELAGEM DO EIXO DO GERADOR ELÉTRICO PRINCIPAL .....	45

# ÍNDICE DE TABELAS

	PÁGINA
TABELA 2.1	TABELA PARA DOCUMENTAÇÃO E CÁLCULOS DE CENÁRIOS PARA LOPA ..... 29
TABELA 2.2	MATRIZ DE RISCO COM ZONAS INDIVIDUAIS DE AÇÃO ..... 32
TABELA 3.1	CARACTERÍSTICAS DE RESFRIAMENTO DO GERADOR ..... 36
TABELA 4.1	RESULTADO DO HAZOP ..... 49
TABELA 4.2	CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA ..... 50
TABELA 4.3	CENÁRIOS PARA A APLICAÇÃO DA LOPA NUM GERADOR ELÉTRICO RESFRIADO A HIDROGÊNIO ..... 51
TABELA 4.4	TABELA DE FREQUÊNCIAS PARA CADA EVENTO INICIADOR ..... 52
TABELA 4.5	CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES E SUAS RESPECTIVAS PROBABILIDADES DE FALHA NA DEMANDA PARA CADA CENÁRIO ..... 53
TABELA 5.1	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 1 ..... 55
TABELA 5.2	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 2 ..... 56
TABELA 5.3	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 3 ..... 57
TABELA 5.4	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 4 ..... 58
TABELA 5.5	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 5 ..... 60
TABELA 5.6	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 6 ..... 61
TABELA 5.7	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 7 ..... 62
TABELA 5.8	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 8 ..... 63
TABELA 5.9	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 9 ..... 64
TABELA 5.10	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 10 ..... 65
TABELA 5.11	TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 11 ..... 66

## LISTA DE SÍMBOLOS OU NOMENCLATURA

ALARP	<i>“as low as reasonably practicable”</i> - tão baixo quanto razoavelmente praticável
APP	Análise Preliminar de Perigos
APS	Análise Probabilística de Segurança
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i> - Explosão de Vapor em Expansão de Líquido em Ebulição
BPCS	<i>Basic Process Control System</i> - Sistema de Controle Básico do Processo
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
FCC	Falha de Causa Comum
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
OSG	Sistema de Óleo de Selagem do Gerador
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
$P^{\text{dano}}$	Probabilidade de Dano ou Fatalidade
$P^{\text{ignição}}$	Probabilidade de Ignição
$P^{\text{pessoal presente}}$	Probabilidade de Pessoas Presentes na Área Exposta
RET	Sistema de Água de Refrigeração da Turbina
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i> - Função Instrumentada de Segurança
SIL	<i>Safety Integrity Level</i> - Nível de Integridade de Segurança
SIS	<i>Safety Instrumented System</i> - Sistema Instrumentado de Segurança

# 1 INTRODUÇÃO

A ciência da análise de riscos surgiu para prever a frequência de acidentes, avaliar as conseqüências de acidentes prováveis, elaborar estratégias para impedir acidentes e para mitigar também os impactos adversos se um acidente ocorrer. Isto é, a determinação do risco auxilia, substancialmente, a tomada de decisão sobre a segurança do projeto e operação de plantas de processo. Além disso, a quantificação do risco associado à liberação de uma substância perigosa tornou-se um pré-requisito para um planejamento eficiente de emergências.[1]

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

A Análise Quantitativa de Riscos (AQR) é um método que identifica onde a operação e/ou os sistemas de engenharia e gerenciamento podem ser modificados para reduzir os riscos. Entretanto, o método da AQR requer informações precisas, tornando-o complexo. Por esse motivo, na década de 90 o conceito de camadas de proteção começou a ser abordado, sendo publicado primeiramente pelo CCPS (Center for Chemical Process Safety). A partir desses conceitos, diversas empresas nos Estados Unidos desenvolveram procedimentos internos para a realização da Análise de Camadas de Proteção (LOPA), e em 2001 o CCPS publicou um livro que descreve a técnica da LOPA.[2]

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma técnica semiquantitativa de análise de riscos que é aplicada em seguida ao uso de uma técnica de identificação de perigos, como a APP ou a HAZOP. Ela é considerada semiquantitativa por gerar uma

estimativa do risco, mas seu foco está nas consequências severas e seus resultados são geralmente adequados para identificar os Níveis de Integridade de Segurança (SIL) necessários para cada Função Instrumentada de Segurança (SIF).[3]

O objetivo deste trabalho é avaliar o risco do sistema de hidrogênio de refrigeração do gerador elétrico principal de uma usina nuclear usando a técnica da LOPA. Esta técnica foi escolhida por ser mais simples do que a AQR, conseguindo assim, estimar o risco com certa precisão e num prazo menor. Como essa técnica não é aplicável a sistemas muito complexos, o sistema de hidrogênio de refrigeração do gerador elétrico foi escolhido por não ser muito complexo e por não ser contemplado em Análises Probabilísticas de Segurança (APS). Entretanto, qualquer falha nesse sistema pode deixar a usina nuclear indisponível e provocar consequências severas caso ocorra vazamento de hidrogênio num espaço fechado, como já aconteceu em outras usinas nucleares.

O capítulo 2 explica a técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA), mostrando os tipos de sistemas a que esta técnica pode ser aplicada e seu procedimento.

No capítulo 3 é mostrado o sistema de hidrogênio de refrigeração do gerador elétrico principal de uma usina nuclear utilizado neste trabalho, e no capítulo 4 é mostrada a aplicação da LOPA neste sistema.

Os resultados desta análise são encontrados no capítulo 5 e por fim no capítulo 6 as conclusões e recomendações.

## 2 ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA)

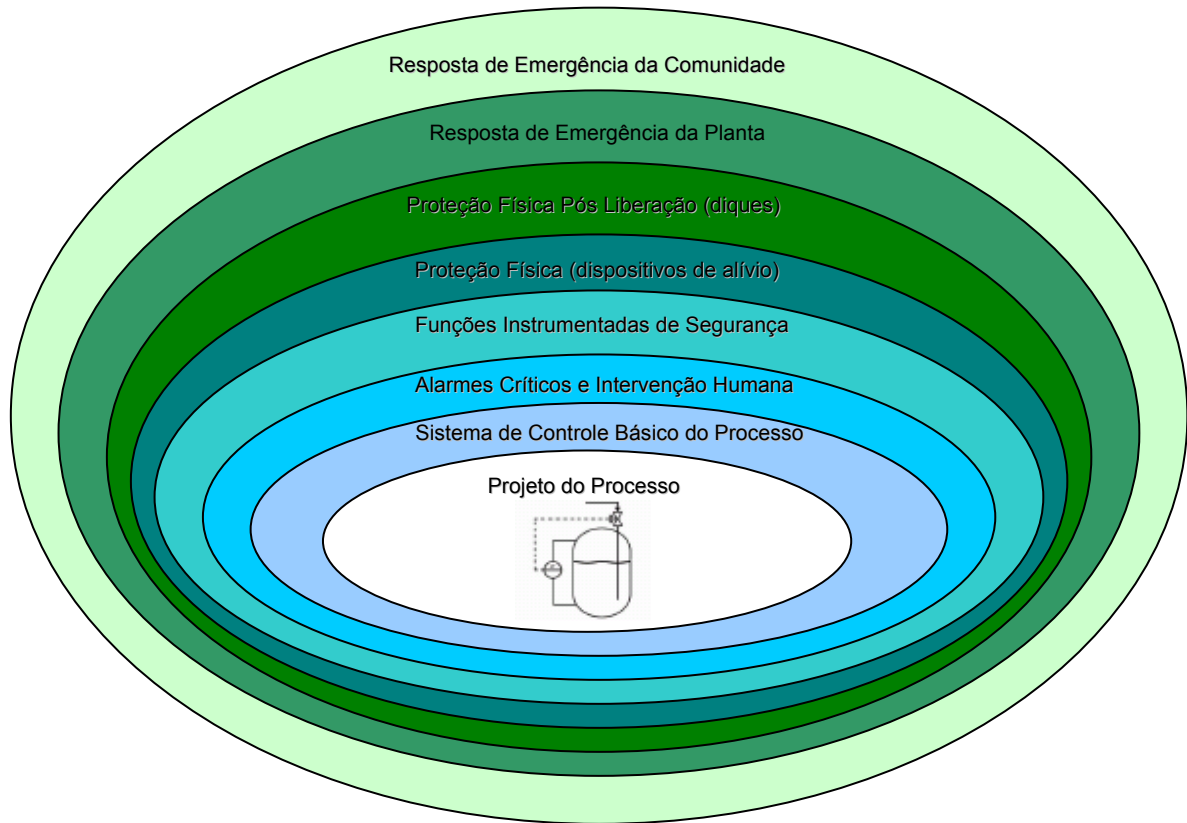
A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma técnica simplificada de análise de riscos que é elaborada em seqüência ao uso de uma técnica qualitativa de identificação de perigos como o HAZOP ou APP. Pode ser definida como uma técnica semiquantitativa, pois gera uma estimativa do risco, sendo seus resultados deliberadamente conservadores. Um estudo que usa uma análise quantitativa de risco completa (árvore de eventos, árvore de falhas, etc.) deve apresentar um menor risco associado quando comparado aos resultados da LOPA. Mas apesar de apresentar um risco maior, esse valor é consistente, pois a LOPA utiliza categorias em ordem de magnitude para a freqüência do evento iniciador, severidade das conseqüências e probabilidade de falhas para camadas de proteção independente (IPL's) para calcular o risco aproximado de um cenário.[2]

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

Assim como muitos outros métodos de análise de perigos, a primeira proposta da LOPA é determinar se há números de camadas de proteção suficientes num cenário de acidente. A Figura 2.1 mostra as possíveis camadas de proteção de um típico projeto de processo.[2]

A LOPA estabelece se há IPL's suficientes para controlar o risco em dado cenário de acidente. Se o risco estimado de um cenário não for aceito, IPL's adicionais devem ser acrescentadas. Porém, esta técnica não informa quais IPL's devem ser acrescentadas ou que projeto deve ser escolhido. O cenário é tipicamente identificado durante a análise de perigos, na avaliação de mudança ou revisão de projeto. A meta

é escolher cenários que os analistas acreditam representar os riscos mais significativos.



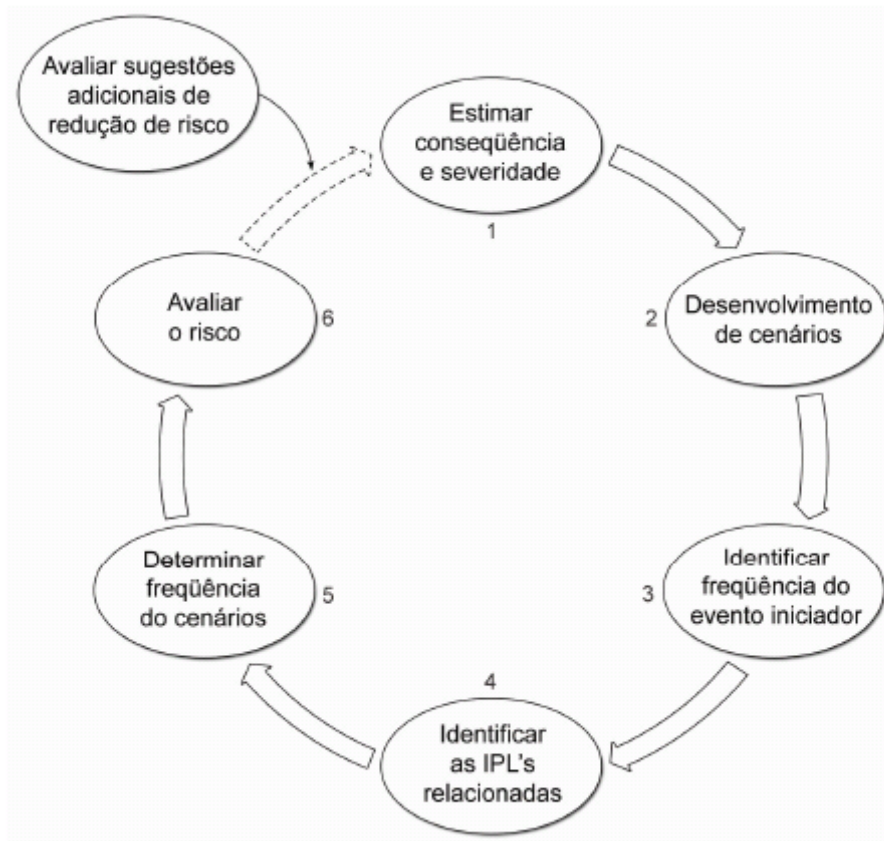
**FIGURA 2.1:** CAMADAS DE PROTEÇÃO DE UM TÍPICO PROJETO DE PROCESSO

A LOPA é dividida em seis passos, que estão descritos abaixo e resumidos na Figura 2.2.[2]

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



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



**FIGURA 2.2:** ETAPAS DA LOPA

## 2.1 IDENTIFICANDO CONSEQÜÊNCIAS E SEVERIDADE

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

Uma das primeiras decisões que uma organização deve tomar quando escolher implementar a LOPA é como definir as conseqüências finais. Algumas empresas avaliam até a perda de material, outras estimam o impacto final em termos de prejuízo ou danos. O cenário de interesse mais comum da LOPA para uma indústria de processos químicos é a perda de material perigoso ou perda de energia.

