



**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE
DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA) EM
UM TERMINAL DE REGASEIFICAÇÃO DE
GNL.**

Erika Heringer Frossard

Monografia em ENGENHARIA QUÍMICA

Orientador:

Carlos André Vaz Junior, D. Sc.

Março de 2013

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA) EM UM TERMINAL DE REGASEIFICAÇÃO DE GNL.

Erika Heringer Frossard

Monografia em Engenharia Química submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Estevão Freire, D.Sc.

Nome do membro da banca, Título

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Março de 2013

Frossard, Erika Heringer.

Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) em um Terminal de Regaseificação de GNL/ Erika Heringer Frossard. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ,2013.

xiv,66 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.
Orientador: Carlos André Vaz Junior.

1. LOPA. 2. APR. 3. Terminal de Regaseificação de GNL. 4. Monografia (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior. I. Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) em um Terminal de Regaseificação de GNL.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, o que seria de mim sem a fé que eu tenho Nele.

Agradeço aos meus pais, sempre me apoiando e me incentivando a prosseguir, pelo amor, carinho e apoio incondicional durante esses anos, sem vocês nada seria possível.

Agradeço ao Gustavo pelo carinho, dedicação, paciência e incentivo.

Agradeço ao professor e orientador Carlos André, pela dedicação, confiança, apoio e incentivo durante a realização de todo esse processo.

Agradeço pelos amigos por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço aos professores da Escola de Química, pela formação que me foi dada.

Agradeço a Universidade Federal do Rio de Janeiro que me proporcionou anos maravilhosos de aprendizado e me deu amigos eternos.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em Engenharia Química.

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMADAS DE PROTEÇÃO (LOPA) EM UM TERMINAL DE REGASEIFICAÇÃO DE GNL.

Erika Heringer Frossard

Março, 2013

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

As metodologias de análise de risco tem se tornado cada vez mais importantes para assegurar a segurança dos processos químicos. Metodologias como LOPA, HAZOP E APR tem sido aplicadas em diferentes empreendimentos para assegurar o seu nível de segurança. O foco desse trabalho é mostrar a aplicação da metodologia LOPA em um terminal de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL). A técnica LOPA ainda é pouco difundida, porém nos últimos anos, muitas empresas já estão a utilizando para a análise de risco de seus processos. É de grande importância entender a sua utilização e aplicações. A técnica LOPA deve ser aplicada juntamente com outra técnica de análise de risco. Devido às vantagens sinérgicas, comumente, e também neste estudo, a LOPA será aplicada juntamente com a técnica de análise preliminar de risco (APR). Os cenários que apresentaram risco não aceitável pela técnica APR foram avaliados pela técnica LOPA. O processo escolhido, para sua aplicação, foi um terminal de regaseificação de GNL, visto que esse processo tem se espalhado pelo mundo devido a sua crescente importância, especialmente devido a sua grande eficiência energética e ao aumento da participação do gás natural na matriz energética mundial. Com o desenvolvimento deste estudo ficou clara a importância da realização conjunta das metodologias APR-LOPA, de forma a contribuir e facilitar a avaliação dos riscos envolvidos em uma planta. Através dessas metodologias foi possível estimar a frequência, severidade e risco para cada cenário. Deste modo, a metodologia indicou se as camadas de proteção existentes estão atendendo aos critérios de tolerabilidade de risco ou se há necessidade de adicionar novas camadas de proteção.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Contextualização.....	2
1.2. Objetivo	5
1.3. Estrutura do Trabalho	6
2. Análise de Riscos	7
2.1. Definições Fundamentais.....	8
2.2. Conceito.....	9
2.3. Sequência de Análise de Riscos proposta pela CETESB.....	9
2.4. Metodologia	12
3. Métodos de Análise de Riscos	13
3.1 HAZOP	13
3.1.1. Implementação de um HAZOP.....	14
3.2 APR.....	16
4. LOPA	18
4.1. Camadas de Proteção Independentes	21
4.2. Quando utilizar LOPA	23
4.3. Como aplicar o LOPA	23
4.4. Estudos Baseados na técnica LOPA	34
5. Terminal de Regaseificação do GNL	35
5.1. Terminais de Regaseificação em Operação ou Planejados	35
5.2. Gás Natural Liquefeito (GNL).....	36
5.3. Etapas do processo de regaseificação	37
6. Estudo de Caso: Análise de Riscos	43
6.1. Principais perigos associados ao GNL.....	43
6.2 Aplicação da Metodologia APR	45
6.3 Aplicação da Metodologia LOPA.....	48
6.3.1 Desenvolvimento dos cenários.....	48
6.3.2 Identificação das frequências dos eventos iniciadores.....	49
6.3.3 Identificação das IPLs relacionadas e estimativa das PFDs.....	50
6.3.4 Determinação da frequência dos cenários.....	51
6.3.5 Determinação do risco e tomada de decisão	51
7. Conclusão	54
8. Referências bibliográficas:	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Fotos do acidente de Bhopal	4
Figura 2 - Fotos do acidente na Cidade do México em 1984.....	5
Figura 3 - Etapas para a elaboração de estudos de análise de riscos	10
Figura 4 - Camadas de Proteção	19
Figura 5 - SIS para a redução de riscos.....	22
Figura 6 - Etapas de aplicação da LOPA	23
Figura 7 - Etapas da LOPA.....	33
Figura 8 - Navio Tanque GNL.....	37
Figura 9 - Braços articulados de descarregamento	38
Figura 10 - Tanque de armazenamento tipo <i>Full Containment</i>	39
Figura 11 – Tanque de armazenamento tipo Membrana.....	39
Figura 12 - Oper Rack Vaporiser (ORV).....	41
Figura 13 - Submerged Combustion Vaporizer (SCV).....	41
Figura 14 - Processo de regaseificação	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Acidentes Químicos com mais de 20 mortes entre 1920-1990.....	3
Tabela 2 - Palavras Guias	15
Tabela 3 - Tabela exemplo HAZOP	15
Tabela 4 - Tabela exemplo APR.....	17
Tabela 5 – SIL.....	21
Tabela 6 - Eventos Iniciadores.....	25
Tabela 7 – IPL passivas e suas respectivas PFDs	28
Tabela 8 - IPL Ativas e suas respectivas PFD	28
Tabela 9 - Matriz de Riscos	31
Tabela 10 - Classificação da Frequência.....	31
Tabela 11 - Classificação da severidade	32
Tabela 12 - Situação atual dos terminais de regaseificação.....	35
Tabela 13 - Lista de Sistemas Considerados.....	43
Tabela 14 - Aplicação da técnica APR na etapa de descarregamento do terminal de regaseificação. 45	
Tabela 15 - Aplicação da técnica APR na etapa de armazenamento do terminal de regaseificação .. 46	
Tabela 16 - Aplicação da técnica APR na etapa de vaporização do terminal de regaseificação	47
Tabela 17 - Cenários Montados	49
Tabela 18 - Frequência do evento iniciador.....	49
Tabela 19 - Probabilidades de Falha	50
Tabela 20 - Frequência dos Cenários.....	51

NOMENCLATURA

APR	Análise Preliminar de Riscos
BOG	<i>Boil Off Gas</i>
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CIPA	Comissão Interna de Prevenção de Acidentes
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> - Agência de proteção ao meio ambiente
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> - Estudo de perigo e operabilidade
IPL	<i>Independent Protection Layer</i> - Camada de proteção independente
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> - Análise de Camadas de Proteção
ORV	Open Rack Vaporizer
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PFD	Probabilidade de Falha na Demanda
PFD_{avg}	Probabilidade Média de Falha na Demanda
SCV	<i>Submerged Combustion Vaporizer</i>
SESMT	Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho
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

Modernas indústrias e complexos químicos e petroquímicos, apresentam diversas plantas operando simultaneamente e de modo contínuo. Em cada planta, diferentes operações unitárias ocorrem de forma integrada, visando obter os produtos de interesse de forma otimizada. Embora seja necessário obter a maior quantidade possível de produto no menor intervalo de tempo e com os menores gastos, alguns fatores precisam ser observados. Diversos compostos químicos apresentam elevada toxicidade, corrosividade, inflamabilidade, e inúmeras operações unitárias empregam elevadas temperaturas e pressões. Estas características precisam ser consideradas para garantir uma operação industrial segura e, por tanto, sustentável ao longo do processo (ABIQUIM 1992).

Deste modo, é preciso estar atento à segurança de cada etapa do processo. O gerenciamento da segurança de processos deve ser efetuado por profissionais especializados não apenas nos conceitos de segurança, mas também no processo em questão. No entanto, segundo Mendonça (2011) diversas empresas, em especial as de menor porte, ainda desconsideram, desconhecem, subestimam, ou simplesmente não analisam os riscos de seus processos operacionais.

Visando evitar que as empresas negligenciem a segurança de seus processos, diversos países têm adotado medidas que obrigam as corporações a implementar ou melhorar seus programas de gerenciamento de riscos. Pode-se citar, por exemplo, os regulamentos para a gestão de segurança de processos e gestão de riscos estabelecidos pela OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) e pela EPA (*Environmental Protection Agency*) (SOUZA, 1995).

No caso dos EUA, a OSHA publicou em maio do ano de 1992 a norma denominada *Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals* (YOUNG *et al*, 2006). É uma norma que obriga que as empresas que trabalham com substâncias perigosas, desenvolvam e implementem sistemas de gerenciamento de segurança de seus processos industriais. O sistema deve ser mantido durante toda a vida útil da unidade, sendo orientado fundamentalmente à proteção dos seus trabalhadores.

A norma da OSHA destaca ainda a importância da participação e do treinamento de funcionários. Ela estimula que as empresas criem programas que incluam a participação dos funcionários na identificação e conhecimento sobre os riscos presentes no ambiente de trabalho, assim como na investigação de acidentes. Com estas medidas, a OSHA integra o gerenciamento de riscos e o treinamento de pessoal em busca da melhoria contínua da segurança de processos e da prevenção de acidentes industriais.

No Brasil existe a figura legalmente constituída da Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA), um instrumento que os trabalhadores dispõem para tratar da prevenção de acidentes, das condições do ambiente de trabalho e de fatores que afetam sua saúde e segurança. A CIPA é regulamentada pela Norma Regulamentadora 5 (NR-5) do Ministério do Trabalho e Emprego. A CIPA tem como objetivo a prevenção de acidentes e doenças decorrentes do trabalho, de modo a tornar compatíveis as tarefas desenvolvidas no ambiente

de trabalho, com a preservação da vida e a promoção da saúde do trabalhador. A CIPA é composta por representantes dos empregados de qualquer setor da empresa, eleitos para compô-la, e representantes da gerência (MACHADO, 2009).

Além da NR-5, o Ministério do Trabalho e Emprego dispõe de uma série de outras Normas Regulamentadoras. Essas estabelecem procedimentos, arranjos ou avaliações que devem ser adotados. As NRs são de observância obrigatória pelas empresas que contam com empregados no regime da CLT (MACHADO, 2009).

Além da CIPA, as NRs estabelecem ainda a existência do SESMT, ou Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho. Ao contrário da CIPA, aberta a participação de empregados com qualquer formação, o SESMT é composto por uma equipe de profissionais especializados: médico do trabalho, enfermeiro do trabalho, engenheiro e técnico de segurança do trabalho. O SESMT é direcionado à proteção e promoção da saúde e bem-estar de todos os funcionários.

Embora a CIPA e o SESMT estejam presentes em todas as grandes instalações industriais, ainda observa-se ausência de consciência sobre os riscos operacionais, além, de falta de treinamento adequado de funcionários, em algumas corporações. Logo, é cada vez mais importante estudar a melhor forma de assegurar as condições de segurança e minimização de riscos em processos industriais.

1.1. Contextualização

Com a ocorrência de diversos acidentes industriais, inúmeros deles envolvendo o setor químico, a população mobilizou-se para cobrar ações cada vez mais efetivas por parte dos governos e das próprias empresas, visando tornar as plantas mais seguras. Na Tabela 1, podem-se ver os principais acidentes envolvendo o setor químico e petroquímico, ocorridos entre 1920 e 1990 (GLICKMAN et al. (1992); KLERTZ (1991); FABIANI e THEYS (1987)):

Tabela 1- Acidentes Químicos com mais de 20 mortes entre 1920-1990
 Fontes: GLICKMAN et al. (1992); KLERTZ (1991); FABIANI e THEYS (1987)).

Ano	País	Tipo de Acidente	Substância	Mortes
1921	Alemanha	Explosão de Fábrica de Anilina	Sulfato de Nitrato e Amônia	>500
1926	EUA	Explosão em depósito de munição	Trinitrotoluol	21
1926	EUA	Escapamento de tanque	Cloro	40
1930	Bélgica	Gases tóxicos na atmosfera	Ácido fluorídrico, ácido sulfúrico e ióxido de enxofre	63
1933	Alemanha	Explosão numa fundição	Gás de coqueria	65
1934	Hong Kong	Incêndio em gasômetro	Gás	42
1935	Alemanha	Explosão em uma fábrica de explosivos	Dinitrotoulol, nitroglicerina e trinitrotoluol	82
1939	Romênia	Escapamento em fábrica química	Cloro	60
1942	Bélgica	Explosão	Nitrato de amônia	>100
1944	EUA	Explosão de nuvem de gás	GLN	130
1948	Alemanha	Explosão de carro tanque numa fábrica química	Dimetil éter	209
1950	México	Escapamento em fábrica	Sulfureto de hidrogênio	22
1953	Turquia	Explosão em refinaria	Líquidos inflamáveis	26
1954	Brasil	Explosão em tanque de depósito	Líquidos inflamáveis	20
1958	França	Explosão em instalação industrial	Líquidos inflamáveis	20
1961	Espanha	Explosão em fábrica química	Desconhecida	23
1966	França	Explosão em refinaria	Propano/Butano	21
1968	Japão	Contaminação de água por fundição	Cádmio	100
1970	Indonésia	Incêndio em refinaria	Líquidos inflamáveis	50
1972	EUA	Explosão de uma planta de coque	Propano	21
1972	Brasil (RJ)	Explosão em refinaria	Líquidos inflamáveis	39
1972	Brasil (SP)	Explosão em refinaria	Propano/Butano	38
1973	EUA	Incêndio em tanque de gás liquefeito	GLN	40
1974	Inglaterra	Escapamento e explosão numa fábrica química	Ciclohexano	28
1977	Colômbia	Escapamento em uma fábrica de fertilizantes	Amônia, nitrato de amônia e carbamato	30
1978	México	Explosão em <i>pipeline</i>	Gás	58
1980	Índia	Explosão em 2 fábricas	Explosivos	40-80
1980	EUA	Incêndio em refinaria	Líquidos inflamáveis	51
1982	Venezuela	Explosão em instalação industrial	Líquidos inflamáveis	145
1984	Brasil	Explosão em <i>pipeline</i>	Gasolina	508
1984	México	Explosão em refinaria	GLP	503
1984	Índia	Escapamento em indústria química	Metilisocianato	>2500
1989	EUA	Explosão em indústria química	Gás inflamável	22

Dentre os acidentes listados alguns foram extremamente significativos, seja porque causaram a morte de diversas pessoas, seja pelos vastos danos ao meio ambiente. Segue abaixo uma rápida descrição de alguns acidentes mais significativos (CETESB,2003):

O acidente ocorrido em Flixborough, na Inglaterra, em 1974, foi devido entre outros fatores a um procedimento de manutenção indevido, que veio a provocar a ruptura na tubulação de ligação entre dois reatores em série. A ruptura gerou um grande vazamento de ciclohexano quente. A substância liberada formou rapidamente uma enorme nuvem de vapor inflamável, que explodiu causando a morte de 28 pessoas (CROWL E LOUVAR, 2011). Além destes, outros 36 funcionários e mais 53 pessoas externas a planta sofreram lesões graves. A planta foi integralmente destruída pela explosão, e os danos materiais se estenderam por um raio de 13 quilômetros. Esse acidente, de fato, repercutiu não apenas por todo o setor químico, mas também em outros setores industriais e suscitou um pensamento sobre a importância da segurança (PASCON,1999).