A perda de material pode ocorrer por várias causas, como um vazamento do vaso, ruptura de tubulação e elevação da válvula de alívio.

O material liberado pode ser da forma líquida, gasosa ou sólida, ou uma combinação delas. Se o material liberado é inflamável, a ignição pode resultar numa explosão e/ou incêndio. Em casos de ignição imediata de um gás pressurizado ou liberação de duas fases, jatos de fogo podem acontecer. Na ausência de ignição imediata, o material pode se dispersar para formar uma nuvem de vapor com ignição atrasada, como um flash ou explosão. Derramamento de líquido pode queimar como incêndio em poça se inflamado.

A consequência final para um cenário de perda de material inclui a liberação de material perigoso, dispersão desse material, efeitos físicos provenientes de incêndio, explosões e liberações tóxicas, e a perda por impacto desses efeitos físicos. Todas essas consequências finais são quantificadas por alguns métodos estimativos. A seguir são mostrados quatro métodos estimativos, cada um dos quais tem vantagens e desvantagens, e o método usado para categorizar a consequência deve ser consistente com o critério de tolerância do risco da empresa.

### **2.1.1 MÉTODO 1: CATEGORIA APROXIMADA SEM REFERÊNCIA DIRETA AO FERIMENTO HUMANO**

Este método utiliza matrizes para diferenciar as consequências em várias categorias. Isto evita a estimativa do número de danos potenciais ou fatalidades, ajudando a equipe a fazer julgamentos mais precisos sobre riscos relativos.

A vantagem desse método é que é simples e fácil de usar, porque o tamanho e as propriedades do material liberado são relativamente fáceis de estabelecer. Uma

liberação de um determinado tamanho é estabelecida para um dado valor de consequência independente de efeitos eventuais (incêndio, explosão, liberação tóxica, dano, fatalidade, etc.).

A desvantagem desse método é que requer a aprovação da matriz de categorização da consequência ou o desenvolvimento de tal matriz por modelagem.

### **2.1.2 MÉTODO 2: ESTIMATIVAS QUALITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO**

Este método usa o impacto final no pessoal como consequência de interesse, mas chega a valores usando puramente opinião qualitativa. Para cada cenário, as consequências humanas são estimadas diretamente pelos analistas da LOPA, usando experiências passadas, tabelas-modelo anteriormente geradas, ou conhecimento detalhado de liberação anteriormente modelada por liberações similares.

As vantagens desse método são a simplicidade de entendimento e a possibilidade de comparação direta. Porém, hipóteses implícitas para a probabilidade de ignição para liberações inflamáveis, para a probabilidade de dano, e a probabilidade de uma pessoa estar presente na área podem superestimar ou subestimar o risco de fatalidade e este método é menos preciso (mais subjetivo) do que o método anterior, que categoriza o tipo e a quantidade da liberação.

### **2.1.3 MÉTODO 3: ESTIMATIVAS QUALITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO COM AJUSTES PARA PROBABILIDADE PÓS LIBERAÇÃO**

Neste método, o analista da LOPA pode inicialmente estimar a magnitude de uma liberação “qualitativamente” similar ao Método 2 e mais tarde ajustar a frequência do evento pela probabilidade se:

- o evento resultar numa nuvem tóxica ou inflamável;
- uma fonte de ignição estiver próxima a uma nuvem inflamável;
- um indivíduo estiver presente na área onde o evento ocorrer;
- tiver uma conseqüência fatal (ou dano).

Este método é simples de ser entendido e o ajuste da frequência pode fornecer uma melhor estimativa para o risco de um dano humano. Porém, parâmetros extras de probabilidade devem ser incluídos no cálculo do risco e esses parâmetros podem mudar com o tempo, devendo sempre estar atualizados.

#### **2.1.4 MÉTODO 4: ESTIMATIVAS QUANTITATIVAS COM FERIMENTO HUMANO**

Este método é similar ao de estimativa qualitativa com ferimento humano (Método 3), mas usa análises detalhadas para determinar os efeitos de uma liberação e seus efeitos em equipamentos e pessoal. Este método envolve o uso de modelos matemáticos computadorizados tipicamente complexos para simular a liberação (também chamados de “termo fonte”), a dispersão subsequente e o efeito tóxico ou térmico / explosão.

As vantagens desse método é que ele possui um enorme grau de certeza relativo às conseqüências previstas e faz comparação direta com a linha corporativa.

## **2.2 SELECIONANDO CENÁRIOS DE ACIDENTE**

Este é o passo da LOPA em que os analistas constroem uma série de eventos, incluindo os eventos iniciadores e a falha das IPL's, que levam a uma conseqüência indesejada.

Um cenário é um evento não planejado ou uma seqüência de eventos que resultam numa conseqüência indesejada. Cada cenário consiste de pelo menos dois elementos:

- um **evento iniciador** (por exemplo, perda do refrigerante) que inicia uma cadeia de eventos, e
- uma **conseqüência** (pressão excessiva do sistema, liberação de material tóxico ou inflamável para a atmosfera, fatalidade, etc.) resultante se uma cadeia de eventos continuar sem interrupção.

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

Cada cenário deve ter um único par evento iniciador / conseqüência. Se o mesmo evento iniciador resultar em diferentes conseqüências, devem ser desenvolvidos cenários adicionais. Em alguns casos muitos cenários podem surgir de eventos iniciadores comuns e cenários separados devem ser desenvolvidos para seções individuais da planta.

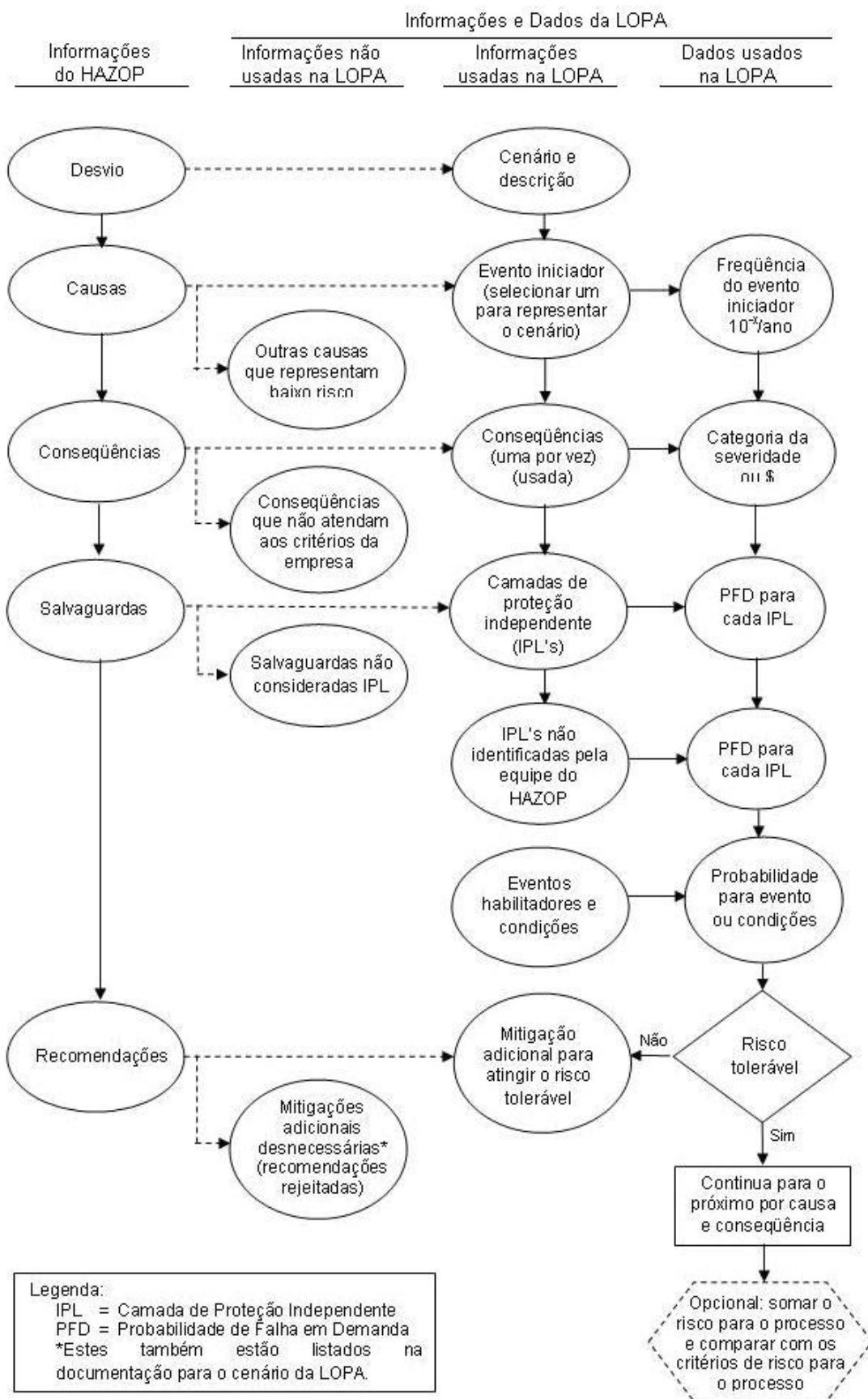
Na maioria dos cenários haverá pelo menos uma proteção que pode ser considerada uma IPL para a proposta da LOPA. Se esta IPL operar como prevista, a cadeia de eventos será interrompida e impedirá a ocorrência das conseqüências indesejadas.

### **2.2.1 IDENTIFICANDO CENÁRIOS CANDIDATOS**

A fonte de informação mais comum para identificar um cenário é a avaliação de perigos, que é realizada no início do projeto ou numa modificação do processo.

A proposta de uma avaliação de perigos é identificar, avaliar e documentar os perigos associados ao processo. A maioria dos métodos de avaliação de perigos é qualitativa e não possibilita ao analista quantificar se o risco associado com o perigo documentado é aceitável, podendo tornar o julgamento inconsistente. O método da LOPA pode pegar a informação do HAZOP e atribuir valores numéricos para a frequência do evento iniciador, frequência de falha e probabilidade de falha na demanda (PFD) e determinar se uma proteção é uma IPL.

A Figura 2.3 mostra como os dados obtidos no HAZOP podem ser usados na LOPA, e assim identificar os cenários.[2]



**FIGURA 2.3: INFORMAÇÕES DO HAZOP E DA LOPA**



### 2.2.2 DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS

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

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

### 2.3 IDENTIFICANDO A FREQUÊNCIA DO EVENTO INICIADOR

Como já foi dito anteriormente, cada cenário tem um único evento iniciador. A frequência do evento iniciador é normalmente expressa em eventos por ano.

Os eventos iniciadores são agrupados em três tipos gerais:

- **eventos externos**, que incluem fenômenos naturais como terremoto, tornado ou enchente, eventos provenientes de incêndio ou explosão nas proximidades, intervenções por impactos mecânicos nos equipamentos ou equipamentos de construção;

- **falha dos equipamentos**, que podem ser classificados em falha no sistema de controle e falha mecânica. A falha no sistema de controle pode incluir falha nos componentes do sistema de controle do processo básico, falha ou quebra no software, falha no sistema de controle de emergência, etc. Similarmente, a falha mecânica inclui falha no vaso ou na tubulação ocasionada por fadiga, corrosão, erro de projeto, especificação, defeitos de fabricação ou montagem, sobrepressão, etc.;
- **falha humana**, que pode ser proveniente de erro operacional, erro de manutenção, erro a respostas críticas ou erros de programação.