Outro acidente de grandes repercussões foi o desastre químico em Bhopal na Índia em 1984. Neste, 40 toneladas de gases letais vazaram de uma fábrica de defensivos agrícolas. Em apenas três dias após o desastre, oito mil pessoas já haviam morrido devido à exposição aos gases tóxicos liberados. Dentre os compostos liberados para a atmosfera estavam o isocianato de metila e hidrocianeto. As consequências deste acidente ainda se podem ver nos dias de hoje, uma vez que em torno de 150.000 sobreviventes hoje vivem com doenças crônicas decorrentes daquele evento (GREENPEACE). Investigações mostraram que os sistemas de segurança presentes na unidade eram precários, e inclusive alguns estavam desligados. Até os dias atuais este evento é considerado um dos maiores acidentes químicos da história. Na Figura 1 são apresentadas cenas da fábrica após o acidente ocorrido (CROWL E LOUVAR, 2011).



Figura 1- Fotos do acidente de Bhopal
Fonte: CORREIA,2009

Também em 1984, na Cidade do México, ocorreu uma explosão de uma nuvem de gás liquefeito de petróleo (GLP), seguida de uma série de explosões na base de armazenamento e distribuição de GLP localizada em ambiente urbano. O desastre começou com o vazamento de gás devido à ruptura de uma tubulação que o transportava dos tanques esféricos para reservatórios cilíndricos de menor porte. A sala de controle foi capaz de registrar uma queda de pressão em suas instalações imediatamente após o início do vazamento, porém não foi capaz de identificar de forma rápida a causa dessa perturbação. Alguns minutos após esse registro ocorreu então a formação de uma imensa nuvem de gás inflamável, que acabou sendo levada por correntes de vento até encontrar uma fonte de ignição e explodir. Devido à

localização dos reservatórios em ambiente urbano, esse acidente deixou mais de 6000 pessoas feridas e 650 mortos, além da total destruição da base (Figura 2) (CETESB,2008).



Figura 2 - Fotos do acidente na Cidade do México em 1984
Fonte: CORREIA, 2009

No Brasil, destaca-se o acidente ocorrido na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), no Rio de Janeiro. No dia 30 de março de 1972 ocorreram inúmeras explosões que destruíram o parque de tancagem de gás liquefeito de petróleo (GLP) desta refinaria. O acidente ocorreu durante operação de drenagem da água contida em uma das esferas (COSTA, 2011). Para iniciar a drenagem o operador abriu a válvula localizada no fundo do vaso, para promover a liberação da água. Porém, a mesma deveria ser fechada ao término da drenagem, evitando que o GLP começasse a sair. Porém isso não ocorreu. O vazamento de GLP para atmosfera promoveu rápida redução da temperatura no local, congelando a válvula. Assim, o operador foi incapaz de impedir o vazamento contínuo do GLP. A nuvem inflamável formada sofreu ignição, iniciando um incêndio que durou inúmeras horas, resultando na explosão dos vasos. No total foram 37 mortos e 53 feridos (COSTA, 2011).

Esses acidentes são exemplos da importância e da necessidade de implementar sistemas de gerenciamento de riscos, de possuir profissionais capacitados em segurança de processos envolvidos com a operação, e de contar com um sistema de segurança eficiente e moderno que seja capaz de assegurar uma operação dentro de padrões aceitáveis de risco.

1.2. Objetivo

Esse trabalho tem o objetivo de analisar métodos de identificação de perigos tradicionalmente empregados na indústria química, tais como HAZOP e Análise Preliminar de Riscos (APR), e como novos métodos ainda pouco difundidos, como o LOPA, podem vir a contribuir.

O método LOPA será então empregado em um processo de regaseificação de gás natural liquefeito para uma breve exemplificação da sua aplicação.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está assim estruturado:

O Capítulo 2 descreve a importância da análise de riscos e também apresenta a metodologia aplicada nesse trabalho, enquanto o Capítulo 3 apresenta dois métodos importantes de análise de risco, o HAZOP e o APR.

O Capítulo 4 apresenta uma avaliação detalhada sobre a técnica LOPA, as etapas para sua aplicação e menciona alguns estudos que abordaram essa técnica. O Capítulo 5 descreve o processo de regaseificação do GNL, que será empregado como estudo de caso da metodologia de análise de riscos.

Finalmente o Capítulo 6 apresenta o estudo de caso, bem como a aplicação da técnica APR e LOPA ao processo de regaseificação do GNL. O Capítulo 7 consiste nas conclusões sobre o trabalho realizado.

2. Análise de Riscos

É importante destacar que todo processo industrial em geral, e químico em particular, esta sujeito a riscos. Estes podem ou não se concretizar em acidentes reais ao longo da vida útil da planta. Assim, todo projeto antes de entrar em execução, deve ser submetido a uma análise de riscos.

A análise de riscos consiste em um estudo de riscos em uma instalação industrial, baseado em técnicas de identificação de perigos, estimativa de frequências e consequências, análise de vulnerabilidades e, finalmente, na estimativa do risco. Emprega-se assim com mais frequência o conceito de risco como sendo o produto da probabilidade de ocorrência de um cenário pelas consequências que este provoca.

O principal objetivo da análise de riscos é promover métodos capazes de fornecer elementos concretos que fundamentem um processo decisório de redução dos riscos presentes em uma determinada instalação industrial (CETESB, 2003).

Segundo Souza (1995), a análise de riscos tem o objetivo de responder algumas perguntas relativas à segurança da instalação industrial a ser analisada. A primeira delas é um questionamento em relação aos riscos presentes na planta. Essa questão pode ser respondida através da aplicação de uma ou mais técnicas atualmente existentes para a identificação de eventos indesejados. A metodologia de Análise Preliminar de Riscos (APR) permite levantar inúmeros cenários, de forma relativamente fácil. Por outro lado, abordagens por Árvores de Falhas ou de Eventos, por outro lado, detalham de forma mais intensa cada um dos cenários. As Árvores apresentam não apenas o evento-iniciador, mas também cada um dos fatores contribuintes. Torna-se assim possível entender como diferentes modos de falha contribuem para os cenários de risco.

A segunda questão diz respeito a probabilidade da ocorrência de um determinado cenário. Esta é calculada através de combinações das taxas de falhas de equipamentos envolvidos, erro humano, etc. Ao final espera-se obter a frequência global de ocorrência do evento indesejável (SOUZA,1995).

Finalmente, a terceira questão é em relação aos efeitos e as consequências desses cenários. Modelos matemáticos que estimam a consequência de acidentes podem ser usados, avaliando a dispersão de nuvens tóxicas, liberação de calor, sobrepressão gerada, etc. Juntamente com esses modelos, são usados também modelos de efeitos sobre construções e seres humanos. Assim avalia-se a resposta de uma população média a níveis de exposição tóxica, sobrepressões, etc.

Estabelecidos os parâmetros de frequência e de severidade, o risco fica determinado.

Para Souza (1995), a última questão, porém não menos relevante, trata de como reduzir, minimizar ou mesmo eliminar os cenários de riscos levantados, ou seja, do gerenciamento dos riscos. O simples diagnóstico sem o desenvolvimento de uma política e de atitudes adequadas não resulta em melhoria na condição operacional.

2.1. Definições Fundamentais

A palavra “risco” é muito confundida com “perigo”, sendo então importante a correta definição dos dois termos. “Perigo” é uma propriedade ou característica com potencial para provocar danos, seja em termos de lesões a seres humanos, sejam danos a propriedades e ao meio ambiente (MUNIZ, 2011). Por outro lado, o conceito da palavra “risco” se refere a relação existente entre a probabilidade que existe de um evento ocorrer e os efeitos esperados para esse caso (MUNIZ, 2011).

Outra definição importante para se entender a análise de riscos e as políticas preventivas decorrentes é a de “acidentes” e “incidentes”. No Brasil, segundo o artigo 2º da Lei nº 6.367/76 e Decreto nº 70.037/76, o conceito de “acidente de trabalho” é definido como sendo:

“aquele que ocorre pelo exercício do trabalho a serviço da empresa, provocando lesão corporal, funcional ou doenças que cause morte, ou perda, ou redução permanente ou temporária da capacidade para o trabalho.”

Enquanto “incidente”, segundo a OHSAS 18001:2004 é:

“o evento relacionado ao trabalho no qual ocorreu ou poderia ter ocorrido lesão, doença ou morte.”

Ou seja, são todos os eventos que tenham um potencial de levar a um acidente ou que originam, de fato, um acidente (MUNIZ, 2011). Observa-se o caráter preventivista da definição da OSHA, buscando considerar mesmo eventos sem vítimas. Em contraste tem-se a definição legal e pouco preventivista adotada no Brasil. Somente pode ser classificado como acidente de trabalho aquele evento que gera uma ou mais vítimas. Deste modo, a explosão de um tanque em um parque de tancagem ou um incêndio em poça apenas são considerados acidentes quando geram vítimas entre os empregados. A não existência de vítimas, simplesmente devido ao fator “sorte”, por exemplo, faz com que essas ocorrências não sejam consideradas acidentes de trabalho, não entrando nas estatísticas oficiais.

Por fim, surge o termo “segurança”, que para muitos significa a “isenção de riscos”. Porém, em termos práticos, é impossível que um sistema em operação consiga atingir um grau de “risco zero”. Principalmente, nos ramos químicos e petroquímicos, o risco, por menor que seja, estará presente na instalação industrial. Desta forma, segurança é entendida por De Cicco e Fantazzini como “um compromisso acerca de uma relativa proteção de exposição a riscos”. No Brasil, a CETESB publicou um detalhado Manual de Análise de Riscos, onde discute conceitos como “risco tolerável”, o que pode ser entendido como nível mínimo de segurança que deve ser exigido.

2.2. Conceito

A análise de riscos em seu caráter prevencionista compreende, então, todas as situações que representam fontes potenciais de perigo, tendo como intuito avaliar o risco relacionado, evitando que suas consequências ocorram, ou reduzindo a probabilidade do evento ocorrer. Através deste tipo de estudo é possível estabelecer procedimentos corretos para realização das tarefas, obter um melhor design de equipamentos e processos, modificar rotas químicas ou operações unitárias empregadas, etc.

Devido a sua natureza, a prática de análise de riscos, normalmente, é realizada por um grupo multidisciplinar, formado por engenheiros, técnicos, operadores e especialistas. Esta equipe avalia determinado sistema com base em metodologias bem definidas, visando identificar cenários de riscos e pontos vulneráveis. Para Aguiar (2010), embora seja correto afirmar que um grupo maior e mais diversificado fornece resultados mais amplos e detalhados, os gastos tornam-se também mais elevados, a logística fica complexa e o foco do estudo precisa ser constantemente mantido.

2.3. Sequência de Análise de Riscos proposta pela CETESB

De forma a orientar os diferentes estudos de risco que eram efetuados no Brasil, e em especial no estado de São Paulo, em 1990 foi lançado o primeiro “Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos” pela companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB,2003). Ao longo dos anos, esse manual foi reeditado com o objetivo de aperfeiçoar o processo de tomada de decisão quanto à necessidade de elaboração de análises de riscos de empreendimentos potencialmente geradores de grandes acidentes, bem como orientar essa elaboração, e na tomada de decisão quanto à tolerabilidade do risco estimado.

Muito semelhante a cinco perguntas definidas por Souza (1995) e detalhadas anteriormente, a Cetesb (2003) divide a elaboração do estudo de análise de riscos em seis etapas:

- Caracterização do empreendimento e da região;
- Identificação de perigos;
- Estimativa das consequências;
- Estimativa de frequências;
- Estimativa e avaliação de riscos;
- Gerenciamento de riscos.

A Figura 3 apresenta o desenvolvimento dessas etapas.

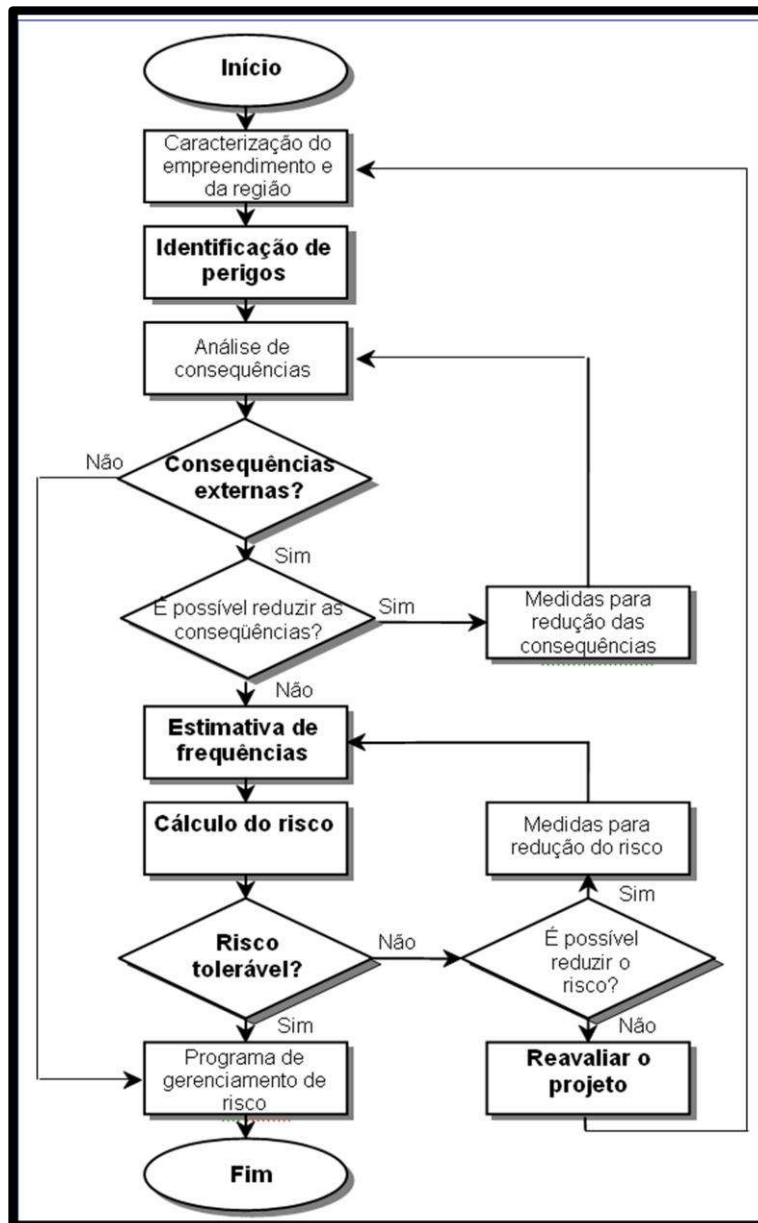


Figura 3 - Etapas para a elaboração de estudos de análise de riscos
 Fonte: CETESB, 2003

Conforme a Figura 3, a primeira etapa para a realização do estudo de análise de riscos é a compilação de dados relativos às características do empreendimento, necessários para o desenvolvimento do trabalho. Esses dados são de especial importância para que seja possível caracterizar o processo, contemplando seus aspectos construtivos e operacionais, além das peculiaridades da região onde este se encontra ou será instalado. A equipe envolvida deve ter completa compreensão do processo que está sendo analisado. Quando a análise de riscos é executada ainda na etapa de projeto, ou seja, antes da planta estar construída e operacional, muitas informações podem ainda não estar disponíveis. Assim, algumas técnicas de análise mais complexas mostram-se inadequadas.

O segundo passo indicado na Figura 3, tal qual o primeiro questionamento de Souza (1995), trata da identificação de perigos. Consiste na aplicação de técnicas estruturadas para a identificação de todos os possíveis cenários de interesse, e também na definição precisa dos

cenários acidentais a serem estudados de forma detalhada. As técnicas disponíveis para a realização desta etapa são muitas. Devem-se utilizar as metodologias mais adequadas para o caso em estudo, dependendo do empreendimento que será analisado e do volume de informações disponíveis.

Na sequência, a estimativa da consequência de cada cenário pode ser feita por modelos complexos matemáticos que efetivamente representam o cenário em estudo, em uma abordagem que se aproxima da análise quantitativa de riscos. Ou, de uma maneira mais simples, onde as consequências podem ser analisadas pela própria observação, experiência ou conhecimento da equipe, aproximando-se mais da análise qualitativa de riscos.

Sendo risco uma combinação de severidade e frequência, a etapa seguinte consiste na determinação, quantitativa ou qualitativa, da probabilidade de ocorrência de determinada falha ou combinação de falhas. Assim, a frequência de ocorrência dos cenários acidentais identificados deve ser estimada. Em alguns estudos de análise de riscos, as frequências de ocorrência dos cenários acidentais podem ser estimadas através de registros históricos de referências bibliográficas, desde que, efetivamente, tenham representatividade para o caso em estudo. Também deve se avaliar as probabilidades de erros humanos que possam contribuir para a ocorrência dos cenários acidentais.

A estimativa e avaliação de riscos dependem de uma série de variáveis, por vezes pouco conhecidas e cujos resultados podem apresentar diferentes níveis de incerteza. Isto decorre principalmente do fato de não ser possível determinar todos os riscos existentes ou possíveis de ocorrer em uma instalação, e também da escassez de informações neste campo. Com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores do estudo, pode se estimar, com algum grau de incerteza, o risco de um empreendimento.

Tanto para a CETESB (2003) quanto para Souza (1995), a última etapa é o gerenciamento de riscos. Este consiste nas recomendações e medidas resultantes do estudo de análise e avaliação de riscos. As recomendações visam a redução das frequências e consequências de eventuais acidentes.

Uma instalação industrial em geral, e em especial aquela que possua substâncias ou processos perigosos, deve ser operada e mantida, ao longo de sua vida útil, dentro de padrões de risco considerados toleráveis, seja pela empresa, pelo órgão governamental competente, pela população, pelos acionistas, pelos clientes, etc. É importante que sejam considerados os aspectos críticos identificados no estudo de análise de riscos, de forma que sejam priorizadas as ações de gerenciamento dos riscos, a partir de critérios estabelecidos com base nos cenários acidentais de maior relevância.

Por fim, é importante perceber, então, a diferença entre “análise de riscos” e “gerenciamento de riscos”. O primeiro é todo procedimento que visa à avaliação de riscos (KERZNER, 1998), enquanto o segundo utiliza a análise para definir estratégias a fim de reduzir (minimizar, gerenciar) os riscos envolvidos nos processos (KERZNER, 1998).

Nesse contexto, e de acordo com os dados de acidentes na indústria química e petroquímica, percebe-se a importância de investir em gerenciamento e análise de riscos. Existe um grande número de técnicas de análise de riscos que podem ser aplicadas nos mais diversos processos.

2.4. Metodologia

No atual trabalho, escolheu-se a técnica de análise de riscos APR (Análise Preliminar de Risco) para preceder a aplicação da técnica LOPA, devido às vantagens que serão apresentadas no Capítulo 4. Assim, a APR foi o ponto inicial para avaliação das camadas de proteção do processo para cada um dos respectivos cenários. Ela define a severidade, frequência e risco de cada cenário.

Em seguida, o cenário para a Análise de Camada de Proteção (LOPA) foi montado pelo par causa-consequência levantado no APR. Apenas os cenários que apresentaram um risco não aceitável foram analisados pelo LOPA.

Assim, a LOPA foi capaz de certificar o risco do cenário e também de indicar se há necessidade de adicionar novas camadas de proteção. É importante destacar que o foco desse trabalho é a aplicação da técnica LOPA, logo, a aplicação da técnica APR será vista rapidamente.

Os métodos de análise de riscos de maior interesse e aplicabilidade nesse trabalho são discutidos nos próximos Capítulos.

3. Métodos de Análise de Riscos

Existem diversas metodologias reconhecidamente eficientes e de amplo uso para a identificação de perigos e gerenciamento de riscos. Essas técnicas podem ser classificadas em dois grandes grupos: “quantitativas” e “qualitativas”. Alguns autores definem ainda a classe “semi-quantitativa” para referenciar algumas técnicas em particular (CROWL e LOUVAR, 2011).

A escolha da técnica mais adequada vai depender de inúmeros fatores, tais como o tipo de projeto que está sendo analisado, sua localização geográfica, nível de detalhamento desejado na análise, e dos recursos disponíveis.

Normalmente, se aplicam as técnicas qualitativas para uma análise inicial (CETESB, 2012), onde se busca hierarquizar os riscos presentes, além de compreender sua relevância. Porém, quando dados numéricos mais exatos são imprescindíveis, se aplicam mais adequadamente as técnicas quantitativas (CETESB, 2012).

Este capítulo foca-se em descrever dois dos métodos qualitativos de maior emprego na atualidade: HAZOP e APR. O método LOPA, cuja aplicação vem ganhando espaço nos últimos anos será detalhado no capítulo seguinte.

3.1 HAZOP

O HAZOP (Estudo de perigo e operabilidade) é um método qualitativo desenvolvido na década de 60, sendo um dos mais utilizados atualmente (CROWL e LOUVAR, 2011). Ele visa identificar os problemas de operabilidade de uma instalação de processo, revisando metodicamente o projeto da unidade ou de toda a planta. Essa metodologia é baseada em um procedimento que gera perguntas de maneira estruturada através do uso apropriadas de um conjunto de “palavras guias” aplicadas em pontos críticos (denominados “nós”) do processo a ser estudado (AGUIAR).

As “palavras guias” são usadas para investigar as causas e consequências de possíveis “desvios” das condições normais de operação. O HAZOP colabora ainda para mostrar possíveis ações que possam ser adotadas para evitar que tais desvios ocorram. A aplicação sistemática das “palavras guias” em cada um dos “nós” guia o estudo. Trata-se de metodologia detalhada e exaustiva, muitas vezes demandando esforço exagerado quando diante de plantas simples.

Finalmente, as “causas” são os motivos pelos quais os desvios ocorrem. Uma vez que um desvio possua uma causa crível, ele pode ser tratado como um desvio significativo e analisado adequadamente. Estas causas podem ter origens diversas, tais como serem originadas de falhas do sistema de controle, erros de projeto, erros de operação, um estado de operação não previsto (por exemplo, mudança na composição), interrupções externas (por exemplo, perda de energia elétrica ou utilidades quentes ou frias), etc. Causas não críveis podem ser um terremoto em regiões onde tradicionalmente não ocorrem, atentados terroristas,

quedas de aviões, entre outros, embora essa classificação seja função da avaliação da instalação industrial específica e de uma série de fatores internos e externos a planta (SAUER, 2000).

Por sua vez, as “consequências” são os resultados decorrentes de um desvio da intenção de operação em um determinado nó. As consequências podem ser, por exemplo, perdas de produção (interrupção de negócios, atividades), ferimentos em pessoas, contaminação ambiental, efeitos nocivos à saúde, dificuldades operacionais, manutenção excessiva, liberação de materiais tóxicos, etc. Algumas consequências podem mostrar-se insignificantes com relação aos objetivos do estudo, sendo geralmente ignoradas (SAUER, 2000).

Do mesmo modo que qualquer análise de riscos, é importante destacar que um HAZOP bem sucedido requer uma equipe bem preparada, com um profundo conhecimento da planta do processo e de todos os equipamentos envolvidos.

3.1.1. Implementação de um HAZOP

O primeiro passo para a sua execução é a divisão do sistema em subsistemas, a fim de facilitar a realização da análise. A análise de toda a planta de uma complexa refinaria seria muito complexa e provavelmente infrutífera. A separação por unidades vem apresentando melhores resultados.

Depois é necessário que um ou mais pontos do subsistema a ser analisado sejam escolhidos. Estes pontos são então denominados “nós”. Os “Nós” são pontos do processo, localizados através dos fluxogramas da planta, podendo ser trechos de uma tubulação, reatores, vasos, etc. A definição e posicionamento dos nós a serem estudados é uma etapa de enorme importância para o êxito do HAZOP. Um número excessivo de nós tende a deixar a análise lenta e cansativa, tendendo a perda de foco e não necessariamente contribuindo para um estudo mais detalhado ou correto. Por outro lado, um número insuficiente de nós pode aumentar por demais a complexidade da análise, permitindo que cenários importantes não sejam levantados ou corretamente avaliados. A escolha e posicionamento dos nós são atualmente muito mais uma função da experiência da equipe executora do que baseada em critérios exatos e científicos.

Após a definição dos nós, deve-se listar todos os parâmetros relevantes para cada nó. Os parâmetros de processo são os fatores ou componentes da intenção de operação, ou seja, são as variáveis físicas do processo, como nível, vazão, pressão, temperatura, ocorrência de reação química, precipitação, etc.

Em seguida, as palavras guias são usadas, verificando todos os desvios possíveis de ocorrer em cada nó. As palavras-guias mais usadas podem ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Palavras Guias
 Fonte: Adaptado SOUZA, 1995

PALAVRAS GUIAS	
<i>Palavras</i>	<i>Definição</i>
Nenhum	Negação da intenção de projeto no parâmetro de processo.
Mais	Acréscimo quantitativo no parâmetro de processo.
Menos	Decréscimo quantitativo no parâmetro de processo.
Reverso	Parâmetro em sentido oposto.
Em parte	Decréscimo <i>qualitativo</i> no parâmetro de processo
Também	Acréscimo <i>qualitativo</i> no parâmetro de processo
Outro	Substituição do parâmetro
Antes	Etapas de um processo sequencial iniciada antes do tempo
Depois	Etapas de um processo sequencial iniciada depois do tempo

Depois de analisados os desvios possíveis de ocorrer em cada nó, deve-se estudar as possíveis causas que geram esses desvios e quais serão as consequências. É importante levantar perguntas e discussões sobre as causas e os riscos que cada um dos cenários pode ocasionar.

Por último, deve-se estudar se há alguma ação que possa ser executada para eliminar a causa do desvio ou minimizar as suas consequências. É necessário fazer recomendações simples, úteis e específicas (AGUIAR).

A Tabela 3 apresenta um exemplo de uma aplicação dessa técnica HAZOP. O parâmetro que está sendo avaliado na tabela é a vazão. As palavras guias utilizadas para verificar todos os desvios possíveis de ocorrer da vazão foram: maior, menor ou nenhuma vazão. Elas se encontram na segunda coluna da tabela.

Na terceira e quarta coluna, a Tabela 3 apresenta as possíveis causas e consequências para esses desvios. A coluna seguinte apresenta qual seria a proteção ou ação para evitar a causa do respectivo desvio e a última coluna apresenta as recomendações que devem ser feitas.

Tabela 3 - Tabela exemplo HAZOP

Parâmetro	Palavra-Guia	Causa	Consequência	Proteção/Deteccção	Recomendações
Vazão	Maior	Rompimento do Duto	Vazamento do líquido	Instalação de válvula de bloqueio	
	Nenhuma	Bloqueio Indevido	Perda de produção	Alarme de nível baixo	
	Menor	Restrição na linha	Redução de suprimento	Alarme de nível baixo	

Para Aguiar, a melhor ocasião para a realização de um estudo HAZOP é a fase em que o projeto se encontra razoavelmente consolidado, de preferência, logo após o término do P&D. Isso ocorre, pois, neste ponto ainda é possível alterar o projeto sem grandes despesas, como ocorreria se o HAZOP fosse aplicado apenas após a planta estar efetivamente construída. Por outro lado, aplicar tal metodologia muito no início do projeto, antes de todas as condições serem efetivamente conhecidas, pode provocar imprecisões ou erros. Assim, do ponto de vista de custos, o HAZOP é satisfatório quando aplicado a novas plantas, no momento em que o projeto está estável e documentado, ou para plantas existentes quando é planejado um remodelamento (SAUER, 2000).

Algumas das qualidades do HAZOP que têm justificado a sua escolha como ferramenta de análise são a simplicidade, versatilidade na aplicação e a uniformidade de abordagem que o método proporciona aos diferentes tipos de instalações, o que facilita o processo de revisão da análise e diminui os custos da sua realização (MCGUISAN & RICHARDS, 1991).

3.2 APR

A Análise Preliminar de Riscos (APR) é uma análise inicial (preliminar), podendo ser realizada antes de um estudo mais completo. Do mesmo modo que o HAZOP, ela também é uma técnica qualitativa, e visa identificar os principais perigos e cenários de risco de uma unidade.

A APR é própria para ser empregada na fase inicial de concepção e desenvolvimento das plantas de processo, na determinação dos riscos que possam existir, economizando tempo e gastos em replanejamentos. Sendo “preliminar”, ela não exclui a necessidade de outros tipos de avaliações de riscos, ao contrário, é uma precursora de outras análises, dentre elas o LOPA (AMORIN).

APR pode ser realizada de inúmeros modos (SAUER, 2000) sendo o mais comum a classificação dos riscos identificados em relação à frequência e à severidade. O resultado de uma APR é apresentado em um formato padrão tabular onde todas as informações são dispostas em uma planilha. A Tabela 4 apresenta um exemplo de construção dessa planilha.

A tabela de elaboração de um APR normalmente é constituída de sete colunas, podendo conter mais, dependendo do critério estabelecido pela equipe. A primeira coluna deve conter os perigos identificados para a análise em estudos. Na segunda coluna, tem se as causas, uma ou mais, que promovem o cenário. Na próxima coluna tem se os possíveis efeitos danosos que cada cenário pode gerar, ou seja, as consequências.