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

### **2.3.1 SELEÇÃO DAS TAXAS DE FALHA**

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

As taxas de falha dos equipamentos são tipicamente altas quando o equipamento é novo (mortalidade infantil) e quando está envelhecido. Entretanto, a

maioria dos equipamentos de período longo de operação envolve uma taxa de falha constante. O método da LOPA assume taxa de falha constante para o equipamento.

Alguns dados típicos de taxas de falha podem ser encontrados nas seguintes fontes:[4]

- dados industriais de falha de equipamentos:
  - Guideline for Process Equipment Reliability Data, CCPS (1986);[5]
  - Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, CCPS (1989);[6]
  - Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2<sup>nd</sup> ed., CCPS (2000);[7]
  - Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations, IEEE (1984);[8]
  - OREDA - *Offshore Reliability Data* (2002);[9]
- dados industriais de taxas de erros humanos:
  - Inherently Safer Chemical Processes: A life Cycle Approach, CCPS (1996);[10]
  - Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Swain, A.D., and H.E. Guttman, (1983);[11]
- histórico da empresa.

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

os analistas devem mudar para técnicas mais rigorosas se o cenário for muito complexo ou se for necessária uma maior precisão.

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

## **2.4 IDENTIFICANDO CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES**

Uma IPL é um dispositivo, sistema ou ação que é capaz de evitar um cenário com consequências indesejadas do evento iniciador ou ação de qualquer outra camada de proteção associada com o cenário.

Se todas as IPL's de um cenário falharem, consequências indesejadas ocorrerão em seguida ao evento iniciador.

A diferença entre uma IPL e uma proteção é importante. Uma proteção é qualquer dispositivo, sistema ou ação que poderá interromper a cadeia de eventos seguida do evento iniciador.[3] Entretanto, a eficiência de algumas proteções não pode ser quantificada devido à falta de dados, incerteza com independência ou outros fatores.

Todas as IPL's são proteções, mas nem todas as proteções são IPL's.

A eficiência de uma IPL é quantificada em termos de probabilidade de falha na demanda que é definida com a probabilidade de um sistema (nesse caso da IPL) falhar no desempenho de uma função específica na demanda. A PFD é um número adimensional entre 0 e 1. Quanto menor o valor da PFD, maior será a redução na frequência da consequência para uma dada frequência de evento iniciador. A redução na frequência alcançada por uma IPL é algumas vezes chamada de fator de redução de risco.

As proteções podem ser classificadas como:

- ativas ou passivas;
- preventivas (antes da liberação) ou mitigadoras (após a liberação).

## **2.4.1 PROTEÇÕES**

### **2.4.1.1 SISTEMA DE CONTROLE BÁSICO DO PROCESSO (BPCS)**

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

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

#### **2.4.1.2 ALARMES CRÍTICOS E INTERVENÇÕES HUMANAS**

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

#### **2.4.1.3 FUNÇÃO INSTRUMENTADA DE SEGURANÇA (SIF)**

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

#### **2.4.1.4 PROTEÇÕES FÍSICAS (VÁLVULAS DE ALÍVIO, DISCO DE RUPTURA, ETC.)**

Estes dispositivos, quando apropriadamente dimensionados, projetados e preservados, são IPL's que podem fornecer um alto grau de proteção contra sobrepressão. Entretanto, sua eficiência pode ser comprometida com incrustações ou corrosão se válvulas de bloqueio forem instaladas abaixo das válvulas de alívio, ou se atividades de inspeção e manutenção forem de baixa qualidade. Se a vazão da válvula de alívio for descartada para a atmosfera, podem ocorrer conseqüências adicionais.

#### **2.4.1.5 PROTEÇÕES PÓS LIBERAÇÃO (DIQUES, PAREDES DE CONTENÇÃO, ETC.)**

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

#### **2.4.1.6 RESPOSTA DE EMERGÊNCIA DA PLANTA**

Esses fatores (brigada de incêndio, sistemas de inundação manual, facilidade de evacuação, etc.) não são normalmente considerados como IPL's, a não ser que eles sejam acionados após uma liberação inicial e muitas variáveis (por exemplo, o tempo de atraso) tiverem afetando sua eficiência global na mitigação do cenário.

#### **2.4.1.7 RESPOSTA DE EMERGÊNCIA DA COMUNIDADE**

Essas medidas, que incluem a evacuação da comunidade e remoção para um lugar seguro, não são normalmente consideradas como IPL's desde que elas sejam ativadas depois de uma liberação inicial e tiver muitas variáveis afetando sua eficiência global na mitigação do cenário. Eles não fornecem nenhuma proteção para o pessoal da planta.

## **2.4.2 REGRAS PARA IPL**

Algumas proteções não são normalmente consideradas IPL's, tais como: treinamento e certificações; procedimentos; teste normal e inspeção; manutenção; comunicações; sinais; proteção de incêndio; entre outras.

Para ser considerada uma IPL, um dispositivo, sistema ou ação deve ser:

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

### **2.4.2.1 EFICIÊNCIA**

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

- Se as proteções do sistema não podem sempre detectar condições e gerar uma ação específica, não serão uma IPL.
- Para ser IPL, as proteções têm que detectar condições em tempo para tomar a ação corretiva que prevenirá uma consequência indesejada. Este tempo requerido deve incluir: tempo para detectar a condição; tempo para processar a informação e tomar a decisão; tempo para tomar a ação requerida e tempo para a ação surtir efeito.



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

#### **2.4.2.2 INDEPENDÊNCIA**

O método da LOPA usa independência para assegurar que os efeitos do evento iniciador, ou de outras IPL's, não interagem com uma IPL específica, diminuindo assim a capacidade de realizar sua função. O critério de independência requer que uma IPL seja independente da ocorrência, ou de consequências, do evento iniciador e da falha de qualquer componente de uma IPL também creditada para o mesmo cenário.

Isso é importante para entender quando uma proteção pode e não pode ser exigida como uma IPL na LOPA.

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

Um dispositivo, sistema ou ação não é independente do evento iniciador e não pode ser creditado como uma IPL se qualquer dos seguintes cenários for verdade:[2]

- *Erro do operador é o evento iniciador e a IPL candidata assume que o mesmo operador deve agir para mitigar a situação.* Erro humano é equivalente à falha de um sistema e uma vez o ser humano tenha cometido um erro, não se pode esperar que o mesmo operador haja corretamente após uma sequência de eventos. Isto é justificado porque o erro pode ser devido à doença,

incapacidade (drogas ou álcool), distração, trabalho sobrecarregado, inexperiência, instruções de operação imperfeita, falta de conhecimento, etc., que mais tarde ainda estarão presentes quando outras ações forem requeridas.

- *Perda de uma utilidade (eletricidade, ar, água de refrigeração, nitrogênio, etc.) é o evento iniciador e a IPL candidata é um sistema que depende dessa utilidade.*

#### **2.4.2.3 AUDITABILIDADE**

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

#### **2.4.3 AVALIAÇÃO DA IPL**

Este item descreve como os analistas da LOPA determinam se uma proteção atende os requisitos para ser uma IPL e a PFD apropriada para a IPL.

Se um dispositivo de alívio de pressão está sendo considerado como uma IPL, a documentação deve incluir: a base de projeto (dimensionamento); o projeto dos cenários (todos cenários que requerem abrir a válvula); a especificação da válvula; o fluxo requerido nas condições do cenário; detalhes da instalação (por exemplo, a disposição da tubulação), e procedimentos de teste e manutenção, incluindo prova da elevação da válvula na pressão de ajuste.

Onde a ação humana é creditada como uma IPL, os seguintes fatores devem ser definidos e documentados: como a condição será detectada; como a decisão para agir será tomada; e que ação será tomada para prevenir a consequência.

#### **2.4.4 VALOR DA PFD PARA UMA IPL**

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

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

#### **2.4.5 IPL'S PASSIVAS**

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

#### **2.4.6 IPL'S ATIVAS**

IPL's ativas são requeridas para afastar um estado do outro em resposta a uma mudança em propriedades mensuráveis do processo (por exemplo, temperatura ou pressão) ou um sinal de outra fonte (tais como botão de pressão ou interruptor). Uma IPL ativa geralmente compreende:

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

#### **2.4.7 SISTEMAS INSTRUMENTADOS**

Esses sistemas são uma combinação de sensores, solucionadores lógicos, controladores de processos e elementos finais que trabalham juntos, tanto para regular automaticamente a operação da planta, ou prevenir a ocorrência de um evento específico dentro de um processo químico. Dois tipos de sistemas instrumentados são considerados no método básico da LOPA, cada um tem sua própria proposta e características. Um, o controlador contínuo (por exemplo, controlador do processo que regula fluxo, temperatura ou pressão por um valor fornecido pelo operador) geralmente fornece um *feedback* contínuo ao operador que está funcionando normalmente (embora manutenções não programadas possam ocorrer). O segundo, o controlador estático (solucionador lógico que toma medidas do processo e executa mudanças de liga-desliga para os indicadores do alarme e para válvulas de processo) monitora as condições da planta e somente toma ações de controle quando pontos de erro predefinidos são alcançados. As ações de controle estático podem estar classificadas como intertravamento de processos e alarmes, tais como um reator com um erro de alta temperatura que fecha a válvula de vapor. Falhas no controlador estático (solucionador lógico e dispositivos de campo associados) não podem ser detectadas até o próximo teste de prova manual de uma função de segurança falha. Ambos controladores são encontrados no BPCS e SIS. O BPCS e o SIS diferem significativamente no nível de redução de risco alcançado.

#### 2.4.8 SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA (SIS)

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

Cada SIF terá seu próprio valor de PFD baseado no:

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

A realização da redução do risco de uma SIF é definida em termos de PFD. Padrões internacionais agruparam SIFs para aplicações em indústrias de processos químicas em categorias chamadas Níveis Integrados de Segurança (SILs). Os SILs são definidos como:

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

#### **2.4.9 SISTEMAS DE INUNDAÇÃO, SPRAY, ESPUMA E OUTROS SISTEMAS DE MITIGAÇÃO DE INCÊNDIO**

Sistemas de inundação, spray de água e espuma podem ser considerados como IPL's para prevenir a última liberação (por exemplo, BLEVE), se bem projetados e preservados, os sistemas automáticos são instalados e atendem aos requisitos definidos no item 2.4.2.

#### **2.4.10 IPL's HUMANAS**

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

### **2.5 DETERMINANDO FREQUÊNCIA DOS CENÁRIOS**

Os cálculos podem ser quantitativos usando estimativas numéricas ou olhando tabelas.

#### **2.5.1 CÁLCULO GERAL**

Procedimento geral para o cálculo da frequência para um cenário de liberação com uma consequência específica. Para este cenário, a frequência do evento iniciador do item 2.3 é multiplicada pelo produto das PFD's da IPL.

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

Onde:

$f_i^C$  freqüência para a consequência C para o evento iniciador i

$f_i$  freqüência do evento iniciador para o evento iniciador i

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

Esta equação é aplicada para situações de baixa demanda. O cálculo para altas demandas é mostrado a seguir. O resultado da equação (2-1) pode ser usado como entrada para comparação do risco calculado para o cenário dos critérios de tolerância de risco para os métodos de tomada de decisão.

## 2.5.2 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE EVENTOS ADICIONAIS

Em alguns casos somente a freqüência de uma liberação é calculada, mas existem outros tipos de eventos. Assim sendo, devem ser incluídas as freqüências de outros eventos, como eventos inflamáveis, por exemplo, incêndio e explosão; efeitos tóxicos, onde aplicáveis; exposição à flamabilidade ou efeitos tóxicos; dano ou fatalidade.