A quarta coluna apresenta os modos disponíveis na instalação para a detecção do problema apontado na primeira coluna. Os modos de detecção podem ser desde complexos sensores eletrônicos instalados na planta, até a simples observação visual ou percepção sonora, frequente no caso de vazamentos, por exemplo. As duas próximas colunas fornecem uma indicação qualitativa da frequência e severidade esperada de ocorrência para cada um dos

cenários identificados. Frequentemente aplicam-se classes predefinidas de frequências e severidades. Essas classes serão discutidas posteriormente. Novamente, a partir da definição da severidade e frequência, e aplicando a definição de risco como sendo o produto desses dois índices, pode-se definir o grau de risco presente em cada cenário levantado.

Finalmente, na última coluna são apresentadas as recomendações que devem ser tomadas, seja para diminuir a frequência ou severidade do acidente, seja para eliminar o perigo ou para detectá-lo com mais eficiência.

Tabela 4 - Tabela exemplo APR
 Fonte: Adaptado de AGUIAR, 2010

Perigos	Causas	Efeitos	Modos de Detecção	Categoria de Severidade	Categoria de Frequência	Recomendações
Ruptura do vaso extrator	Excesso de pressão interna no vaso	Liberação de dióxido de carbono na área de processo	Indicadores de pressão	Moderada	Provável	Instalar alarmes no equipamento para indicar a necessidade intervenção no sistema

Dentre as vantagens desta metodologia é possível citar: identificação com antecedência dos perigos em potencial por parte da equipe do projeto, identificação de diretrizes e critérios para a utilização posterior de outro método de análise de risco, rapidez na análise (demanda menos esforço que a metodologia HAZOP, por exemplo), simplicidade do estudo, etc. Embora seja fundamental destacar que a APR é uma análise preliminar, de modo que uma avaliação mais profunda dos cenários mais críticos pode ser exigida (CETESB,2003). Ou seja, apenas cenários críticos, cujo nível de risco possa se revelar elevado, demandam a execução de metodologias mais complexas e aprofundadas, como aquelas empregadas na análise quantitativa de riscos.

Assim, uma análise qualitativa, como as apresentadas (APR ou HAZOP), é tradicionalmente realizada antes de metodologias mais complexas, tais como o LOPA. A abordagem qualitativa é onde são desenvolvidos cenários que serão então examinados pelo LOPA, caso o grau de risco obtido demande estudo mais rigoroso.

Assim, a análise qualitativa identifica as causas e consequências do determinado cenário e avalia a magnitude do seu risco. Em seguida, o LOPA se baseia na informação obtida por essa análise e atribui valores numéricos para a frequência do evento iniciador, para probabilidade de falha na demanda (PFD) dos dispositivos de proteção e também para a frequência do cenário final.

O LOPA permite assim definir de forma mais exata quais são as barreiras de proteção existentes, e se são ou não necessárias mais camadas de proteção no cenário identificado. O método LOPA será detalhado no próximo capítulo.

4. LOPA

O LOPA (Análise das Camadas de Proteção), em inglês *Layer of Protection Analysis* é uma técnica de análise de riscos que, embora mais complexa que a APR, ainda é considerada bastante simplificada. Por empregar números, especialmente na definição das frequências de falhas de cada uma das camadas de proteção, essa técnica é considerada um método semi-quantitativo.

Segundo Summers (2003), uma das principais vantagens do LOPA é que este fornece critérios e restrições específicos para avaliar as camadas de proteção independentes, eliminando a subjetividade de métodos puramente qualitativos.

Essa técnica é usada para assegurar um nível mínimo de camadas de proteção independentes (IPL's) frente a um cenário de riscos. Essas camadas podem ser descritas como um sistema ou uma ação com a capacidade de impedir a ocorrência de um cenário crítico, evitando as consequências que ele pode causar, protegendo as pessoas e as instalações ao redor.

A primeira definição sobre o conceito de camadas de segurança (*layer of protection*) foi publicado nos Estados Unidos, em 1993, no guia *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes* do CCPS (Center for Chemical Process Safety). Com base nessa publicação diversas empresas desenvolveram metodologias para a realização do LOPA. Hoje, esta técnica encontra-se cada vez mais difundida e estudada tanto a nível industrial quanto acadêmico.

Cenários distintos apresentam necessidades diferentes de camadas de proteção. De modo geral, aqueles que apresentam uma maior severidade requerem mais camadas, enquanto para processos considerados mais seguros, poucas camadas são suficientes. Embora seja sempre importante assegurar a máxima segurança possível ao processo, quanto maior o número de camadas, maior será o custo em segurança. Logo, deve se buscar um balanceamento entre o máximo de proteção para um mínimo de investimento.

Existem oito diferentes tipos de camada de proteção para garantir a segurança de um processo, como pode-se observar na Figura 4 (ALVES, 2007).

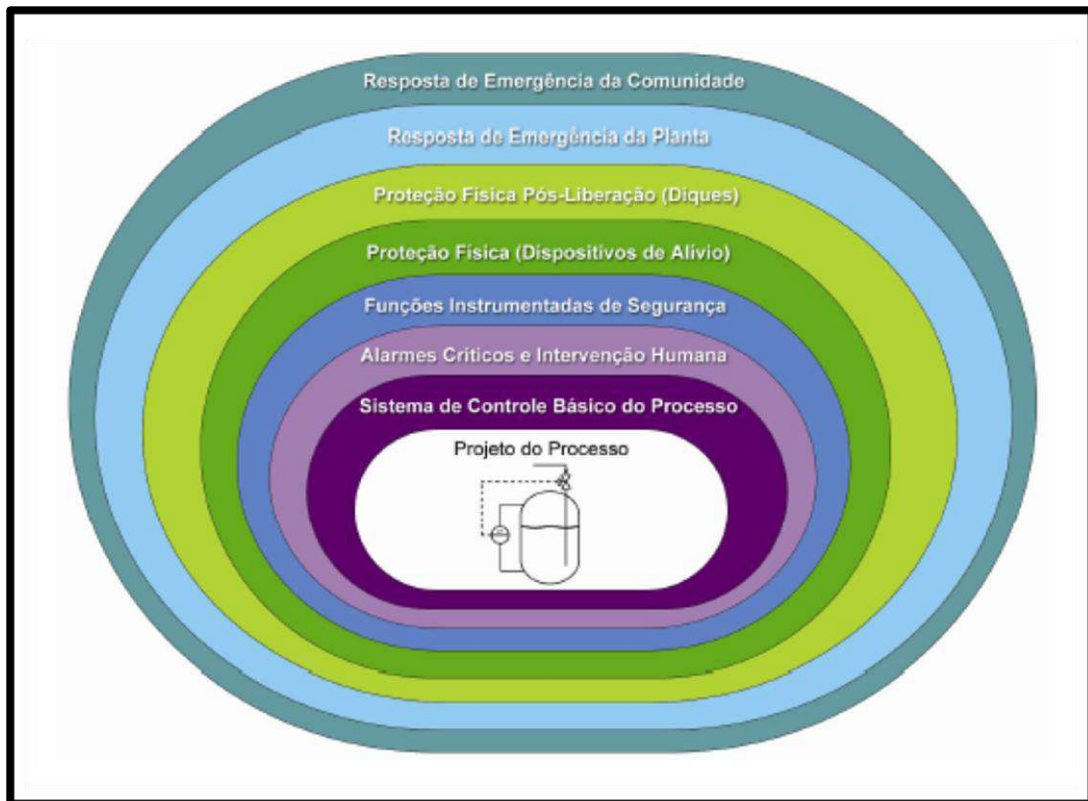


Figura 4 - Camadas de Proteção
Fonte: ALVES, 2007

A primeira camada diz respeito ao projeto e ao processo em si, e tem o intuito de garantir a integridade física do equipamento. Dentre outros fatores, a filosofia de atuação desta primeira camada propõe, que independente do equipamento, este deve sempre ser construído empregando material que seja capaz de suportar as condições operacionais. Propõe ainda que o equipamento deve estar localizado de tal maneira que, em caso de algum evento inesperado, os equipamentos e pessoas ao seu redor não sejam atingidos. A primeira camada aproxima-se assim do conceito de processo intrinsecamente seguro. A escolha, por exemplo, de uma rota química que usa reagentes menos tóxicos ou inflamáveis, por si só torna a planta mais segura. O detalhamento do conceito de projeto intrinsecamente seguro ultrapassa o escopo deste texto.

A segunda camada corresponde ao sistema básico de controle do processo, que é composto por medidores de vazão, nível, pressão, concentração, entre outros. Essa camada é responsável por todo o controle do processo e pela garantia das condições adequadas do sistema.

A terceira camada de proteção são os alarmes críticos. Caso alguma falha apareça, ou um desvio em relação às perturbações normais seja notado, os alarmes serão acionados indicando a necessidade de uma intervenção. Enquanto os controladores da camada anterior buscam manter os parâmetros do processo dentro de faixas aceitáveis, perseguindo o set-point, desvios para valores muito acima ou abaixo do valor desejado podem resultar em alarmes. Falhas em equipamentos também podem acionar alarmes.

Ressalta-se que é comum em plantas com problemas de projeto ou operação, que diversos alarmes sejam ativados ao longo de sua operação. A frequência que os alarmes são ativados, e a grande quantidade destes, pode causar grande distúrbio na operação. A “chuva de alarmes” não apenas rouba a atenção do operador e dificulta sua resposta, como também provoca comportamentos como “ignorar alguns alarmes”, que passam a ser considerados “normais”. O correto funcionamento das camadas anteriores pode evitar problemas decorrentes do uso frequente da camada de alarme.

A quarta camada se refere a funções instrumentadas de segurança (SIF) que são capazes de detectar alguma anormalidade do sistema e efetuar ações corretivas. Ela é formada por sensores e controladores. Diferentemente da camada de alarme, as SIFs além de sinalizarem quando há alguma condição adversa no sistema atuam para corrigir o erro. As SIFs podem atuar após os alarmes, quando nenhuma ação corretiva for adotada ou não tiver obtido sucesso. A SIF pode até mesmo comandar o shutdown de uma planta, em casos mais drásticos.

Alguns autores e algumas plantas já adotam SIFs também para cenários onde o operador não teria tempo hábil para agir após o disparo do alarme. Ou seja, caso o intervalo entre o alarme e a resposta do operador tenha de ser muito reduzido para evitar consequências dramáticas, talvez seja recomendado simplesmente substituir o alarme e a ação do empregado pela SIF – pois o alarme seria inútil. Um debate mais aprofundado sobre alocação de alarmes, dinâmica de resposta e SIF ultrapassa o escopo deste estudo.

A quinta camada é a proteção física, que compreende, entre outros, os dispositivos de segurança cuja função é aliviar automaticamente a pressão em vasos ou linhas, independentemente das causas que provocaram esse aumento. Dispositivos de alívios, como válvulas de alívio ou lacres de ruptura, são exemplos de dispositivos empregados nesta camada. Como a liberação direta para atmosfera muitas vezes não é possível ou desejada, o sistema de alívio é composto também de tubulações, vasos, incineradores ou tochas (*flare*), garantindo a liberação segura (CROWL E LOUVAR, 2011).

Muitos autores defendem que a ativação da quinta camada, somente ocorre quando todas as demais já ocorreram. Ou seja, a liberação de produto é a última solução, quando o processo, o sistema normal de controle, os alarmes e os SIFs não forem capazes de conter o desvio. Outros autores, porém consideram que os sistemas de alívio podem entrar em ação antes das SIFs, evitando o shutdown do processo.

A sexta camada é a proteção física pós-liberação, sendo composta por dispositivos passivos. Esses dispositivos são instalados considerando que algum tipo de proteção pode falhar, e assim evitam que o evento indesejado atinja outras partes da planta. A camada é composta por barreiras físicas de contenção, sejam telas de proteção, diques, barreiras, etc. O uso de diques é compulsório, por exemplo, em parques de tancagem de combustíveis líquidos, mesmo que diversos outros recursos estejam disponíveis para evitar vazamentos. Note que, embora o dique não evite o vazamento, reduz sua severidade (SOARES, 2010).

A sétima camada é a resposta de emergência da planta, sendo responsável pelo plano de emergência. O plano indica como os funcionários da empresa devem atuar em caso de necessidade de evacuação da área ou em outros cenários críticos.

A última camada é a resposta de emergência a comunidade. Ela está relacionada a atuação do Corpo de Bombeiros, da Defesa Civil, de hospitais próximos, da polícia, dos operadores de trânsito, autoridades governamentais, etc. O objetivo principal dessa camada é o rápido e eficiente auxílio a população afetada.

4.1. Camadas de Proteção Independentes

Além da visualização intuitiva promovida pelo LOPA, conforme discutido anteriormente, essa abordagem fornece ainda uma interessante base para o julgamento do número de camadas de proteção independentes (IPL's) necessárias.

A quantidade das camadas de proteção independentes presentes em uma instalação industrial determina o nível de integridade de segurança (*Safety Integrity Level- SIL*). Por sua vez, o nível de integridade do sistema informa o quão protegido aquela instalação está frente a um cenário de risco específico. A SIL assume um valor numérico baseado na probabilidade de uma determinada camada de proteção falhar. Essa probabilidade é conhecida como probabilidade de falha na demanda (PFD) (SOARES, 2010).

Assim, os níveis de integridade (SIL) são descritos por faixas de probabilidade de falhas na demanda (PFD), variando de SIL 1 a 4 de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – SIL
Fonte: Adaptado SOARES, 2010

SIL	PFD
4	$10^{-5} - 10^{-4}$
3	$10^{-4} - 10^{-3}$
2	$10^{-3} - 10^{-2}$
1	$10^{-2} - 10^{-1}$

O mais alto nível de integridade, ou seja, o nível 4, apresenta a menor probabilidade de falha, sendo, obviamente, o mais custoso e difícil para se alcançar. Enquanto os níveis inferiores ao SIL1 indicam que o equipamento não é relevante para a segurança do processo. Quanto maior o SIL mais confiável ou eficiente é o sistema (BAYBUTT, 2002). Muitas vezes plantas que em nível de projeto revelam exigir SIL 4, tornar-se-iam inviáveis economicamente. Nesses cenários é muitas vezes mais recomendado refazer o projeto.

Dentre as oito camadas apresentadas anteriormente na Figura 4, um SIF(Funções Instrumentadas de Segurança) representa a quarta camada de proteção, que dentre outras pode ser usada para manter o processo em condição de operação segura (ALMEIDA,2007). Um conjunto de várias SIFs forma um SIS, que é o Sistema Instrumentado de Segurança. Logo, os SIS agregam todas as SIFs do processo que então são analisadas pelo SIL, sendo que cada SIF apresenta um SIL específico.

Em resumo, a SIF (Função Instrumentada de Segurança) pode ser definida como uma função de proteção implementada em um SIS com o objetivo de alcançar ou mesmo manter um estado seguro de um processo ou equipamento através de uma ação automática específica diante de um determinado desvio operacional (LASSEN, 2008).

Como todas as demais camadas, a SIS também colabora para reduzir o risco da planta. Ou seja, a SIS contribui para reduzir o risco a um nível adequado. A Figura 5 exemplifica como a adoção de um SIS reduz o risco (PETROBRAS N-2595, 1997). Inicialmente, a direita, tem-se o “risco inicial, sem a adoção de medidas de segurança”. Trata-se do risco do projeto antes de instalar quaisquer camadas de proteção. Na sequência, obtém-se o “grau de risco com a adoção de medidas de segurança sem a prevenção através de um SIS”. Ou seja, outras camadas, que não SIS, foram incorporadas. Embora o risco final seja menor, este ainda é superior ao “grau tolerável de risco” estabelecido pela empresa, pelo órgão ambiental, pela seguradora, etc. Para reduzir o risco abaixo deste limite tolerável emprega-se então a camada SIS, resultando no “grau de risco estabelecido após adoção de um SIS”. O novo grau de risco é tolerável. Assim, a SIS é uma das camadas críticas para a redução de riscos em uma instalação.

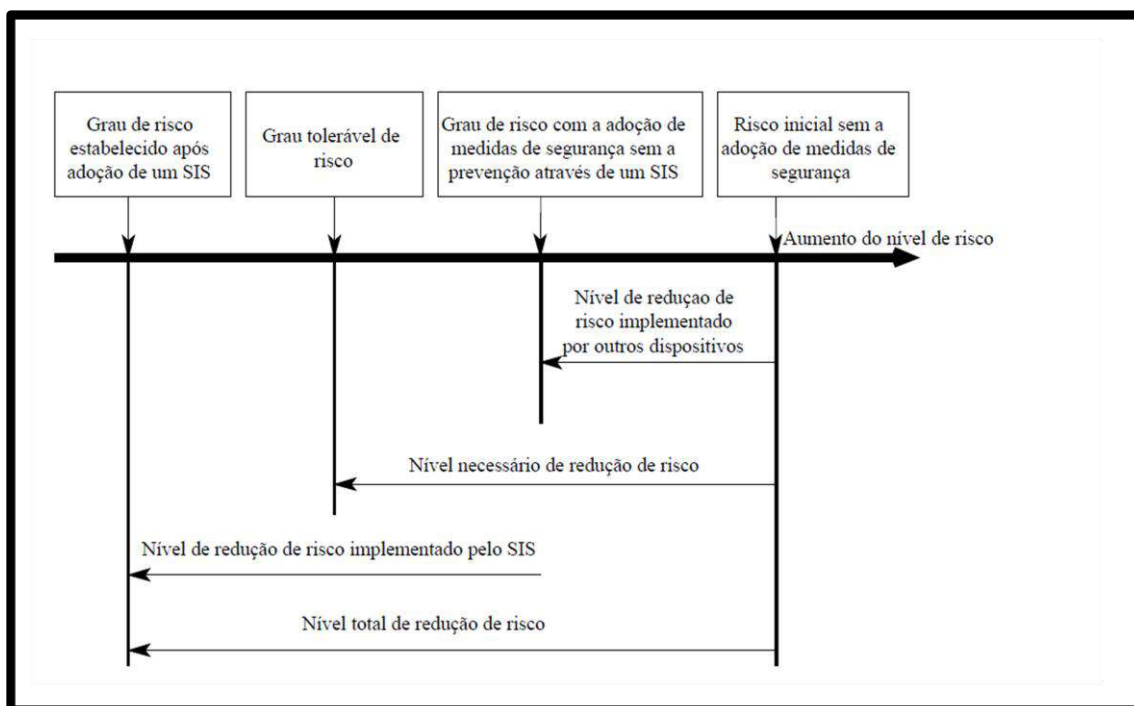


Figura 5 - SIS para a redução de riscos
 Fonte: PETROBRAS Norma N-2595, 1997)

Além de saber sobre a probabilidade máxima de falha exigida para cada função instrumentada de segurança (SIF) (quarta camada), é necessário determinar o nível de integridade de segurança aceitável (SIL) para as outras camadas também.

Nesse trabalho a metodologia LOPA, leva em conta reduções de risco pelas outras camadas de proteção diferentes das SIFs, permitindo avaliações mais consistentes dos cenários. Assim, o nível de integridade do sistema (SIL) foi avaliado para todas as camadas de proteção. Avaliações mais profundas sobre a camada SIF ultrapassam o escopo desse trabalho.

4.2. Quando utilizar LOPA

Para Alvez (2007) o LOPA pode ser aplicado:

- Após uma avaliação qualitativa de perigos, por exemplo, após um HAZOP ou APR, utilizando os cenários identificados pela equipe.
- Pode ser utilizado para analisar cenários que sejam muito complexos ou quando as consequências são muito severas, não sendo adequado fazer julgamentos baseados apenas por critérios qualitativos.
- Pode ainda ser aplicado anteriormente a uma análise quantitativa de riscos mais rigorosa. Assim, a decisão de seguir com a análise quantitativa irá depender no nível de risco determinado pelo LOPA.

De fato, dentro de um processo, o LOPA pode ser aplicado em qualquer etapa, como ilustra a Figura 6 (ALVES, 2007):

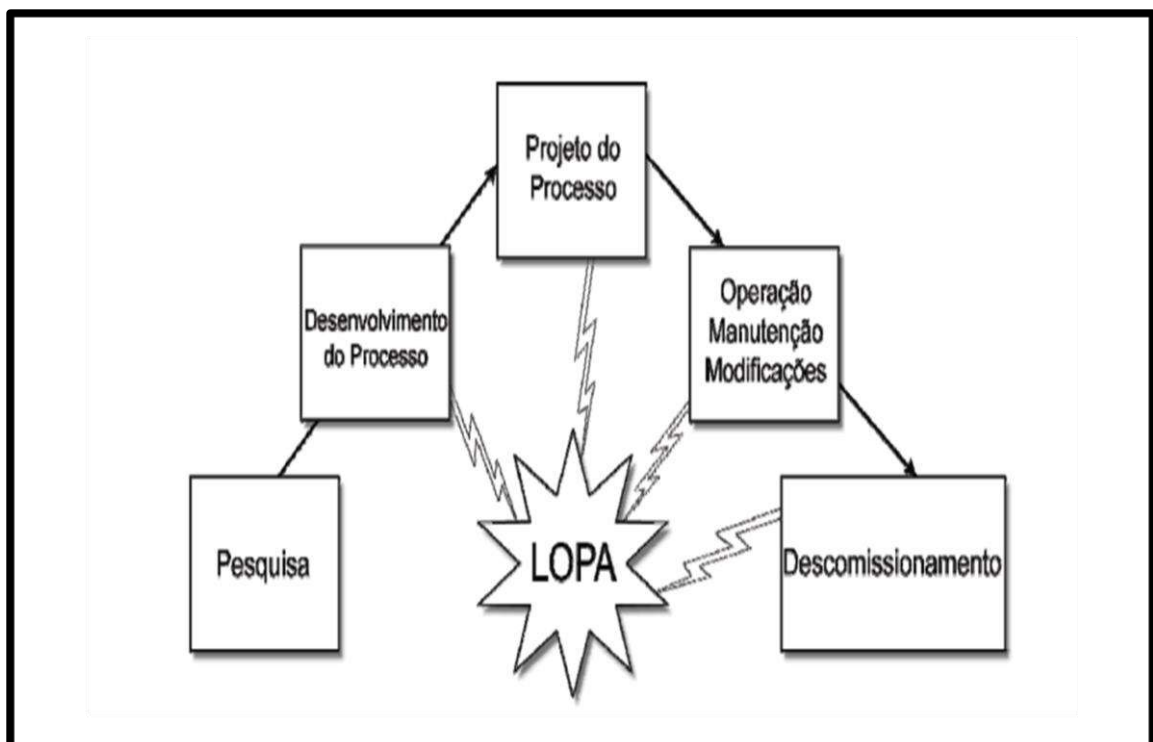


Figura 6 - Etapas de aplicação da LOPA
Fonte: Alves,2007

4.3. Como aplicar o LOPA

Como as análises de riscos em geral, a aplicação do LOPA também requer algumas etapas (ALVES, 2007, EASTON, 2012).

a) Estimar consequência e severidade

Primeiramente devem-se identificar as consequências dos cenários de risco que foram desenvolvidos em uma análise anterior (em um APR, por exemplo). Essas

consequências precisam ser estimadas de acordo com as classes de graus de severidades definidas pela equipe.

A estimativa do grau de severidade em diferentes classes pode empregar tabelas disponíveis na literatura, comumente sendo empregadas as categorias “baixa”, “moderada”, “crítica”, e “extremamente crítica” ou “catastrófica”. As classes de severidade serão detalhadas posteriormente.

b) Desenvolvimento de cenários

Em seguida é preciso analisar as causas que geraram as consequências mencionadas acima. Define-se então o “evento-iniciador”. É importante que cada consequência esteja associada a somente uma causa (evento-iniciador). Assim, formam-se os pares “causa-consequência”, que compõem o cenário a ser analisado. Se houver mais de uma consequência para um mesmo evento-iniciador, outro cenário deverá ser montado.

Os eventos-iniciadores podem ser agrupados em três diferentes grupos:

- Eventos externos: desastres naturais ou sabotagem, entre outros;
- Falhas de equipamentos: sistemas de controle ou sistemas mecânicos, entre outros;
- Falhas humanas: falta de treinamento ou atenção do operador, entre outros;

c) Identificar frequência do evento-iniciador

A frequência do evento-iniciador (f_i) é expressa em “eventos por ano”, e será considerada uma constante. Essa frequência é calculada através de tabelas expostas na literatura, de bases de dados, ou mesmo pela experiência de operação da respectiva planta ou plantas semelhantes. É importante destacar que na literatura não constam todas as frequências dos possíveis eventos-iniciadores. Muitos autores buscam expandir o número de itens disponíveis, pois a adição de novas causas torna o LOPA um processo mais flexível e capaz de cobrir mais cenários. Eventos não cobertos pelas tabelas disponíveis podem ser calculados pela experiência de operação da própria empresa, devendo ser devidamente justificados com uma razão clara e defensável (Young et al, 2006).

Constantemente as frequências adotadas são revisadas para verificar se estão consistentes com os dados de experiência de campo local e também com a prática mais ampla da indústria. Tal verificação pode ser feita através de análises de incidentes internos, através de associações de indústrias, através do emprego de consultores externos com experiência específica para os procedimentos LOPA, ou ainda através de bancos de dados comerciais e de seguradoras, que estão normalmente disponíveis mediante o pagamento de uma taxa.

A Tabela 6 é um exemplo de tabela de frequência de eventos-iniciadores disponível na literatura, onde apresenta a frequência esperada de alguns eventos-iniciadores que podem levar ao cenário considerado. Essa tabela foi elaborada a partir do estudo de Young *et al* (2006).

Tabela 6 - Eventos Iniciadores

Fonte: YOUNG *et al*, 2006

Evento Iniciador	Frequência da causa iniciadora: Eventos/ano
Válvulas	
Válvula de retenção não verificada totalmente	1×10^0
Verificar vazamentos de válvulas internamente (grave)	1×10^{-5}
Falha no regulador	1×10^{-1}
Abertura ou vazamento na válvula de segurança	1×10^{-2}
Tanques	
Falha do vaso de pressão	1×10^{-6}
Falha de tanque atmosférico	1×10^{-3}
Vazamento em tubulação - 10% seção reta	1×10^{-5} por metro
Utilidades	
Falta de água de refrigeração	1×10^{-1}
Falha de energia	1×10^0
Falha do instrumento de ar	1×10^{-1}
Falha do sistema de nitrogênio (inertização)	1×10^{-1}
Tubulações e Mangueiras	
Falha de tubulação- ruptura fraca	1×10^{-7} por metro
Vazamento em tubulação - 10% linha reta	1×10^{-5} por metro
Falha de mangote de carregamento/descarregamento (baixa vibração)	1×10^{-1}
Falha de mangote de carregamento/descarregamento (alta vibração)	1×10^0
Erro de manutenção	
Impacto de veículo terrestre	1×10^{-2}
Queda de carga suspensa por guindaste (caminhão, escavadeira)	1×10^{-3} por içamento
Falha em procedimento de manutenção do tipo LOTO	1×10^{-3} /por oportunidade
Erro do operador	
Falha do operador em executar procedimento de rotina (operador bem treinado, não estressado, não fatigado)	1×10^{-2} /por oportunidade
Erro do operador(sem estresse)- Alarmes, inicialização, desligamento	1×10^{-1} /por oportunidade
Erro do operador(com estresse)- Alarmes, inicialização, desligamento	1×10^0 /por oportunidade
Falha de Máquinas	
Falha de seio de bomba	1×10^{-1}
Falhar no ventilador de ventilação	1×10^{-1}
Falha no motor da bomba ou no compressor	1×10^{-1}
Eventos externos	
Descarga elétrica atmosférica	1×10^{-3}
Incêndio de pequenas proporções	1×10^{-1}
Incêndio de grandes proporções	1×10^{-2}

Analisando a Tabela 6, é importante destacar alguns termos ou expressões empregadas:

- Procedimento de rotina: São ações rotineiras no campo ou na sala de controle (interface de operação do sistema supervisão) que, se realizadas erroneamente, podem gerar desvios do processo em análise; Tarefa não rotineira: São ações realizadas em condições não comuns de operação, tais como paradas e partidas de plantas;
- Manutenção do tipo LOTO: Uma falha geral de procedimento de segurança com múltiplas etapas. Práticas ou procedimentos específicos para proteger o trabalhador de

energização inadvertida de equipamentos, partida inesperada de equipamento, liberação de substância não esperada. Práticas de segurança requerem que um indivíduo responsável isole eletricamente e identifique este isolamento, garantindo o isolamento de energia no equipamento (CALDARA *et al*,2012).

- Falhas em tubulação apresentam sua frequência por metro de tubo.

d) Identificar as IPLs relacionadas

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

Assim, nessa etapa, é preciso reconhecer as salvaguardas disponíveis que atendam as exigências de uma IPL, ou seja, de “camadas de proteção independentes” para cada cenário. As salvaguardas, para serem consideradas IPLs, devem ser capazes de detectar uma ação que exija a sua atuação e de impedir que o evento indesejado ocorra (ALVES, 2007). Caso as salvaguardas não atuem dessa forma elas não são consideradas IPLs.

Assim, uma salvaguarda protege o sistema de um acidente, mas não terá a mesma eficácia de uma camada de proteção independente, por não possuir as seguintes características (SILVA, 2012):

- Especificidade: uma camada proteção independente deve ser especificamente projetada para ser capaz de prevenir as consequências consideradas no projeto;
- Independência: deve operar completamente independente de todas as outras camadas e do evento-iniciador;
- Confiabilidade: as camadas de proteção devem ser capazes de prevenir as consequências de um evento. Por isso, todas as possíveis falhas devem ser consideradas quando projetar uma camada de proteção;
- Auditabilidade: as camadas de proteção devem ser testadas e mantidas adequadamente. As auditorias são necessárias para assegurar que o nível de redução de risco especificado foi atingido e está sendo mantido.

Alguns exemplos de salvaguardas que normalmente não são consideradas IPL são: treinamento e certificação, procedimentos, testes e inspeções normais, manutenção, comunicações, entre outros.