Para calcular a freqüência de tais eventos, a equação (2-1) é modificada pela multiplicação da freqüência do cenário de liberação pelas probabilidades apropriadas para o evento de interesse, que inclui:

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

A equação (2-2) determina a freqüência de incêndio para um único cenário para um único sistema.

$$f_i^{incêndio} = f_i \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignição} \quad (2-2)$$

A equação (2-3) determina a freqüência de uma pessoa exposta a incêndio.

$$f_i^{exposição a incêndio} = f_i \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignição} \times P^{pessoal presente} \quad (2-3)$$

A equação (2-4) determina a freqüência de uma pessoa sofrer queimaduras num incêndio.

$$f_i^{dano incêndio} = f_i \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{ignição} \times P^{pessoal presente} \times P^{dano} \quad (2-4)$$

Para efeitos tóxicos a freqüência é determinada similarmente à equação (2-4) omitindo a  $P^{ignição}$ .

$$f_i^{tóxico} = f_i \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \times P^{pessoal presente} \times P^{dano} \quad (2-5)$$

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



## 2.6 ESTIMANDO O RISCO

Nesta etapa deve-se calcular o risco com os valores obtidos nas etapas anteriores. Tabelas como a Tabela 2.1 foram usadas para documentar e calcular o risco dos cenários.[2]

**TABELA 2.1:** TABELA PARA DOCUMENTAÇÃO E CÁLCULOS DE CENÁRIOS PARA LOPA

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)			
<b>Critério Tolerância de Risco</b> (Categoria ou Frequência)			
<b>Evento Iniciador</b>			
<b>Condição / Evento Habilitador</b>			
<b>Modificadores Condicionais (se aplicável)</b>			
	Probabilidade de Ignição		
	Probabilidade de pessoas presentes na área afetada		
	Probabilidade de ferimento fatal		
	Outros		
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana			
SIF			
Outras Camadas de Proteção (devem ser justificadas)			
<b>Salvaguardas não-IPL's</b>			
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>			
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não):</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 2.7 USANDO A LOPA PARA TOMAR A DECISÃO DO RISCO

Todos os métodos descritos neste item podem ser usados para tomar decisões para alcançar o nível de risco que é “tão baixo quanto razoavelmente praticável” (ALARP - “as low as reasonably practicable”), também definido como o nível de risco que é tolerado pela empresa.

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

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

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

Se o risco calculado é menor do que os critérios de risco, o cenário calculado tem um risco suficientemente baixo ou tem mitigação (ou IPL) suficiente e nenhuma mitigação adicional é necessária. Se, entretanto, o risco calculado exceder o critério de risco, o cenário calculado requer uma mitigação (IPL's) adicional (ou mais forte), ou requer mudanças no projeto para tornar o processo inerentemente seguro, reduzindo a frequência ou consequência do cenário, ou (preferivelmente) eliminando o cenário.

A decisão da LOPA pode ser tomada por três métodos, que serão descritos a seguir.

### **2.7.1 MÉTODO DA MATRIZ**

A matriz de risco é um método generalizado de mostrar visualmente a frequência tolerada para um cenário, baseada na severidade da consequência e a frequência do cenário. A tabela 8.1 do CCPS, 2001[2] mostra o método da matriz, onde é feita uma combinação da categoria da consequência e a frequência calculada, resultando numa célula que irá informar o grau de redução de risco requerido para o cenário.

O método da matriz pode ser a aproximação mais extensamente usada para tomar decisões de risco com a LOPA.

As vantagens desse método são:

- o esboço claro do risco associado com o cenário. A redução do risco requerida pode ser demonstrada visualmente e numericamente e várias áreas de decisão de redução de risco são facilmente descritas;
- os valores numéricos de tolerância do risco atual usados por uma empresa podem ser embutidos na matriz, caso elas queiram usar seus próprios critérios;
- a precisão de muitos métodos da matriz de risco (geralmente para ordem de magnitude) fazem deles métodos bem ajustados para usar com o método da LOPA com seu uso de suposições conservativas e simplificadas;
- é fácil a tomada de decisão desde que somente um cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.

A desvantagem deste método é que o desenvolvimento de uma matriz usual com sua matriz de consequência associada requer meios e técnicas experientes.

Como não existe matriz de risco para este tipo de estudo, a Tabela 2.2 foi adaptada da tabela 8.1 do CCPS, 2001[2].

**TABELA 2.2:** MATRIZ DE RISCO COM ZONAS INDIVIDUAIS DE AÇÃO

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

### **2.7.2 MÉTODO DE CRITÉRIOS NUMÉRICOS (MÁXIMO RISCO TOLERADO PARA O CENÁRIO)**

Algumas empresas têm desenvolvido os critérios de risco baseados no maior risco tolerado por cenário e na variedade de categorias de conseqüências. Outras podem escolher a freqüência de liberação de material perigoso, incêndio, ou perda de dano da propriedade.

As vantagens para esse método são:

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

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

### **2.7.3 MÉTODO DO NÚMERO DE CRÉDITOS DE IPL'S**

Neste método as PFD's da IPL não são usadas nos cálculos. Este método compara a freqüência ajustada do evento iniciador com a categoria da conseqüência e determina o número de créditos de IPL's requerido para o cenário, conforme mostrado na tabela 8.2 do CCPS, 2001[2]. Os critérios de tolerância não são mostrados explicitamente.

As vantagens desse método são:

- a facilidade de identificação do método da matriz, dos limites para as categorias de freqüência e severidade;

- facilidade de usar;
- os critérios de tolerância de risco podem ser embutidos, por empresas que preferem usar seus próprios critérios;
- é fácil a tomada de decisão desde que somente um cenário por vez esteja envolvido na decisão do risco.

A desvantagem desse método é que as suposições grosseiras direcionam para creditar métodos de mitigação que podem require mais IPL's que outros métodos da LOPA.

### 3 SISTEMA DE HIDROGÊNIO

O Sistema de Hidrogênio do Gerador Elétrico principal de uma usina tem a função de suprir e manter o gerador com hidrogênio seco, nos valores desejados de pressão e temperatura, com a finalidade de prover o resfriamento adequado do estator e rotor do gerador elétrico principal durante operação em potência.

Este sistema é projetado para manter o hidrogênio no gerador com uma pureza maior ou igual a 95% e fornecer meios para a colocação ou retirada de hidrogênio no gerador, usando CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) como o gás intermediário, de maneira segura e eficiente. Como a mistura de hidrogênio - ar é explosiva dentro de uma faixa muito larga (5% até 70% de hidrogênio por volume), o projeto da máquina foi desenvolvido de tal forma que misturas explosivas não fossem possíveis de ocorrer em condições normais de operação. A estrutura do gerador é resistente a uma explosão, na mais explosiva proporção de ar e hidrogênio, numa pressão de gás nominal de 2 ou 3 psig (hidrogênio acidentalmente sendo admitido durante uma operação de purga), sem danos a outras estruturas ou perda de vida.[12]

O gás hidrogênio é utilizado em circuito fechado axial para o resfriamento do gerador por possuir as seguintes características:[12]

- a massa específica do hidrogênio é aproximadamente 14 vezes inferior a do ar e as perdas aeólicas são reduzidas em aproximadamente 90%;
- o hidrogênio tem calor específico aproximadamente 14 vezes superior ao do ar e melhor condutividade térmica, sendo sua capacidade de remoção de calor 300% maior que a do ar;
- com a utilização do hidrogênio não pode haver presença de oxigênio, que diminui a probabilidade de corrosão dentro do gerador;

- o sistema de selagem, que evita o vazamento de hidrogênio nos extremos do gerador, utiliza óleo lubrificante à pressão superior à do gás, e com isto o hidrogênio é contaminado com umidade, o que diminui a sua pureza.

**TABELA 3.1:** CARACTERÍSTICAS DE RESFRIAMENTO DO GERADOR

<b>CARACTERÍSTICAS DE RESFRIAMENTO DO GERADOR</b>	
- Pressão máxima de operação do hidrogênio	5,3 kg/cm <sup>2</sup>
- Pressão mínima de operação do hidrogênio	4,8 kg/cm <sup>2</sup>
- Volume estático de gás	67670 litros
- Purga mínima de hidrogênio	95%
- Área total da seção transversal dos dutos de ventilação	1010 cm <sup>2</sup>

### 3.1 CIRCUITO DE HIDROGÊNIO

A Figura 3.1 mostra o Sistema de Hidrogênio do Gerador.[12]

Neste sistema está localizado um cabide com quatro cilindros contendo hidrogênio pressurizado conectados a um coletor comum, com uma válvula redutora de pressão (60/7 kg/cm<sup>2</sup>) instalada na sua saída. A tubulação de saída do coletor direciona o gás para outra válvula redutora de pressão, que reduz a pressão do hidrogênio para a pressão nominal de operação (4,8 a 5,2 kg/cm<sup>2</sup>). Após a 2ª redutora, o gás é direcionado para o coletor superior de gás, internamente ao gerador.[12]

A pressão do gás no gerador é mantida pelo ajuste manual da 1ª reguladora (60/7), feito pelo operador local, a fim de completar as perdas diárias de hidrogênio.

A circulação do hidrogênio, no interior do gerador, é obtida por meio de um ventilador montado no eixo, lado acoplado, que é mostrado na Figura 3.2.[12] O ventilador força o gás a passar pelos oito resfriadores de hidrogênio, internos ao



gerador, de forma que após os mesmos o gás esteja na sua temperatura de operação (~42°C).

O controle de temperatura é feito pela válvula TV-01 localizada na saída da água do Sistema de Água de Refrigeração do Edifício da Turbina (RET), que é o meio refrigerante do gás.

Se a unidade estiver sendo operada sem a bomba de óleo de selagem do lado de hidrogênio, a pureza pode ser mantida em 90% para evitar gasto excessivo de hidrogênio.

A desumidificação do hidrogênio é feita forçando sua passagem através de um secador de gás, que absorverá a umidade. A regeneração do secador localizado próximo aos cilindros de gás é realizada isolando-o do gerador, através de válvulas manuais locais, aquecendo-o através de resistências elétricas e fazendo circular ar nos cristais desumidificadores para remover a umidade para a atmosfera.