Assim, o ponto principal da LOPA, nessa etapa, é reconhecer as salvaguardas disponíveis que respondem as exigências de ser uma camada de proteção independente. Nessa etapa, elas serão somente identificadas, enquanto na próxima terão a sua probabilidade de falhas na demanda (PFDs) calculadas.

O método LOPA, então, consiste em adicionar IPLs até que o processo atenda a tolerância desejada. A decisão final sobre as alternativas possíveis deve levar em conta custos de implantação, operação e manutenção.

e) Determinar frequência dos cenários

A probabilidade de falha na demanda (PFD) é usada para quantificar a eficácia de um IPL em reduzir a frequência do cenário. Em outras palavras, a PFD é definida como a probabilidade de uma IPL falhar, deixando de impedir alguma ação indesejada. Logo, quanto menor for o valor da PFD para determinada IPL, maior será a confiança que essa camada irá operar corretamente. Determinar, ou especificar, o valor apropriado para a PFD de uma IPL é uma parte importante do processo da LOPA.

A ordem de magnitude da PFD varia da mais fraca IPL (1×10^{-1}) a mais forte IPL (1×10^{-5}). Logo, o projeto, as instalações, os testes funcionais e o sistema de manutenção da IPL devem estar aptos para alcançar a PFD estabelecida.

Com o cenário de risco identificado e com os PFDs das IPLs determinados, é possível calcular a frequência do cenário montado. Para isso usa-se a Equação (1), onde a frequência do evento iniciador (f_i) é multiplicada pelo produto das PFDs das IPLs.

$$f_i^C = f_i \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times PFD_{i3} \times \dots \times PFD_{iN} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

f_i^C é a frequência do cenário genérico C para o evento-iniciador i

f_i é a frequência do evento-iniciador

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

Os valores numéricos das probabilidades de falhas na demanda (PFDs) podem ser vistos nas Tabelas 7 e 8. A Tabela 7 apresenta alguns exemplos de IPL passiva e a Tabela 8 alguns exemplos de IPL ativas. É importante definir que IPL passiva é aquela que não necessita executar uma ação para cumprir a sua função de proteção, enquanto IPL ativa é aquela que necessita mudar de um determinado estado a outro em resposta à mudança na propriedade mensurável do processo em questão (por exemplo, temperatura e pressão). Uma IPL ativa geralmente compreende algum tipo de sensor, um processo de tomada de decisão e uma ação.

Tabela 7 – IPL passivas e suas respectivas PFDs

Fonte: Adaptado YOUNG et al, 2006

Camada de Proteção Independente(IPL)	Probabilidade Média de Falha na Demanda(PFD)
Bacia/dique de contenção	1×10^{-2}
Retentor de Chama(detonação ou deflagração)	1×10^{-2}
Painel de ruptura	1×10^{-2}
Linha de <i>overflow</i> direcionada para local seguro	1×10^{-2}
Sistema de drenagem subterrâneo	1×10^{-2}
Suspiro aberto(sem válvula)	1×10^{-2}
Parede tipo "blast-wall" ou abrigo tipo "bunker"	1×10^{-3}
Proteção passiva contra fogo	1×10^{-2}

Tabela 8 - IPL Ativas e suas respectivas PFD

Fonte: Adaptado YOUNG et al, 2006

Camada de Proteção Independente(IPL)	Probabilidade Média de Falha na Demanda(PFD)
Malha de Controle do SSC	1×10^{-2}
Resposta do operador ao alarme	1×10^{-1}
Dispositivo mecânico de alívio/válvula de segurança e alívio	1×10^{-2}
Dois dispositivos de alívio independentes (bocais, descargas,etc.), alinhados ao processo, cada um dimensionado para atender a 100% do cenário	1×10^{-3}
Múltiplos dispositivos de alívio independentes (bocais, descargas,etc.)porém mais de um precisa atuar para atender a 100% do cenário	1×10^{-1}
Dispositivo mecânico interno de segurança independente do SIS	1×10^{-1}
Disco de ruptura	1×10^{-2}
Válvula de retenção	1×10^0
Válvula de retenção de alta confiabilidade	1×10^{-1}
Duas ou mais válvulas de retenção associadas em série	1×10^{-1}
Válvula reguladora	1×10^{-2}
Válvula travada com selo, listada e verificada frequentemente	1×10^{-2}
Válvula trancada com cadeado, listada e verificada frequentemente	1×10^{-2}
Selo duplo(em bomba) com alarme no interstício	1×10^{-2}
Proteção ativa contra fogo.	1×10^{-1}

Para uma melhor exemplificação de algumas IPLs fornecidas pelas Tabelas 7 e 8, as seguintes observações são destacadas:

- Linha de *Overflow*:

Além das condições gerais requeridas para qualquer IPL, quaisquer válvulas na linha de overflow devem ser controladas para assegurar que esta IPL está disponível quando necessária.

- Malha de Controle SSC

Para que a malha de controle seja usada como IPL é necessário atender a alguns requisitos: a falha da malha não pode gerar o cenário considerado, a evolução do cenário não pode tornar a malha indisponível, o modo de falha da malha deve levar a um estado seguro, os dispositivos de medição e controle devem ser independentes das demais IPLs e o executor da lógica da malha de controle deve possuir fonte de energia separada e altamente confiável.

- Resposta do Operador aos Alarmes:

A redução de risco por resposta do operador a alarmes não pode ser contabilizada mais de uma vez para cada cenário, independentemente do número de alarmes ou de ações executadas pelo operador em resposta a estes. Para que essa ação possa ser considerada uma IPL a unidade operacional deve possuir uma sistemática de gerenciamento de alarmes que garanta respostas adequadas. A ação do operador em resposta ao alarme deve ser suficiente para evitar a consequência indesejada e nenhuma condição presente no cenário pode gerar falsos alarmes. Complementarmente, o sistema de alarme deve ser frequentemente auditado.

- Dispositivo Mecânico de Alívio / Válvula de Segurança e Alívio:

Para considerá-los como IPLs é necessário que o dispositivo seja capaz de mitigar completamente o cenário, os fluidos aliviados devem ser limpos e pouco viscosos, o alívio deve ocorrer em direção a um lugar seguro de forma que o mesmo não cause consequências ambientais significativas, e o sistema de alívio estar inserido em um programa de manutenção estabelecido e auditável.

- Válvula de Retenção

Para considerá-la como IPL é necessário que duas ou mais válvulas de retenção estejam associadas em série. Uma única válvula de retenção pode ser considerada como IPL somente se este dispositivo possuir alta confiabilidade (*high integrity backflow prevention device*). Ela não deve ser passível a entupimentos, formação de depósitos ou gomas. O sistema deve ainda estar inserido em um programa de manutenção mecânica estabelecida e auditável.

- Válvula Reguladora :

Válvulas reguladoras usadas como IPL devem ser identificadas como tal, e fazer parte de um programa de manutenção mecânica estabelecida e auditável.

- Proteção Ativa Contra Fogo

Para que ela possa ser considerada uma IPL, o incêndio deve ser a causa iniciadora do cenário. Não pode ser considerada IPL se sua disponibilidade puder ser comprometida pelo próprio incêndio ou explosão.

f) Definição do risco

Em seguida, deve se determinar o risco, verificando se é ou não aceitável. Existem diversos critérios e tabelas para se estimar a classe de risco. A Tabela 9 apresenta uma Matriz de Riscos, adaptada da IEC 61508, que foi usada nesse estudo. Esta apresenta cinco categorias de frequência para os cenários, variando desde frequente ($f > 10^{-1}$) até improvável ($f < 10^{-4}$). A frequência é calculada em relação à ocorrência de uma falha em certo período de tempo. O período de tempo considerado comumente é de 1 falha em 10 anos ($1/10^1$) até 1 falha em 10.000 anos ($1/10^4$).

A Matriz de Riscos apresenta ainda cinco categorias para severidade das consequências, indo desde severidades baixas até catastróficas. As mesmas categorias de frequência e severidade são frequentemente empregadas no método APR, conforme apresentado anteriormente.

Cada célula da tabela apresenta um determinado nível de risco, que pode ser classificado como “aceitável”, “moderado”, e “não aceitável” (SILVA, 2012).

A avaliação de frequência poderá ser determinada pela experiência dos componentes do grupo ou por banco de dados de acidentes. Ela foi calculada segundo o critério discutido na Tabela 10. A avaliação da severidade foi analisada segundo critério estabelecido na Tabela 11:

Tabela 9 - Matriz de Riscos
 Fonte: Adaptado da IEC 61508.

Matriz de Tolerabilidade de Risco		FREQUÊNCIA (f)				
		IMPROVÁVEL	REMOTO	OCASIONAL	PROVÁVEL	FREQUENTE
Falhas por ano = 1/ano		$f < 10^{-4}$	$10^{-4} \leq f < 10^{-3}$	$10^{-3} \leq f < 10^{-2}$	$10^{-2} \leq f < 10^{-1}$	$f > 10^{-1}$
SEVERIDADE	CATASTRÓFICA (múltiplas fatalidades)	MODERADO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO
	EXTREMAMENTE CRÍTICA (uma fatalidade)	ACEITO	MODERADO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO
	CRÍTICA (danos permanentes)	ACEITO	ACEITO	MODERADO	NÃO ACEITO	NÃO ACEITO
	MODERADA (danos temporários)	ACEITO	ACEITO	ACEITO	MODERADO	NÃO ACEITO
	BAIXA (pequenos danos)	ACEITO	ACEITO	ACEITO	ACEITO	MODERADO

Tabela 10 - Classificação da Frequência
 Fonte: Adaptado da Resolução CEPRAM nº 3.965 de 30 de junho de 2009.

Denominação	Frequência	Descrição
Frequente	$f > 10^{-1}$	Esperado de ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo\instalação.
Provável	$10^{-2} < f < 10^{-1}$	Esperado ocorrer mais de uma vez durante a vida útil do processo\instalação.
Ocasional	$10^{-3} < f < 10^{-2}$	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo\instalação.
Remoto	$10^{-4} < f < 10^{-3}$	Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo\instalação, apesar de já poder ter ocorrido em algum lugar no mundo
Improvável	$f < 10^{-4}$	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo\instalação. Não há referências históricas nos principais bancos de dados

Tabela 11 - Classificação da severidade

Fonte: Adaptado NOLAN, 2008

Denominação	Descrição
Catastrófica	Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente (reparação lenta ou improvável); Várias mortes no local, ou quatro ou mais permanentes lesões incapacitantes no local.
Extremamente Crítica	Fatalidade no local ou menos de quatro trabalhadores com lesões permanentes incapacitantes.
Crítica	Lesões permanentes incapacitantes no local ou fatalidade possível.
Moderada	Graves lesões no local.
Baixa	Pequenas lesões no local.

g) Tomada de decisão

Com a frequência e severidade do cenário calculadas e o risco estimado, deve-se prosseguir para a etapa de tomada de decisão, onde será preciso definir se o risco de determinado cenário está dentro dos critérios de tolerância, ou se deve ser reduzido.

Se o risco não for aceitável deve-se tomar uma série de medidas adequadas, entre elas adicionar mais camadas de proteção.

Assim, a análise e o gerenciamento deve ser realizados em cima dos riscos mais severos. Para a tomada de decisão é preciso uma boa compreensão do processo que está sendo analisado e da eficácia das diversas camadas de proteção analisadas. Obviamente que é preciso realizar uma análise dos custos e benefícios das recomendações propostas.

Em suma, as etapas da avaliação da LOPA estão identificadas na Figura 7 (EASTON,2012).

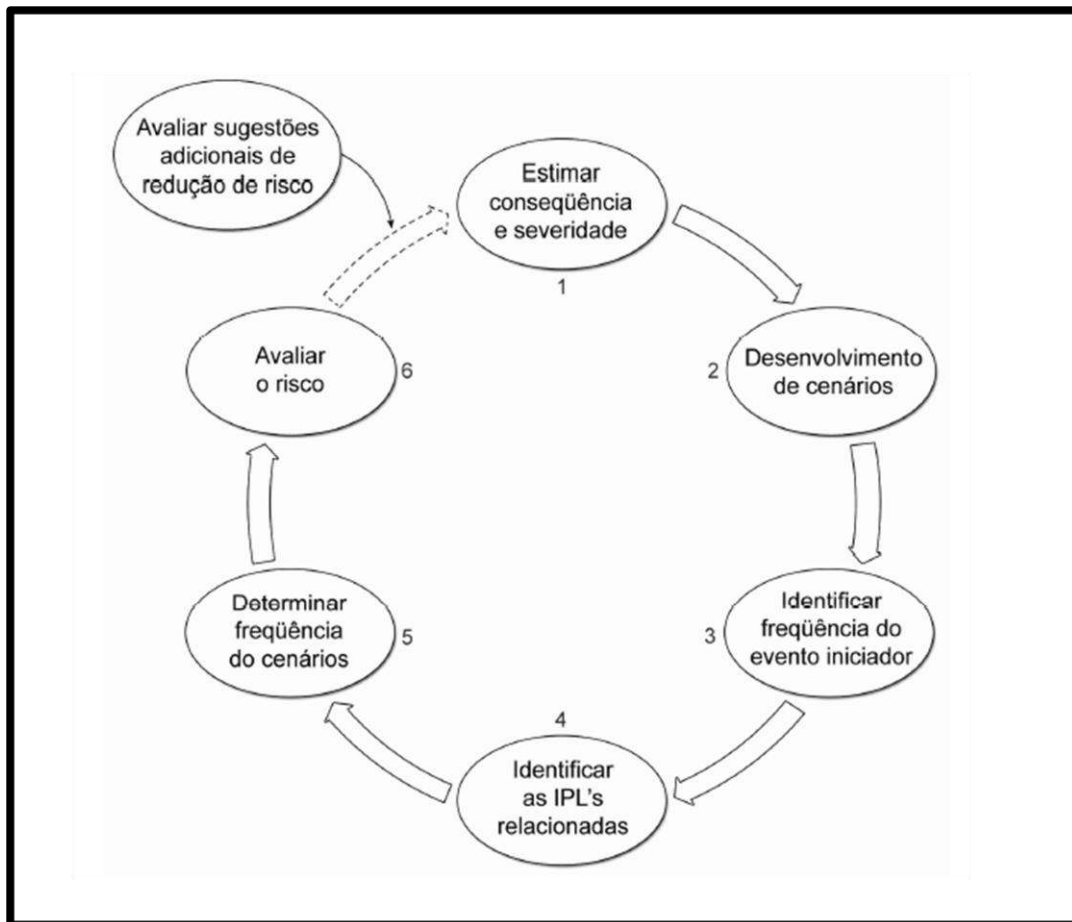


Figura 7 - Etapas da LOPA
 Fonte: EASTON, 2012

4.4. Estudos Baseados na técnica LOPA

A aplicação da metodologia LOPA tem sido cada vez mais frequente nas análises de riscos e se apresenta de diferentes maneiras(SOARES,2010). Em seguida, apresenta-se a metodologia usada por diferentes autores para a aplicação da técnica LOPA (ALVES,2007).

Na tese de Vasconcelos (2008), a técnica LOPA foi usada para avaliar o risco do sistema de hidrogênio de refrigeração do gerador elétrico principal de uma usina nuclear. Ela é aplicada após um HAZOP, onde cada seção do processo é examinada, e todos os possíveis desvios normais de operação são discutidos. As consequências desses desvios sobre o processo são discutidas e são identificadas medidas que podem detectar esses desvios. Assim, o cenário para a aplicação da técnica LOPA foi montado a partir das consequências levantadas no HAZOP. Por fim, foi adotado o método da Matriz de Riscos, que permite representar visualmente o risco encontrado para determinado cenário.

O estudo de Correia e Dias (2009), teve o objetivo de aplicar o LOPA com o foco na análise das falhas humanas. Segundo os autores, as falhas humanas são uma das maiores causas de acidentes. Assim, é utilizada a técnica denominada pelos autores de “LOPA FATORES HUMANOS” que tem a mesma metodologia do LOPA convencional, mas seu foco não é o processo físico químico propriamente dito, e sim os seres humanos nele envolvidos. São estabelecidas, então, camadas de proteção que mitiguem os erros humanos no processo. Primeiramente, a metodologia de Análise Preliminar de Risco (APR) foi aplicada. APR foi escolhida devido a simplicidade do processo estudado, o que tornaria abordagens mais complexas, tais como HAZOP, exageradamente detalhadas. A APR serviu para identificar os cenários de eventuais acidentes, além de estimar o grau de risco associado a cada um. Depois de identificados os cenários, estes foram categorizados em graus de risco “aceitável” e “não aceitável”. Somente os itens não aceitáveis foram analisados através da metodologia LOPA FATORES HUMANOS, sendo então propostas camadas de proteção para mitigar o risco.

Uma abordagem mais tradicional foi desenvolvida por Caldara, Farias e Torres (2012). Este estudo teve o objetivo de aplicar a metodologia LOPA em um sistema de gás combustível para gerar energia em plantas *offshore*. A técnica LOPA foi aplicada após o desenvolvimento de um HAZOP. Foram levantados diversos nós do processo, porém somente dois nós foram escolhidos para serem analisados e discutidos pelo método LOPA. Os resultados do LOPA foram utilizados para identificar os níveis de integridade de segurança (SIL) necessários para cada Função Instrumentada de Segurança (SIF). A metodologia LOPA permitiu assim avaliações mais profundas em relação a alguns aspectos de segurança do processo, impossíveis de serem efetuadas apenas com o emprego do HAZOP. A determinação do SIL foi analisada em termos de sua probabilidade média de falha da demanda (PFDavg) e de seu fator de redução de risco (RRF) em uma escala de números inteiros de 1 a 4.

5. Terminal de Regaseificação do GNL

Neste estudo o processo em que foi aplicado o LOPA foi o de regaseificação do GNL. Os dados apresentados para esse processo tiveram o objetivo de ilustrar o estudo de caso da aplicação do LOPA, verificando seu desempenho, funcionalidade e limitações. Embora baseiem-se em informações de processos reais, os dados não visam reproduzir de forma exata qualquer instalação atualmente em operação.

5.1. Terminais de Regaseificação em Operação ou Planejados

O processo de regaseificação do GNL pode ser feito em terminais terrestres ou em navios metaneiros com o sistema de regaseificação embarcada, conhecidos como SRV (*Storage and Regasification Vessel*). No Brasil, os SRVs foram adotados no terminal de Pécem no estado do Ceará e no terminal da Baía de Guanabara no estado do Rio de Janeiro. A capacidade de regaseificação destas instalações é de, respectivamente, 7 milhões de m³/dia e 14 milhões de m³/dia.

A Tabela 12 apresenta os terminais de regaseificação que estão em operação, em construção ou em estado de autorização em diversos países. Atualmente, pode se perceber, que existem 64 terminais de regaseificação distribuídos em 22 países, onde o Japão, Estados Unidos e Coreia do Sul detêm aproximadamente 67% das instalações.

Tabela 12 - Situação atual dos terminais de regaseificação
(Fonte: ANP,2010)

País	Status das plantas de regaseificação			Total	País	Status das plantas de regaseificação			Total
	Operacional	Em construção	Planejada			Operacional	Em construção	Planejada	
Japão	26	3	2	31	Portugal	1			1
Estados Unidos	8	2	35	45	República Dominicana	1			1
Espanha	5	2	1	8	Tailândia		1		1
Coreia do Sul	4			4	Filipinas			3	3
Reino Unido	3	1	4	8	Holanda			3	3
Itália	2		11	13	Indonésia			2	2
Índia	2	1	7	10	Paquistão			2	2
França	2	1	2	5	Suécia			2	2
México	2		6	8	Alemanha			1	1
BRASIL	2		1	3	África do Sul			1	1
Turquia	2			2	Bahamas			1	1
China	1	2	15	18	Chipre			1	1
Formosa	1	1		2	Croácia			1	1
Chile	1	1		2	El Salvador			1	1
Canadá	1		6	7	Emirados Árabes			1	1
Argentina	1			1	Irlanda			1	1
Bélgica	1			1	Jamaica			1	1
Grécia	1			1	Nova Zelândia			1	1
Coveite	1			1	Polônia			1	1
Porto Rico	1			1	Singapura			1	1
					TOTAL	64	19	45	198

É importante destacar, a quantidade de projetos de terminais em construção ou esperando autorização em diversos países. Independentemente de suas capacidades nominais,

esse fato revela a intenção de diversos países em diversificar suas fontes energéticas, principalmente por questões de segurança do abastecimento e estreitamento das regulações ambientais. Assim, é de grande importância estudos na segurança da operação de um terminal de regaseificação..

O terminal que serviu de referência para a análise de riscos desse trabalho, foi baseado no esquemático de processo apresentado por Jung et al (2003). Esse terminal de regaseificação fica localizado na cidade de Pyeongtaek, na Coreia, é controlado e operado pela *Korea Gas Corporation* (KOGAS), tendo sua operação sido iniciada em outubro de 1986. Ele é composto por dez tanques de armazenagem de GNL onde cada tanque apresenta uma capacidade de armazenagem de 100.000m³. A planta possui uma capacidade de regaseificação de 2.020 toneladas/hora (JUNG *et al*,2003).

5.2. Gás Natural Liquefeito (GNL)

O gás natural é muito usado como combustível e matéria-prima de diferentes processos químicos, sendo composto majoritariamente por gás metano e etano (ANP,2010). O gás é condensado para gás natural liquefeito (GNL) para ser estocado e transportado sob forma líquida, em condições técnico-econômicas viáveis. Ressalta-se que, diferentemente do gás liquefeito de petróleo(GLP), o GNL não é pressurizado durante o transporte e armazenagem, sendo sua liquefação fortemente baseada no uso de baixas temperaturas (ANP,2010). O GNL é incolor, inodoro e não corrosivo (Vanen *et al*.2009).

O GNL ocupa cerca de 1/600 do espaço ocupado pelo gás, logo, uma maior quantidade de GNL pode ser armazenada em um espaço muito menor ,facilitando e reduzindo o custo do transporte (ANP,2010).

O primeiro experimento de liquefação do gás natural foi realizado por Michael Faraday no século XIX com um resultado bastante expressivo (SOUZA, 2008). Em seguida, foi preciso buscar um meio de locomoção para o transporte de GNL, sendo que o primeiro navio tanque capaz de transportar GNL levou uma carga do Lago Charles, Louisiana, para a Ilha Canvey, no Reino Unido, dando início à atividade de transporte comercial de GNL através de grandes distâncias (SOUZA, 2008).

No estado líquido, o gás pode ser transportado em navios criogênicos em uma temperatura próxima de -162°C e na pressão atmosférica. Um único navio é capaz de carregar em torno de 120.000 a 150.000 m³ de GNL (31 a 37 milhões de galões). A Figura 8 ilustra um navio transportador de GNL. Esses navios são construídos com materiais especiais e com sistemas avançados para o carregamento de cargas criogênicas. No mundo, há aproximadamente 300 navios desses operando (LEE, 2010).



Figura 8 - Navio Tanque GNL
Fonte: GIIGNL, 2010

Ao chegar ao seu destino, o GNL é submetido a um processo físico de regaseificação, para voltar à forma gasosa. Este processo ocorre por meio da elevação da temperatura, feita nas unidades de regaseificação.

Assim, no processo de regaseificação, o GNL é recebido dos navios tanque, armazenado em tanques de estocagem especiais, vaporizado e em seguida, já na forma gasosa, enviado para os gasodutos de distribuição (LEE,2010).

5.3. Etapas do processo de regaseificação

Para a aplicação da análise de riscos, o processo de regaseificação foi dividido em três etapas: Descarregamento, armazenamento e vaporização de GNL. Essas etapas estão descritas abaixo.

- Descarregamento Naval de GNL

A primeira etapa desse processo consiste na transferência do GNL do navio tanque para o tanque de armazenamento em terra. Essa etapa é feita através de braços articulados projetados para a transferência segura do GNL do navio para o terminal. Estes braços, estão ilustrados na Figura 9. Eles precisam ser mantidos frios para evitar que o calor externo aqueça a tubulação e cause a mudança de fase. É importante que estes equipamentos sejam capazes de suportar a expansão e contração que ocorre devido as variações de temperatura.



Figura 9 - Braços articulados de descarregamento
Fonte: GIIGNL, 2010

O descarregamento de GNL é um processo contínuo, excepto se houver necessidade de intervir nas linhas de descarga, devido a movimentos do navio, por exemplo, que podem romper a ligação do duto de descarga. Logo, é importante que essas ligações possuam sistema de interrupção de emergência.

Os braços de descarga encontram-se equipados com sistemas de segurança em conformidade com os códigos internacionais, que consistem na aferição angular dos braços de modo a proporcionar alarmes em um tempo adequado em caso de o navio se afastar de forma anormal, e sistemas de emergência de interrupção da descarga (GIIGNL, 2010) .

O método mais apropriado para a descarga consiste em utilizar as diferenças de densidade para misturar a carga de GNL a ser descarregada com o conteúdo do líquido que permanece no interior do tanque. O enchimento dos tanques deve ocorrer, então, de acordo com as diferenças de temperaturas e densidades entre o GNL armazenado no tanque e aquele da corrente sendo alimentada. Desse modo, evita-se um possível aumento de pressão e o risco de ocorrer um roll over (ANP, 2010).

- Armazenamento de GNL

Depois do descarregamento, o GNL é transportado por tubos criogênicos para tanques construídos especialmente para sua armazenagem. Esses tanques podem ser de contenção simples, de contenção dupla, do tipo *full-containment*, ou do tipo membrana. Os tanques mais utilizados são dos tipos *full-containment* e membrana.

Um tanque *full-containment* é um tanque de retenção dobrada em que o espaço anular entre os tanques interior e exterior está selado. Em caso do rompimento do tanque interior, há um tanque externo que é capaz de conter o produto líquido e mesmo o vapor do GNL. Esse

tanque externo deve ser capaz de resistir a choques e abalos sísmicos. A Figura 10 apresenta um exemplo desse tanque.



Figura 10 - Tanque de armazenamento tipo *Full Containment*
Fonte: TERMINAL DE SINES

O tanque de armazenamento tipo membrana é constituído de um tanque de concreto com uma camada de isolamento interna coberta por uma membrana fina de aço inoxidável. O tanque de concreto suporta cargas hidrostáticas, as quais são transferidas através da membrana e do isolamento, ou seja, a membrana não é autossustentável. A membrana é capaz de contrair e expandir com a mudança de temperatura. A Figura 11 apresenta o interior desse tanque tipo membrana (CARVALHO, 2008).

Para a avaliação de riscos o tanque considerado será do tipo membrana, segundo processo descrito por Jung (2003).

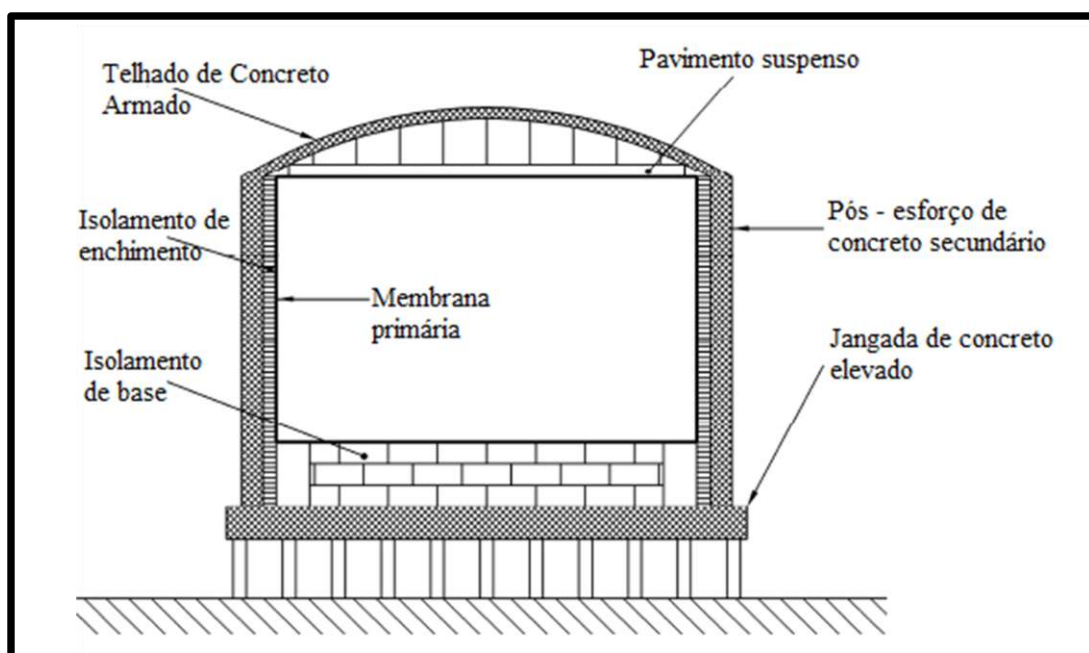


Figura 11 – Tanque de armazenamento tipo Membrana
Fonte: GIINGL

Os tanques de armazenagem do GNL tem capacidade de armazenamento de 100.000 m³ de GNL e duas bombas submersas, ambas necessárias para assegurar o envio de GNL necessário para os vaporizadores. Como visto, eles são construídos para aguentar temperaturas criogênicas e assim manter o líquido em baixas temperaturas e diminuir a evaporação.

Durante a operação normal do terminal, uma quantidade de gás natural evapora e fica em equilíbrio com o GNL dentro do tanque de estocagem, é o BOG (boil off gás). A maior fração do BOG é composta de metano (99%) e sua formação ocorre devido às trocas de calor através das paredes do tanque de estocagem, equipamentos e dutos do terminal ou devido a queda de pressão(JUNG, 2003). Ele é muito importante para o equilíbrio de pressão no processo e logo para a segurança operacional.

Esse BOG deve ser, continuamente, liberado do interior do tanque. Assim, esse BOG deve ser capturado e pode ser recondensado para ser mandando para o vaporizador junto com o GNL ou pode ser reinjetado ao navio tanque para manter a pressão positiva durante o processo de descarregamento ou ainda, em caso de acidentes, ser enviado para o flare (LEE, 2010) .