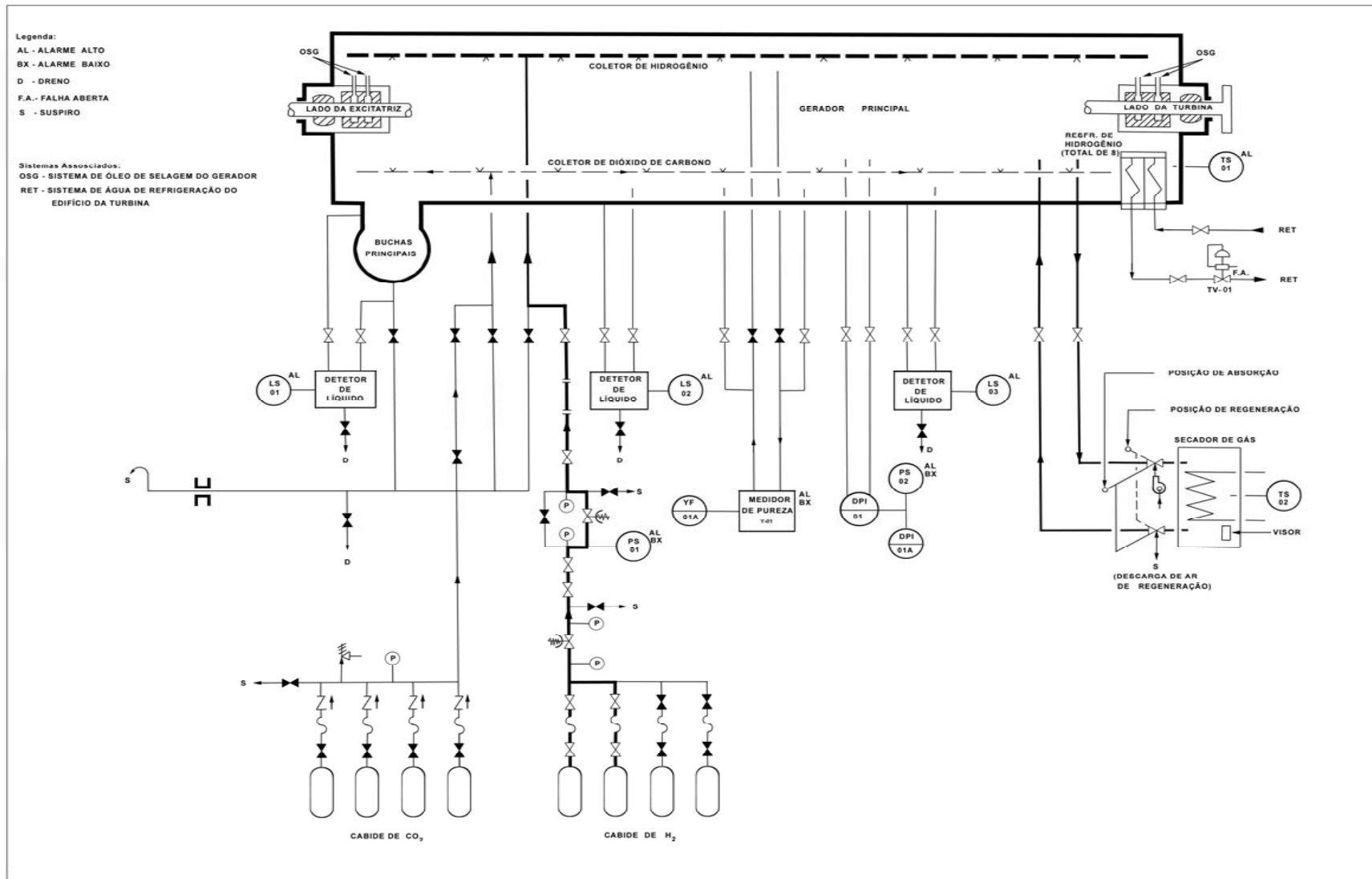
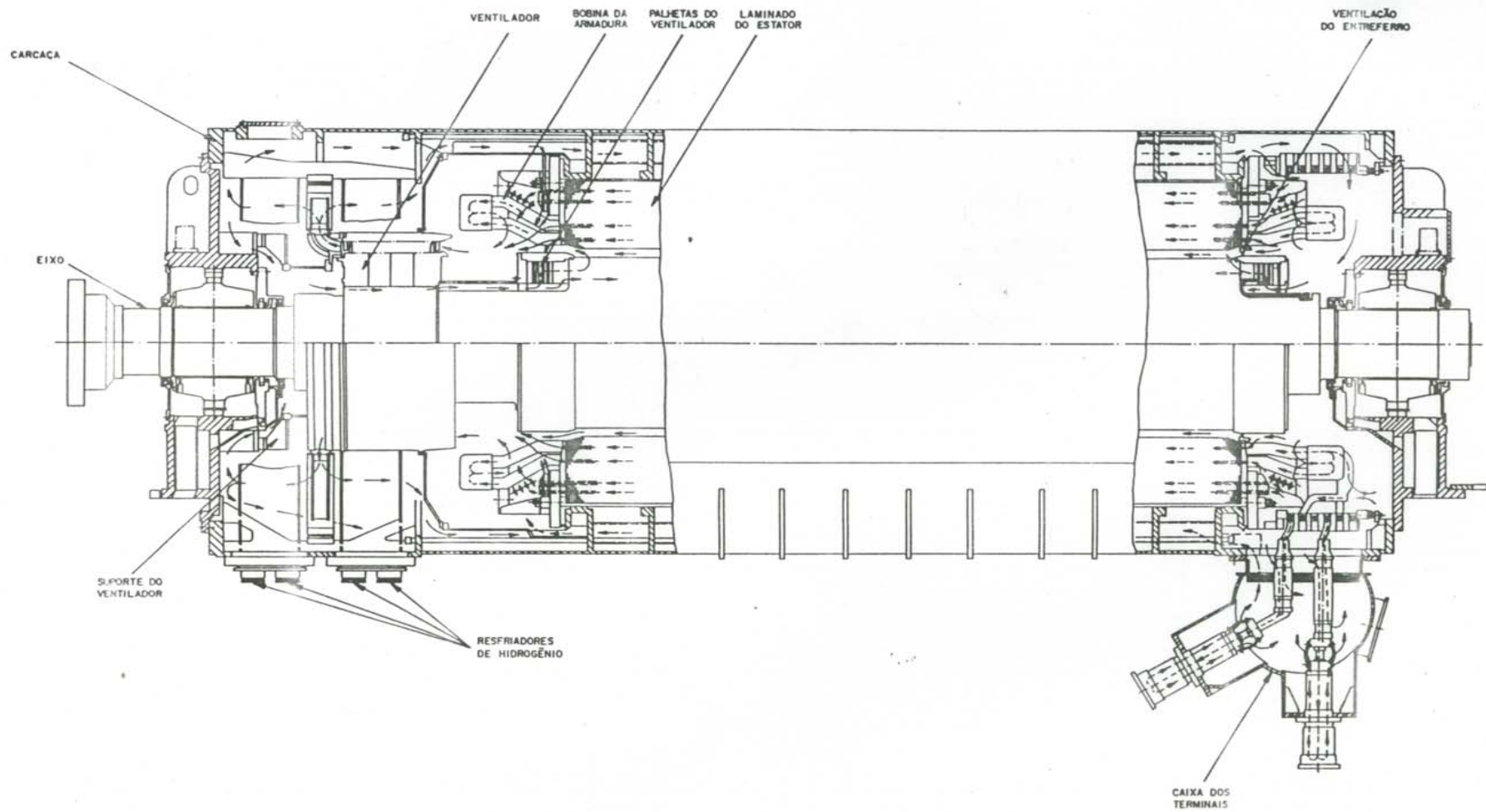


FIGURA 3.1: SISTEMA DE HIDROGÊNIO DO GERADOR



**FIGURA 3.2:** CORTE TRANSVERSAL DO GERADOR ELÉTRICO

### **3.2 GÁS CARBÔNICO**

O gás carbônico é usado para purgar tanto o ar como o hidrogênio do gerador, garantindo que não sejam formadas misturas explosivas quando se necessitar modificar a atmosfera de gás do gerador.

Em frente ao cabide de hidrogênio há um cabide de CO<sub>2</sub> também para quatro garrafas. A linha de saída do coletor descarrega no coletor inferior de gás, internamente ao gerador. Instalada no coletor do gabinete há uma válvula de segurança para proteção contra sobrepressão, que abre com aproximadamente 7 kg/cm<sup>2</sup>. [12]

### **3.3 TROCA DE GASES DO GERADOR**

Com relação a troca de gases no interior do gerador deve ser observado o seguinte: [12]

- a pureza do hidrogênio é verificada através da linha de amostragem do fundo do gerador, que é a última região a ser ocupada pelo gás, visto ele ser mais leve que o ar e ser introduzido pelo coletor superior do gerador;
- pelo mesmo raciocínio, a pureza do gás carbônico é verificada através da linha de amostragem do topo, pois o mesmo é mais pesado que o ar;
- normalmente a troca de gases é feita com o gerador parado ou no girador, para facilitar a separação dos gases pela diferença de massa específica entre os mesmos. Em emergência, a troca de gases poderá ser feita com o gerador a uma velocidade de até 1000 rpm, para o caso em que o gerador funciona normalmente com uma velocidade de 1800 rpm;

- o tempo de espera entre a adição do gás que quer se colocar e a purga do gás que se quer retirar deve ser entre 5 a 10 minutos para que haja uma separação dos gases devido à diferença de massa específica;
- a pressão do gás no gerador é sempre  $0,14 \text{ kg/cm}^2$ , menor do que a pressão do Sistema de Óleo de Selagem, que deverá estar sempre em operação quando houver hidrogênio no gerador ou quando houver troca de gases;
- durante a troca de gases no gerador, a admissão de gás deverá ser interrompida quando a pressão no gerador atingir a  $0,21 \text{ kg/cm}^2$  e durante a purga de gás deverá ser interrompida quando a pressão no gerador atingir a  $0,14 \text{ kg/cm}^2$ ;
- todas as precauções devem ser tomadas para que não se forme mistura explosiva entre  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ , bem como para que não haja fonte de ignição próximo às áreas onde há hidrogênio;
- deve ser assegurada uma boa ventilação do gerador com ar, para retirada do gás carbônico do interior do gerador, antes de se permitir a entrada de pessoas neste equipamento;
- o volume de gás estático do gerador é de 67670 litros. Com o gerador parado ou no girador, a quantidade de gás necessária para troca é de aproximadamente:
  - 1,5 volumes para o gás carbônico / ar ( $\sim 101505$  litros de  $\text{CO}_2$ )
  - 2,0 volumes para o gás carbônico / hidrogênio ( $\sim 135240$  litros de  $\text{CO}_2$ )
  - 2,5 volumes para hidrogênio / gás carbônico ( $\sim 169050$  litros de  $\text{H}_2$ )

### **3.4 EQUIPAMENTOS**

#### **3.4.1 SECADOR DE GÁS**

O secador de gás consiste de uma câmara cheia de material absorvente (alumina ativada) que é conectado ao ventilador do gerador a fim de permitir que o gás circule através do secador, sempre que o gerador esteja em operação.

A carga de alumina do secador tem capacidade para absorver 0,9 litros de água, o que pode ser observado pela mudança da sua coloração, que quando seca possui a cor azul claro e quando saturada pela umidade a cor rosa-acinzentado.[12]

O secador possui uma resistência interna, um ventilador e um acionador manual, para posicionar (simultaneamente) as válvulas a fim de possibilitar a regeneração dos cristais de alumina.

A carga de alumina deve ser trocada a cada 18 meses ou quando for contaminada com vapor de óleo.

A presença de óleo na alumina pode ser detectada de duas formas:

- mudança de coloração dos cristais para uma cor diferente das normais (azul claro / rosa-acinzentado);
- presença de óleo quando da abertura das válvulas de drenos do sistema de detecção de água, indicando que o gás foi contaminado com óleo.

### **3.4.2 MEDIDOR DE PUREZA DO GÁS**

A pureza do gás no interior do gerador é determinada pelo uso de um ventilador e um transmissor de indicação de pureza.

O instrumento mede o diferencial de pressão entre a sucção e a descarga do ventilador. Um motor elétrico com carga bem leve, de modo a permitir seu funcionamento a uma velocidade praticamente constante, aciona o ventilador que faz circular o gás retirado da carcaça do gerador. Conseqüentemente a pressão desenvolvida pelo ventilador do medidor de pureza diretamente com a massa específica do gás no gerador. A massa específica do gás depende das condições ambientais de pressão e temperatura, bem como da pureza do gás, cuja amostra se esteja coletando.

### **3.5 SISTEMAS AUXILIARES DO GERADOR**

#### **3.5.1 SISTEMA DE ÓLEO DE SELAGEM DO GERADOR (OSG)**

O Sistema de Óleo de Selagem do Gerador tem como objetivo evitar a entrada de ar no gerador, evitar fuga de hidrogênio e lubrificar os selos do gerador. Este sistema está projetado para evitar, com uma alta taxa de confiabilidade, que haja uma mistura de hidrogênio com o ar, tanto dentro do gerador como fora dele.

A Figura 3.3 mostra um esquemático da selagem do eixo do gerador.[12]

As pressões dos óleos de selagem do lado do ar e do lado do hidrogênio são mantidas  $0,84 \text{ kgf/cm}^2$  acima da pressão de hidrogênio no interior do gerador. Com o gerador principal sincronizado, se a pressão do sistema de óleo de selagem cair

abaixo da pressão do hidrogênio, um grande perigo de incêndio irá existir, visto que poderá ocorrer mistura hidrogênio – oxigênio.[12]

A selagem do lado do ar é feita para evitar que ar e umidade penetrem no interior do gerador.

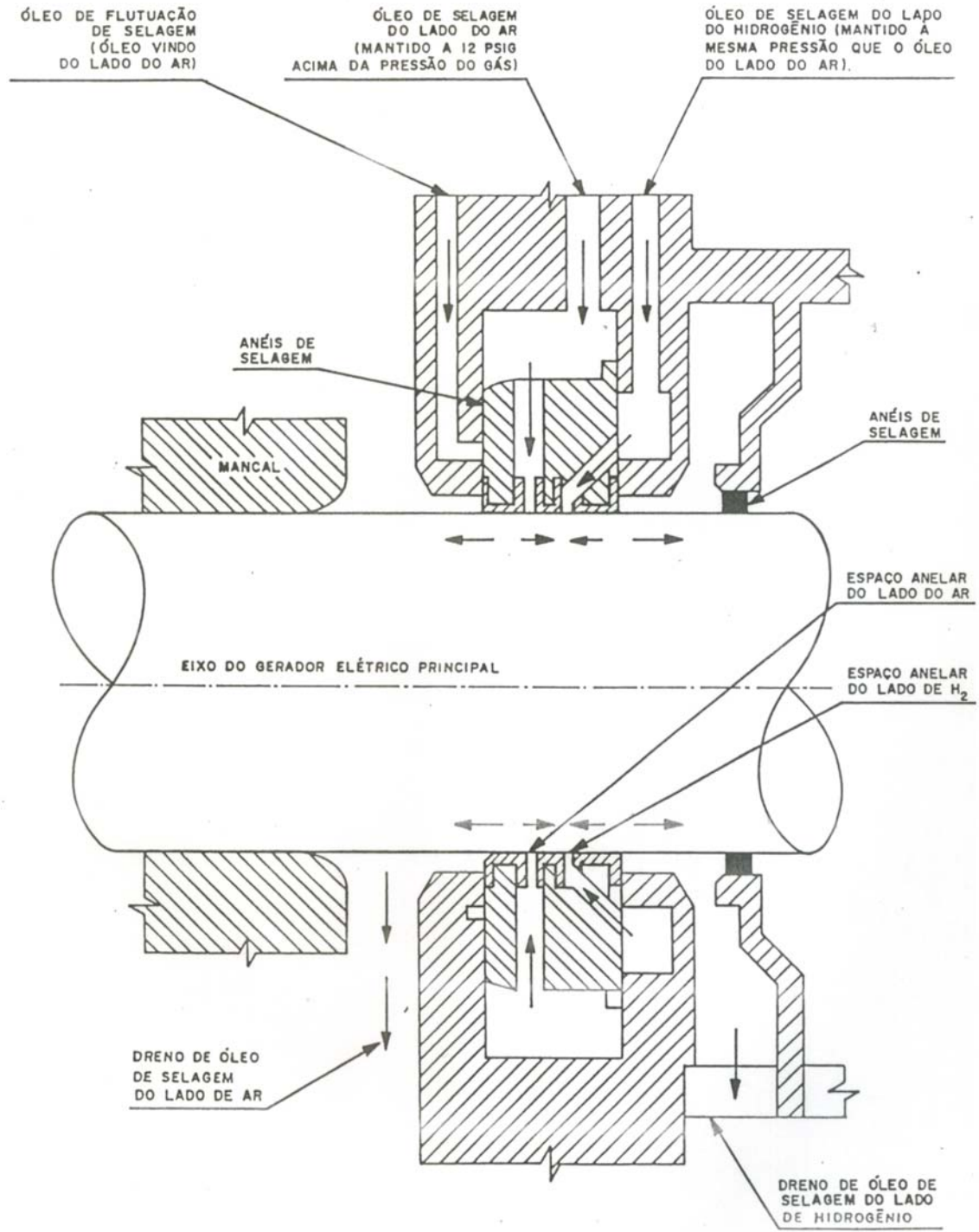
Em caso de indisponibilidade do sistema de lubrificação da turbina, o hidrogênio deve ser purgado do gerador, pois as fontes de suprimento de retaguarda de óleo para selagem do gerador são eliminadas.

### **3.5.2 SISTEMA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO DA TURBINA (RET)**

Este sistema tem como objetivo resfriar o hidrogênio do gerador e o óleo de selagem do gerador, lado do ar e lado do hidrogênio.

O controle da temperatura é feito pelo ajuste do fluxo de água do RET através de cada trocador de calor, o fluxo é controlado por válvulas automáticas que modulam de acordo com a temperatura do equipamento (TV-01). Essas válvulas são automáticas porque o controle de temperatura é mais crítico.





**FIGURA 3.3:** ESQUEMÁTICO DA SELAGEM DO EIXO DO GERADOR ELÉTRICO PRINCIPAL

## **3.6 CONTROLES E PROTEÇÕES**

### **3.6.1 CONTROLE DE TEMPERATURA DO HIDROGÊNIO DO GERADOR – TV-01**

O hidrogênio é resfriado por oito trocadores de calor fixados internamente à carcaça do gerador. Na linha comum de saída dos resfriadores está instalada a válvula TV-01, que controla o fluxo de água do Sistema de Água de Refrigeração do Edifício da Turbina através dos mesmos.

O controlador TK-01 situado na seção A do Painel Principal de Controle, recebe sinal de temperatura de hidrogênio, sentida pelo TE-01 e modula a válvula TV-01, de modo a manter a temperatura pré-ajustada no controlador ( $\sim 38^{\circ}\text{C}$ ).[12]

O sinal de temperatura do TE-01, após ser convertido em corrente contínua, também é enviado para o indicador de temperatura TI-01 e para o alarme de alta temperatura de hidrogênio localizados na seção A do Painel Principal.[12]

### **3.6.2 PROTEÇÕES**

O gerador tem as seguintes proteções:

- chave de nível operada por bóia no detector de líquido (LS-01/02/03). Soa alarme de nível alto no Painel de Controle de Hidrogênio;
- válvula redutora de pressão. Mantém a pressão de gás no gerador através de ajuste manual;
- medidor de pureza do gás hidrogênio.

## **3.7 INTERTRAVAMENTOS**

### **3.7.1 PROTEÇÃO DE ALTA TEMPERATURA NO SECADOR DE GÁS**

Um termostato (TS-02) protege o secador contra sobreaquecimento, desligando-o com alta temperatura.

### **3.7.2 DESLIGAMENTO DOS VENTILADORES POR SOBRECARGA NOS MOTORES**

O ventilador do secador de gás, o ventilador do medidor de pureza, as bombas e os filtros do sistema de óleo de selagem são desligados caso ocorra sobrecarga nos seus motores.

### **3.7.3 PARTIDA AUTOMÁTICA DA BOMBA DE ÓLEO DE SELAGEM**

A bomba reserva de óleo de selagem do lado do ar parte automaticamente em caso de sinal de baixa pressão de óleo de selagem.

## 4 APLICAÇÃO DA LOPA

A aplicação da LOPA é feita por etapas, como foi descrito no capítulo 2. A primeira etapa é identificar as conseqüências de cada cenário, e para isso tem que ser feita uma análise qualitativa. Neste caso, foi escolhido utilizar a técnica do HAZOP, que é uma técnica sistemática para a identificação de perigos e problemas de operabilidade de toda a instalação.[13] Cada seção de um processo é examinada e todos os possíveis desvios das condições normais de operação, e como podem ocorrer, são listados. As conseqüências sobre o processo são avaliadas e as medidas para detectar desvios “prováveis”, que podem levar a eventos perigosos ou problemas de operabilidade, são identificadas.[14]

**Passo 1:** *Identificar conseqüências para os cenários.*

A Tabela 4.1 mostra os resultados do estudo do HAZOP para avaliar os desvios do Sistema de Hidrogênio.

Este estudo gerou 10 (dez) possíveis desvios, mas alguns deles não são prováveis ocorrer, como o item 3, que não é possível ocorrer porque caso o sistema de óleo de selagem falhe, não terá entrada de ar, uma vez que o gerador está pressurizado.

A magnitude das conseqüências é estimada pela Tabela 4.2, que foi baseada na tabela 3.1 do CCPS, 2001[2], adaptando para o cenário do Sistema de Hidrogênio do Gerador Elétrico de uma usina nuclear.

**TABELA 4.1: RESULTADO DO HAZOP**

Item	Desvio	Causa	Conseqüência	Proteção
1	Alta temperatura de hidrogênio	Falha no resfriador de hidrogênio	Explosão	Válvula automática (TV-01) de controle de fluxo / Alarme no painel para ação do operador
2	Alta pressão de hidrogênio	Falha na válvula redutora de pressão	Ruptura / vazamento	Alarme no painel para ação do operador
3	Entrada de ar no gerador	Falha no sistema de óleo de selagem	Explosão	OSG
4	Baixa pressão de hidrogênio	Falha na válvula	Vazamento de hidrogênio	Alarme no painel para ação do operador
5	Trinca no gerador	Entrada de ar	Vazamento de hidrogênio	-
		Vibração		
		Corrosão		
6	Alta concentração de contaminantes (líquido)	Falha no secador de gás	Corrosão / Dificuldade do hidrogênio circular dentro do gerador / Centelhamento nas buchas	Detector de líquido
		Falha nas válvulas de dreno		
		Ruptura nos tubos do trocador de calor		
7	Alto consumo de hidrogênio	Trinca na linha do hidrogênio	Vazamento	Alarme no painel para ação do operador
8	Vazão menor de gás carbônico	Válvula parcialmente aberta	Congelamento do gás na linha	Proteção humana
9	Alta temperatura de gás carbônico	Incêndio embaixo do cilindro de gás carbônico	Explosão	Válvula de segurança
10	Alta pressão de gás carbônico	Incêndio embaixo do cilindro de gás carbônico	Explosão	Válvula de segurança

**TABELA 4.2:** CATEGORIZAÇÃO DA CONSEQÜÊNCIA

Características da Conseqüência	Magnitude da Perda			
	Equipamento poupado ou não essencial	Planta indisponível menos de 1 mês	Planta indisponível de 1 a 3 meses	Planta indisponível mais do que 3 meses
Dano mecânico ao gerador de hidrogênio	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
Danos mecânicos aos sistemas auxiliares do gerador	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4

**Passo 2:** *Selecionar cenários de acidente.*

Os cenários de acidente são formados por um único par evento iniciador - conseqüência. Os cenários para este estudo estão na Tabela 4.3.

Não serão efetuados cálculos para o cenário 12 porque a probabilidade de ocorrer um incêndio embaixo dos cilindros de gás carbônico é muito pequena, já que os cilindros de gás carbônico ficam localizados numa área protegida e sem a presença de material combustível.[15]

**TABELA 4.3:** CENÁRIOS PARA A APLICAÇÃO DA LOPA NUM GERADOR ELÉTRICO RESFRIADO  
A HIDROGÊNIO

Cenário	Evento iniciador	Conseqüência
1	Falha no resfriador de hidrogênio	Explosão
2	Falha na válvula redutora de pressão	Ruptura / vazamento de hidrogênio
3	Falha no sistema de óleo de selagem do gerador	Explosão
4	Falha na válvula controladora de pressão	Vazamento de hidrogênio
5	Vibração do gerador, causando trinca	Vazamento de hidrogênio
6	Falha do selante do gerador	Vazamento de hidrogênio
7	Falha no secador de gás	Alta concentração de líquido dentro do gerador
8	Falha nas válvulas de dreno do detector de líquidos	Alta concentração de líquido dentro do gerador
9	Ruptura nos tubos do trocador de calor	Alta concentração de líquido dentro do gerador
10	Trinca na linha de hidrogênio	Vazamento de hidrogênio
11	Válvula da linha de gás carbônico parcialmente aberta	Congelamento do gás na linha
12	Incêndio embaixo dos cilindros de gás carbônico	Explosão

**Passo 3:** *Identificar evento iniciador e determinar freqüência do evento iniciador.*

Os dados para a freqüência do evento iniciador foram retirados de ANSI/IEEE Standard 500, 1984 [8]; OREDA, 2002 [9]; CCPS, 2001 [2] e LEES, 1996[16].

A Tabela 4.4 indica a freqüência de falha para cada evento iniciador.

**TABELA 4.4:** TABELA DE FREQUÊNCIAS PARA CADA EVENTO INICIADOR

Cenário	Evento iniciador	Frequência
1	Falha no resfriador de hidrogênio	$f = 1,47 / 10^6 \text{h} = 1,29 \times 10^{-2} / \text{ano}$
2	Falha na válvula redutora de pressão	$f = 2,11 / 10^6 \text{h} = 1,85 \times 10^{-2} / \text{ano}$
3	Falha no sistema de óleo de selagem do gerador	$f = 6,82 \times 10^{-4} / \text{ano}$
4	Falha na válvula controladora de pressão	$f = 30 / 10^6 \text{h} = 2,63 \times 10^{-1} / \text{ano}$
5	Vibração do gerador, causando trinca	$f = 3,33 / 10^6 \text{h} = 2,92 \times 10^{-2} / \text{ano}$
6	Falha do selante do gerador	$f = 1 \times 10^{-1} / \text{ano}$
7	Falha no secador de gás	$f = 0,52 / 10^6 \text{h} = 4,56 \times 10^{-3} / \text{ano}$
8	Falha nas válvulas de dreno	$f = 5,09 / 10^6 \text{h} = 4,46 \times 10^{-2} / \text{ano}$
9	Ruptura nos tubos do trocador de calor	$f = 1 / 10^6 \text{h} = 8,76 \times 10^{-3} / \text{ano}$
10	Trinca na linha de hidrogênio	$f = 1 \times 10^{-4} / \text{ano}$
11	Válvula da linha de gás carbônico parcialmente aberta	$f = 0,90 / 10^6 \text{h} = 7,88 \times 10^{-3} / \text{ano}$

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

Para estes cenários as camadas de proteção independentes são:

- dependentes da ação do operador a uma indicação de alarme no painel;
- o secador de gás, que é intertravado e desliga a alta temperatura;
- partida automática da bomba reserva de óleo de selagem do lado do ar do sistema de óleo de selagem.

A Tabela 4.5 fornece as camadas de proteção independentes para cada cenário e suas respectivas probabilidades de falha na demanda.



Os valores das PFD's foram retirados de CCPS, 2001[2]; IEC, 1998[17] e IEC, 2001[18].

**TABELA 4.5:** CAMADAS DE PROTEÇÃO INDEPENDENTES E SUAS RESPECTIVAS  
PROBABILIDADES DE FALHA NA DEMANDA PARA CADA CENÁRIO

Cenário	IPL's	PFD
1	Válvula automática (TV-01) do fluxo de água do RET.	$1 \times 10^{-1}$
	Ação do operador ao alarme de elevação de temperatura (TS-01).	$1 \times 10^{-1}$
2	Ação do operador ao alarme indicando pressão alta (PS-01).	$1 \times 10^{-1}$
3	Partida automática da bomba reserva de óleo de selagem.	$1 \times 10^{-1}$
	Ação do operador para partir a bomba ao sinal de baixa pressão do óleo de selagem.	$1 \times 10^{-1}$
4	Ação do operador ao alarme indicando pressão baixa (PS-02).	$1 \times 10^{-1}$
5	Ação do operador ao alto consumo de hidrogênio.	$1 \times 10^{-1}$
6	Partida automática da bomba reserva de óleo de selagem.	$1 \times 10^{-1}$
	Ação do operador para partir a bomba ao sinal de baixa pressão do óleo de selagem.	$1 \times 10^{-1}$
7	Ação do operador ao alarme de nível alto do detector de líquido (LS-01/02/03).	$1 \times 10^{-1}$
8	Ação do operador ao alarme de nível alto do detector de líquido (LS-01/02/03).	$1 \times 10^{-1}$
9	Ação do operador ao alarme de nível alto do detector de líquido (LS-01/02/03).	$1 \times 10^{-1}$
10	Ação do operador ao alarme de pressão baixa de H <sub>2</sub>	$1 \times 10^{-1}$
11	Ação do operador ao alarme de pressão baixa de CO <sub>2</sub>	$1 \times 10^{-1}$

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

Nesta etapa, deve-se calcular o risco dos cenários utilizando a equação (2-1) para determinar a frequência dos cenários, supondo que todas as proteções falhem.

Os resultados para os cenários são encontrados no capítulo 5.

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

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

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CENÁRIO 1

O cenário 1 é a falha no resfriador de hidrogênio. Uma falha nesse sistema causará elevação da temperatura do hidrogênio dentro do gerador e uma conseqüente explosão. Pela grave conseqüência do sistema, ele é intertravado, acionando automaticamente uma válvula para controlar a temperatura do hidrogênio.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar camadas de proteção, que alternativas devem ser avaliadas, mas como esse sistema é muito importante, uma sugestão seria adicionar uma nova válvula de acionamento automático redundante a existente. A Tabela 5.1 mostra o resultado para o Cenário 1.

**TABELA 5.1: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 1**

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
1	Gerador de H <sub>2</sub>	<b>Falha no resfriador de hidrogênio, que resulta na explosão do gerador</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Explosão do gerador causado por elevação da temperatura de hidrogênio <b>Categoria 4</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Falha no resfriador de hidrogênio		1,29x10 <sup>-2</sup>
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>1,29x10<sup>-2</sup></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>	
SIF	Válvula automática (TV-01)	1x10 <sup>-1</sup>	
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-2</sup></b>	
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>1,29x10<sup>-4</sup></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avalie alternativas)</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco: Colocar função instrumentada de segurança adicional, por exemplo, outra válvula de acionamento automático para controlar a temperatura do resfriador de hidrogênio.</b>			
<b>Observações:</b>			

## 5.2 CENÁRIO 2

O cenário 2 é a falha na válvula redutora de pressão da linha de hidrogênio. A falha nessa válvula ocasionará na elevação de pressão, em seguida a ruptura da tubulação e o vazamento de hidrogênio. Se o hidrogênio vazar para a atmosfera, e se ele dispersar rapidamente não terá problema algum, mas se ele ficar contido em algum espaço, pode ocorrer formação de mistura inflamável.

O resultado da LOPA indica que uma camada de proteção adicional é opcional e alternativas devem ser avaliadas. Como esse sistema é manual, uma forma de atender aos critérios de tolerância de risco seria colocar um sistema de controle para essa válvula, aumentando a confiabilidade do sistema. A Tabela 5.2 mostra o resultado para o Cenário 2.

**TABELA 5.2:** TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 2

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário		
<b>2</b>	<b>Gerador de H<sub>2</sub></b>	<b>Falha na válvula redutora de pressão da linha de H<sub>2</sub>, que resulta na ruptura da linha e vazamento de hidrogênio</b>		
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)	
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Vazamento de hidrogênio <b>Categoria 2</b>			
<b>Evento Iniciador</b>	Falha na válvula redutora de pressão		1,85x10 <sup>-2</sup>	
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>1,85x10<sup>-2</sup></b>	
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>				
BPCS				
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>		
SIF				
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>		
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>1,85x10<sup>-3</sup></b>	
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avalie alternativas)</b>				
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>				
<b>Observações:</b>				

### 5.3 CENÁRIO 3

O cenário 3 é a falha no sistema de óleo de selagem do gerador, esse sistema é muito importante e possui uma alta confiabilidade. Ele é responsável pela não formação de mistura inflamável hidrogênio-oxigênio, não permitindo a entrada de ar no gerador. Caso ocorra falha nesse sistema, o ar será admitido para dentro do gerador, causando explosão.

O resultado da LOPA para esse cenário indicou que as proteções estão atendendo aos critérios de tolerabilidade de risco, visto que há um acionamento automático de uma bomba reserva de óleo de selagem, caso a bomba principal falhe, além disso, o operador pode acionar essa bomba manualmente, aumentando a confiabilidade do sistema. A Tabela 5.3 mostra o resultado para o Cenário 3.

**TABELA 5.3:** TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 3

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário		
<b>3</b>	<b>Óleo de Selagem do Gerador</b>	<b>Falha no sistema de óleo de selagem do gerador, que resulta na mistura de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> causando explosão do gerador</b>		
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)	
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Explosão do gerador causado pela mistura hidrogênio e oxigênio. <b>Categoria 4</b>			
<b>Evento Iniciador</b>	Falha no sistema de óleo de selagem do gerador		6,82x10 <sup>-4</sup>	
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>6,82x10<sup>-4</sup></b>	
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>				
BPCS				
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>		
SIF	Partida automática da bomba reserva de óleo de selagem	1x10 <sup>-1</sup>		
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-2</sup></b>		
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>6,82x10<sup>-6</sup></b>	
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Sim. Nenhuma ação adicional</b>				
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>				
<b>Observações:</b>				

## 5.4 CENÁRIO 4

O cenário 4 é a falha na válvula controladora de pressão. Essa válvula controla a pressão do hidrogênio dentro do gerador. Uma falha nessa válvula poderá não indicar um vazamento de hidrogênio.

O resultado da LOPA informa que é opcional adicionar outra camada de proteção, mas para atender aos critérios de tolerância de risco para este cenário a sugestão é automatizar o sistema de controle dessa válvula, para que não dependa somente da ação do operador. A Tabela 5.4 mostra o resultado para o Cenário 4.

**TABELA 5.4: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 4**

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
4	Gerador de H <sub>2</sub>	<b>Falha na válvula controladora de pressão, que resulta em vazamento de hidrogênio</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Vazamento de hidrogênio <b>Categoria 2</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Falha válvula controladora de pressão		2,63x10 <sup>-1</sup>
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>2,63x10<sup>-1</sup></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
	BPCS		
	Intervenção Humana	1x10 <sup>-1</sup>	
	SIF		
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>	
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>2,63x10<sup>-2</sup></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avale alternativas)</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 5.5 CENÁRIO 5

O cenário 5 é a vibração do gerador que, após ocorrer uma trinca, resultará em vazamento de hidrogênio. A trinca pode ser causada por vibração da turbina ou do gerador por causa da oscilação de frequência.

Um acidente similar a esse ocorreu na Unidade I da usina nuclear de Vandellos em 19 de outubro de 1989 na Espanha. A vibração da turbina ocasionou falha do selante do gerador elétrico e um conseqüente vazamento de hidrogênio. Essa mesma vibração causou vazamento de óleo do sistema de selagem através de uma trinca formada pela vibração num local que já apresentava corrosão. Esse óleo vazado em contato com a superfície quente da turbina ignitou e causou um incêndio nessa área, ocasionando no descomissionamento da planta. [19]

Após o acidente em Vandellos I ocorreram outros similares, em 1991 na usina nuclear Salem-2 (EUA) e na usina nuclear Chernobyl-2 (Ucrânia), e em 1993 na usina nuclear Narora-1 (Índia) e na usina nuclear Fermi-2 (EUA). E após esse tipo de acidente a unidade ficou no mínimo 6 meses fora de operação ou foi desativada.[20]

O resultado da LOPA indica que é necessária uma ação na oportunidade seguinte. Entretanto, problemas de oscilação de frequência não são fáceis de controlar. Uma ação que pode ser feita é manter inspeções periódicas, para evitar corrosão e conseqüentemente uma trinca causada por essa corrosão. A Tabela 5.5 mostra o resultado para o Cenário 5.

**TABELA 5.5: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 5**

Número do Cenário <b>5</b>	Zona de Avaliação <b>Gerador de H<sub>2</sub></b>	Título do Cenário <b>Vibração do gerador, causando trinca, que resulta em vazamento de hidrogênio</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Consequência</b> (Descrição / Categoria)	Vazamento de hidrogênio <b>Categoria 4</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Vibração do gerador, causando trinca		2,92x10 <sup>-2</sup>
<b>Frequência da Consequência não mitigada</b>			<b>2,92x10<sup>-2</sup></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>	
SIF			
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>	
<b>Frequência da Consequência Mitigada</b>			<b>2,92x10<sup>-3</sup></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Ação na oportunidade seguinte</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 5.6 CENÁRIO 6

O cenário 6 é causado pela falha do selante do gerador, que resultará em vazamento de hidrogênio. Essa falha pode ser causada pelo mesmo evento do Cenário 5 ou por falha do sistema de óleo de selagem, sem motivo prévio, e é esse evento que está sendo considerado para esse cenário.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar camada de proteção independente, portanto o que pode ser feito para atender aos critérios de tolerância de risco é substituir o sistema de óleo de selagem por outro com confiabilidade maior, fazendo com que diminua a taxa de falha desse sistema. A Tabela 5.6 mostra o resultado para o Cenário 6.



**TABELA 5.6:** TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 6

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
<b>6</b>	<b>Sistema de Óleo de Selagem do Gerador</b>	<b>Falha do selante do gerador, que resulta em vazamento de hidrogênio</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Vazamento de hidrogênio <b>Categoria 3</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Falha do selante do gerador		$1,00 \times 10^{-1}$
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b><math>1,00 \times 10^{-1}</math></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
	BPCS		
	Intervenção Humana	$1 \times 10^{-1}$	
	SIF	Partida automática da bomba reserva de óleo de selagem	$1 \times 10^{-1}$
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b><math>1 \times 10^{-2}</math></b>	
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b><math>1,00 \times 10^{-3}</math></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avale alternativas)</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 5.7 CENÁRIO 7

O cenário 7 é a falha no secador de gás, que resulta em alta concentração de líquidos dentro do gerador. Uma falha no secador de gás pode parar a planta para manutenção, mas não resultará num acidente de grandes proporções.

No final de 2004, o gerador elétrico da usina nuclear Angra 2 parou por causa da elevação do teor de umidade do gás hidrogênio, com isso a usina também parou sua operação para manutenção. Foram feitos vários testes para identificar o problema, dentre eles a inspeção interna do gerador e a verificação da estanqueidade dos trocadores de calor, por fim foi feita a secagem da atmosfera do gerador e a troca de gases de refrigeração.[21] Iniciou o processo de religamento da usina, mas logo em seguida foi detectado o mesmo problema, parando novamente o funcionamento do gerador elétrico para fazer teste no rotor do gerador para identificar eventual

vazamento de água. Finalmente, após terem sido feitos os testes foi identificado que havia um vazamento no sistema de refrigeração do rotor do gerador. Em fevereiro de 2005 iniciou-se a troca do rotor, o que indisponibilizou a planta por mais de 3 meses.[22]

O resultado da LOPA mostrou que nenhuma ação adicional é requerida para esse sistema. A Tabela 5.7 mostra o resultado para o Cenário 7.

**TABELA 5.7: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 7**

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
<b>7</b>	<b>Secador de Gás</b>	<b>Falha no secador de gás, que resulta em alta concentração de líquidos dentro do gerador</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Consequência</b> (Descrição / Categoria)	Alta concentração de líquidos dentro do gerador. <b>Categoria 2</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Falha no secador de gás		$4,56 \times 10^{-3}$
<b>Frequência da Consequência não mitigada</b>			<b><math>4,56 \times 10^{-3}</math></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana		$1 \times 10^{-1}$	
SIF			
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b><math>1 \times 10^{-1}</math></b>	
<b>Frequência da Consequência Mitigada</b>			<b><math>4,56 \times 10^{-4}</math></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Sim. Nenhuma ação adicional.</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 5.8 CENÁRIO 8

O cenário 8 é a falha nas válvulas de dreno do detector de líquido, que resulta na alta concentração de líquidos dentro do gerador elétrico.

O resultado da LOPA indica que é opcional adicionar camada de proteção, portanto para evitar uma parada no gerador elétrico e conseqüente na usina nuclear, uma sugestão é colocar válvulas automáticas nos drenos acionados pelo sensor de nível do detector de líquidos e atender aos critérios de tolerância do risco. A Tabela 5.8 mostra o resultado para o Cenário 8.

**TABELA 5.8: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 8**

Número do Cenário <b>8</b>	Zona de Avaliação <b>Detector de Líquidos</b>	Título do Cenário <b>Falha nas válvulas de dreno do detector de líquido, que resulta na alta concentração de líquidos dentro do gerador</b>		
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)	
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Alta concentração de líquidos dentro do gerador. <b>Categoria 2</b>			
<b>Evento Iniciador</b>	Falha nas válvulas de dreno		4,46x10 <sup>-2</sup>	
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>4,46x10<sup>-2</sup></b>	
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>				
BPCS				
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>		
SIF				
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>		
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>4,46x10<sup>-3</sup></b>	
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Opcional (avale alternativas)</b>				
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>				
<b>Observações:</b>				

## 5.9 CENÁRIO 9

O cenário 9 é a ruptura nos tubos dos trocadores de calor, resultando numa alta concentração de líquidos dentro do gerador elétrico.

Como a taxa de falha para ruptura desses tubos é baixa, os critérios de tolerância de risco foram atendidos para esse cenário. A Tabela 5.9 mostra o resultado para o Cenário 9.

**TABELA 5.9: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 9**

Número do Cenário <b>9</b>	Zona de Avaliação <b>Secador de Gás</b>	Título do Cenário <b>Ruptura nos tubos do trocador de calor, que resulta em alta concentração de líquidos dentro do gerador</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Alta concentração de líquidos dentro do gerador. <b>Categoria 2</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Ruptura nos tubos do trocador de calor		$8,76 \times 10^{-3}$
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b><math>8,76 \times 10^{-3}</math></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana		$1 \times 10^{-1}$	
SIF			
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b><math>1 \times 10^{-1}</math></b>	
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b><math>8,76 \times 10^{-4}</math></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Sim. Nenhuma ação adicional.</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

### 5.10 CENÁRIO 10

O cenário 10 é trinca na linha de hidrogênio, que resulta em vazamento de hidrogênio. Essa trinca pode ser causada por vibração da turbina ou do gerador por causa de oscilação de frequência. Caso ocorra uma trinca nessa linha e ocorra vazamento de hidrogênio, o alarme de pressão baixa de hidrogênio será alarmado no painel de controle e o operador poderá tomar uma ação.

O resultado da LOPA mostra que nenhuma ação é requerida, os critérios de tolerância de risco são atendidos. A Tabela 5.10 mostra o resultado para o Cenário 10.

**TABELA 5.10: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 10**

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
<b>10</b>	<b>Gerador de H<sub>2</sub></b>	<b>Trinca na linha de hidrogênio, que resulta em vazamento de hidrogênio</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Consequência</b> (Descrição / Categoria)	Vazamento de hidrogênio <b>Categoria 3</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Trinca na linha de hidrogênio		1,00x10 <sup>-4</sup>
<b>Frequência da Consequência não mitigada</b>			<b>1,00x10<sup>-4</sup></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
	BPCS		
	Intervenção Humana	1x10 <sup>-1</sup>	
	SIF		
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>	
<b>Frequência da Consequência Mitigada</b>			<b>1,00x10<sup>-5</sup></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Sim. Nenhuma ação adicional</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

### 5.11 CENÁRIO 11

O cenário 11 é a válvula da linha de gás carbônico estar parcialmente aberta, que resultará no congelamento do gás carbônico na linha. Esse sistema é usado para retirar o gás hidrogênio do gerador em paradas para manutenção, mas ele também pode ser usado para retirar o hidrogênio em caso de emergência e nesse momento o gás não pode estar congelado na linha, ele tem que estar disponível sempre.

Ao alarme de pressão baixa de gás carbônico o operador toma uma ação para verificar o motivo. Essa proteção é suficiente para o critério de tolerância de risco para o método da LOPA. A Tabela 5.11 mostra o resultado para o Cenário 11.

**TABELA 5.11: TABELA-RESUMO DO CENÁRIO 11**

Número do Cenário	Zona de Avaliação	Título do Cenário	
<b>11</b>	<b>Sistema de CO<sub>2</sub></b>	<b>Válvula da linha de gás carbônico parcialmente aberta, que resulta no congelamento do gás carbônico na linha</b>	
	Descrição	PFD	Frequência (/ano)
<b>Conseqüência</b> (Descrição / Categoria)	Congelamento do gás carbônico na linha <b>Categoria 2</b>		
<b>Evento Iniciador</b>	Válvula da linha do gás parcialmente aberta		7,88x10 <sup>-3</sup>
<b>Frequência da Conseqüência não mitigada</b>			<b>7,88x10<sup>-3</sup></b>
<b>Camadas de Proteção Independentes</b>			
BPCS			
Intervenção Humana		1x10 <sup>-1</sup>	
SIF			
<b>Probabilidade Total de Falha na Demanda para todas IPL's</b>		<b>1x10<sup>-1</sup></b>	
<b>Frequência da Conseqüência Mitigada</b>			<b>7,88x10<sup>-4</sup></b>
<b>Critério de Tolerância de Risco é atendido? (Sim/Não): Sim. Nenhuma ação adicional</b>			
<b>Ações Necessárias para atender o Critério de Tolerância de Risco:</b>			
<b>Observações:</b>			

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da Análise de Camadas de Proteção no Sistema de Hidrogênio do Gerador Elétrico principal de uma usina nuclear indicou que esse sistema está atendendo aos critérios de tolerância de risco adotados para esse estudo. Alguns cenários não tiveram o critério atendido, mas como o Sistema de Hidrogênio é quase todo manual, uma forma de atender a esses critérios e aumentar a confiabilidade do sistema seria automatizar o sistema, fazendo com que diminua essa possibilidade de erro do operador.

Na indisponibilidade da Análise Probabilística de Segurança, a LOPA proporciona resultados rápidos, objetivos, simplificados e válidos para a quantificação do risco do sistema de hidrogênio do gerador elétrico principal de uma usina nuclear, facilitando a tomada de decisões e proporcionando certo conhecimento do impacto das medidas de proteção contra uma indisponibilidade da planta ou uma possível explosão do gerador. A LOPA pode ser útil como uma abordagem prévia, não devendo ser utilizada em substituição à APS.

A LOPA identifica operações, práticas, sistemas e processos que não têm a proteção adequada e fornece base para especificação de IPL's adicionais.

A LOPA requer dados de taxas de falha para dar suporte a metodologia. A maior dificuldade encontrada na realização deste trabalho foi a determinação das frequências de falha dos equipamentos dos eventos iniciadores, e a identificação das probabilidades de falha na demanda dos sistemas de proteção, devido à falta de informações relevantes específicas de uma usina nuclear.

Uma base de dados atualizada mostra-se extremamente necessária para a realização de análises probabilísticas de usinas nucleares. 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 e comparações com equipamentos similares para compensar a falta de conhecimento e informações. Por exemplo o fato de se considerar dados de equipamentos para unidades “offshore”.

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 do gerador elétrico. 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.

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. Uma aplicação semelhante foi feita para avaliar o risco de incêndios nas rotas de cabos de desligamento de um reator nuclear.[23]



A LOPA ainda pode ser estendida a diversas outras situações que envolvam as 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.

## REFERÊNCIAS

- [1] SUMMERS, A. E., "Introduction to Layers of Protection Analysis", *Journal of Hazardous Materials*, v. 104, pp. 163-168, 2003.
- [2] CCPS, *Layer of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 2001.
- [3] Notas de aula das disciplinas "Avaliação de Riscos de Instalações Industriais" e "Fundamentos de Análise de Segurança", 2006.
- [4] HYATT, Nigel, *Guidelines for Process Hazard Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis*, chapter 21. Richmond Hill, Ontario, published by DYADEM, 2002.
- [5] CCPS, *Guideline for Process Equipment Reliability Data*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 1986.
- [6] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 1989a.
- [7] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. 2<sup>nd</sup> edition. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 2000.

- [8] IEEE, *ANSI/IEEE Standard 500-1984: Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations*, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1984.
- [9] OREDA, *Offshore Reliability Data Handbook*. 4<sup>th</sup> edition, SINTEF Industrial Management, Trondheim, Noruega, 2002.
- [10] CCPS, *Inherently Safer Chemical Process: A Life Cycle Approach*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 1996.
- [11] SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E., *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1983.
- [12] Manual da Westinghouse – “*Hydrogen Inner Cooled Turbine Generator*”.
- [13] IEC, *International Standard IEC 61882-2001: Hazard and Operability Studies (HAZOP Studies) – Application Guide*, International Eletrotechnical Commission, 2001.
- [14] ABNT, *Norma Brasileira NBR 14009-1997: Segurança de Máquinas – Princípios para Avaliação de Riscos*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 1997.
- [15] IAEA, *Fire Protection in Nuclear Power Plants*. Safety Series No. 50 P-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1992.

- [16] LEES, Frank P., *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. 2<sup>nd</sup> edition, London: Butterworth-Heinemann, 1996.
- [17] IEC, *International Standard IEC 61508-1998: Functional Safety of Electrical / Electronic / Programmable Electronic Safety – Related Systems*. International Electrotechnical Commission, 1998.
- [18] IEC, *International Standard IEC 61511-2001: Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*. International Electrotechnical Commission, 2001.
- [19] *International Guidelines for the Fire Protection of Nuclear Power Plants*, published on behalf of the Nuclear Pool's Forum, EUA, 1997.
- [20] *International Guidelines for the Fire Protection of Nuclear Power Plants*, published on behalf of the Nuclear Pool's Forum, EUA, 2006.
- [21] ELETRONUCLEAR, *A parada de Angra 2*, 05/01/2005, consultada no site: [http://www.eletronuclear.gov.br/noticias/integra.php?id\\_noticia=171](http://www.eletronuclear.gov.br/noticias/integra.php?id_noticia=171).
- [22] ELETRONUCLEAR, *Angra 2 trocará rotor do gerador elétrico*, 25/02/2005, consultada no site: [http://www.eletronuclear.gov.br/noticias/integra.php?id\\_noticia=179](http://www.eletronuclear.gov.br/noticias/integra.php?id_noticia=179).
- [23] ALVES, C. L. *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*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.