- Vaporização do GNL

Em seguida, o GNL armazenado nos tanques é enviado para vaporizadores onde é aquecido e ocorre a regaseificação do GNL. O GNL armazenado nos tanques é evaporado. No processo em questão, existem dois tipos de evaporadores, um do tipo ORV (*Open Rack Vaporizer*) e um SCV (*Submerged Combustion Vaporizer*), que são responsáveis por 100% da produção do gás natural que vai para a malha de distribuição.

O primeiro utiliza a água do mar como fluido de troca térmica para aquecer o GNL, conforme Figura 12. A água do mar é captada por um sistema periférico de utilidades, tratada e então bombeada ao ORV. Esse vaporizador consiste em uma série de painéis paralelos compostos por tubos finos que são desenhados de forma a otimizar a transferência de calor. A água que corre na superfície dos painéis proporciona o fluxo necessário de calor para vaporizar o GNL. Ela cai sobre os painéis de tubos contendo GNL e fica armazenada em uma calha, sendo em seguida descarregada de volta para o mar. Os evaporadores do tipo ORV apresentam a vantagem de serem seguros e de não precisarem de fonte de calor artificial. A fonte de calor utilizada é a água do mar, não sendo uma fonte cara. Sua principal desvantagem é o impacto ao ambiente marinho, uma vez que a água será devolvida para o mar em temperaturas muito menores, e poderá apresentar concentração de 0,2 a 2 ppm de hipoclorito que foi adicionado (YANG,2004) .

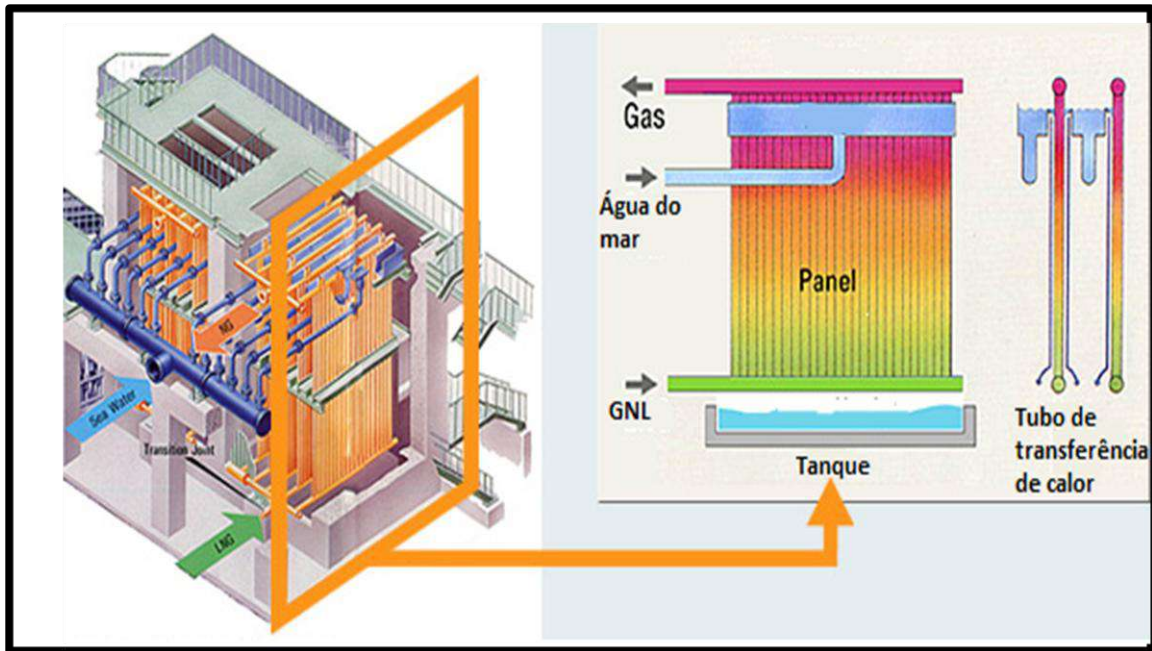


Figura 12 - Oper Rack Vaporiser (ORV)
 Fonte: GIIGNL,2009

O outro tipo de vaporizador, o SCV, utiliza tubos imersos em fluido aquecido para fazer a vaporização, por isso seu funcionamento independe do sistema de água do mar. O gás combustível captado no sistema BOG é responsável pelo aquecimento do fluido de troca térmica, normalmente a água (PIRES, 2012). Esse tipo de vaporizador possui baixo custo de construção, elevada eficiência (>98%), partida rápida (*quick startup*) e é utilizado principalmente em situações de emergência. Suas desvantagens são o alto custo de operação, o impacto ambiental (devido a emissão de NO_x e CO_2) e a necessidade de fonte de calor. Na Figura 13 pode-se ver um exemplo de SCV (YANG,2004).

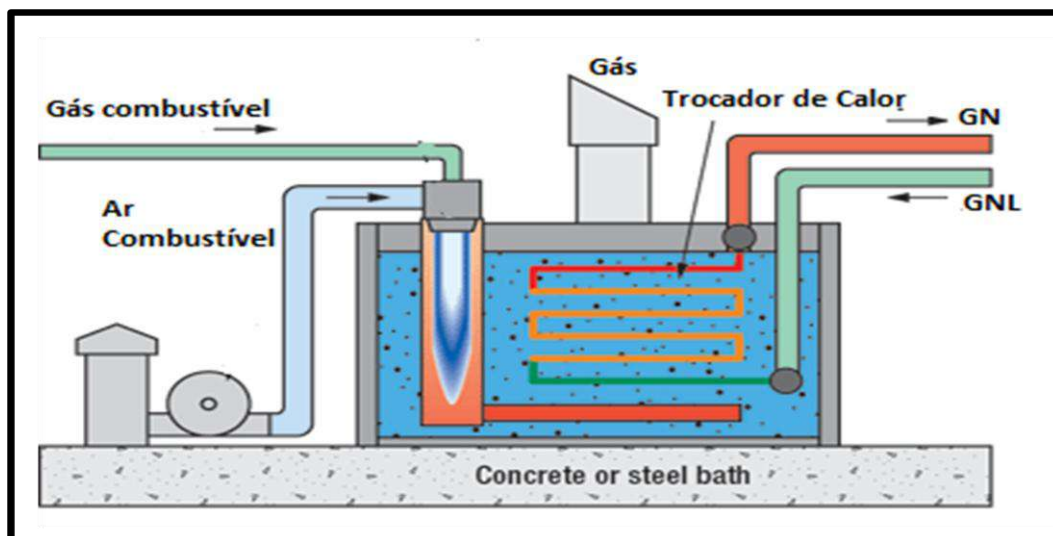


Figura 13 - Submerged Combustion Vaporizer (SCV)
 Fonte: GIIGNL , 2009

A última etapa realizada no terminal é a medição da quantidade de gás que está sendo enviada. O gás natural é entregue por meio de gasodutos, diretamente aos clientes para uso industrial ou residencial.

6. Estudo de Caso: Análise de Riscos

A análise de riscos desenvolvida neste estudo teve como base o terminal de regaseificação operado pela KOGAS, representado na Figura 14. O terminal foi dividido de acordo com as etapas apresentadas no item anterior e conforme descrito na Tabela 13.

Tabela 13 - Lista de Sistemas Considerados

Nº	Sistema
1	Descarregamento naval do GNL
2	Armazenamento do GNL
3	Vaporizadores

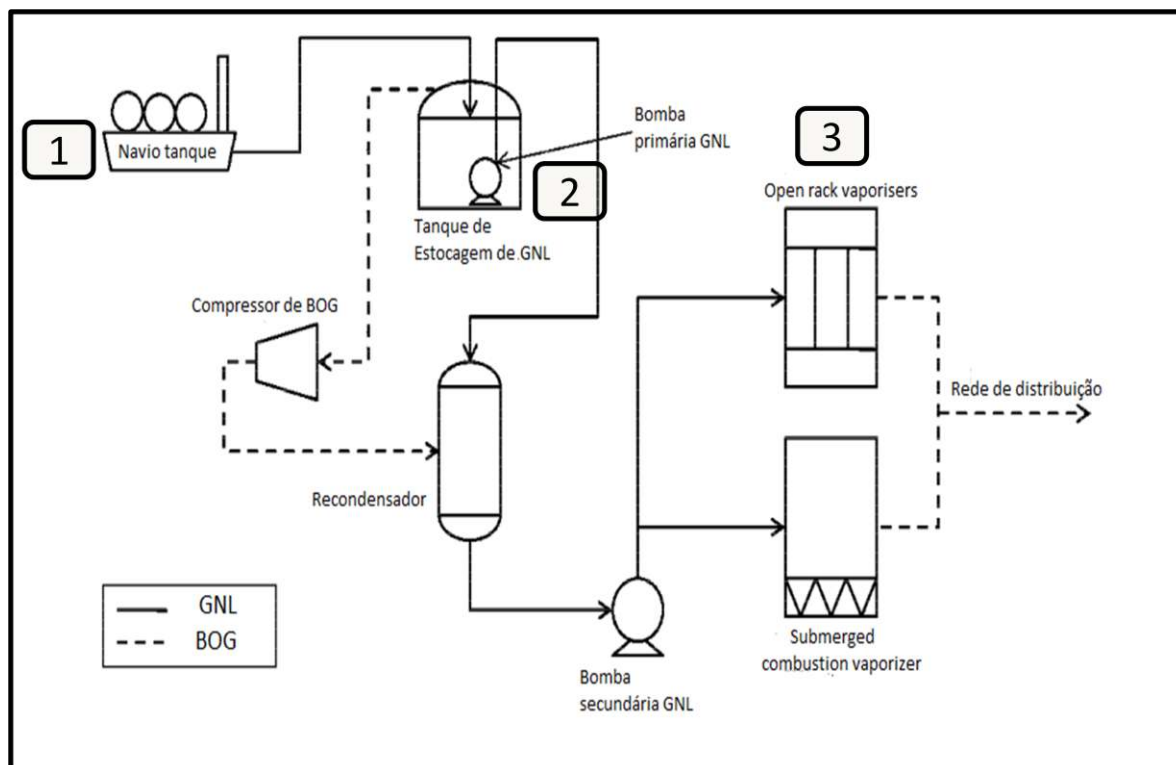


Figura 14 - Processo de regaseificação
Fonte: LEE,2010

6.1. Principais perigos associados ao GNL

O GNL é composto, fundamentalmente, de metano (85 a 95% v/v), etano, propano e pequenas frações de hidrocarbonetos mais pesados (ANP,2010). Como visto, por ser um criogênico, quando é liberado para a atmosfera se vaporiza produzindo vapores de GN. O vapor liberado, predominantemente metano, é inflamável nas concentrações volumétricas entre 5% e 15% v/v nas condições atmosféricas usuais (SANDIA, 2004).

Pode-se destacar alguns perigos associados ao GNL (IKEDA, 2010):

- **Explosão:** Este fenômeno ocorre quando uma substância sofre reações muito rápidas, como é o caso da ignição (explosão química), ou é liberada de forma descontrolada sob pressão (explosão mecânica). Para a explosão química ocorrer é preciso que o vapor de GNL esteja próximo a uma fonte de ignição (como chamas, faíscas ou fontes de calor) e dentro da sua faixa de inflamabilidade. Tendo em vista que o GNL não é mantido sob pressão, que as plantas do produto normalmente localizam-se em espaços abertos, com poucas regiões passíveis de acúmulo de gás e ainda contam com sistemas de prevenção de fontes de ignição, a possibilidade de explosão é reduzida. Explosões envolvendo GN são observadas principalmente em espaços fechados ou confinados, onde ocorre formação de nuvens e acúmulo de massa de material inflamável.
- **Incêndio em poça:** Acontece com o vazamento do produto líquido para o meio ambiente e consequente formação de poça. Sobre a poça, forma-se uma fase vapor, que mistura-se ao ar atmosférico. Essa nuvem pode se inflamar, ocorrendo assim um incêndio em poça. Estas poças não se extinguem facilmente até que todo o GNL seja consumido. A radiação térmica produzida pelo incêndio em poça pode atingir pessoas desprotegidas e danificar propriedades a uma distância considerável da fonte das chamas.
- **Temperatura criogênicas:** As baixas temperaturas podem ocasionar danos materiais e estruturais tais como trincas, rachaduras, fragilização dos equipamentos ou de objetos não preparados para essa temperatura. O frio pode ainda acarretar congelamento e ser potencialmente letal para seres humanos.
- **Transição rápida de fase:** O GNL é armazenado em baixas temperaturas e quando ocorre um vazamento para o meio ambiente, ele pode vaporizar de forma rápida, causando uma rápida transição de fase. A mudança de fase gera ondas de pressão com um potencial de quebrar janelas, vidros e objetos em suas proximidades, podendo ser fatal para os seres humanos. Além disso, essa rápida troca térmica tende a promover o congelamento de equipamentos, em especial válvulas, que pode contribuir para gerar graves acidentes.
- **Rollover:** Esse fenômeno ocorre quando existe dentro de um tanque, GNL com diferentes densidades e formam várias camadas no interior do tanque. Essas camadas começam a se estabilizar e ao entrarem em movimento, criam sobrepressões dentro do tanque de armazenamento.
- **Asfixia:** Se caracteriza como dificuldade respiratória, com possível perda de consciência devido à falta de oxigênio. Pode ocorrer perto do local de vazamentos e em espaços confinados, onde as pessoas ficam expostas a concentrações excessivamente altas de vapor de GNL. O metano é um gás asfíxiante simples.

- Formação de nuvem tóxica: Quando é atingida uma alta concentração por substâncias tóxicas, após um vazamento ou exposição prolongada, capaz de provocar danos, permanentes ou não, ao homem.
- BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions*): É a liberação súbita de uma grande massa de líquido sob pressão para a atmosfera. A explosão decorrente do fenômeno projeta fragmentos a longas distâncias, caracterizando assim um acidente de alta gravidade. Como os tanques de GNL não operam em pressões elevadas, o fenômeno de BLEVE é pouco esperado.

Sob o ponto de vista ambiental, o GNL não é tóxico, e se evapora rapidamente; conseqüentemente, considerando um longo tempo de vazamento, são insignificantes os impactos ambientais de um derrame acidental, se não houver nenhuma ignição dos vapores formados (ABS, 2006; ABS, 2004; SANDIA, 2004).

6.2 Aplicação da Metodologia APR

Para esse procedimento foi considerada a divisão do processo, conforme Tabela 12, em três sistemas. O foco desse trabalho foi mostrar a aplicação das técnicas de análise de risco, especialmente o APR e LOPA. Logo considerou-se somente os perigos mais relevantes, não sendo considerados todos os perigos que uma planta de regaseificação está sujeita. Para a classificação de severidade, frequência e estimativa do risco foram usados as Tabelas 9, 10 e 11 apresentadas no Capítulo 4 desse trabalho

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam o resultado da aplicação do APR (IKEDA, 2010).

Tabela 14 - Aplicação da técnica APR na etapa de descarregamento do terminal de regaseificação
Fonte: IKEDA, 2010

<u>Descarregamento:</u>						
Perigo	Causas	Efeitos	Deteção/Salvaguarda	Severidade	Frequência	Risco
Desconexão não planejada do braço de carga e descarga.	Extensão potencial e ruptura dos braços de ligação navio-terminal devido aos movimentos do navio.	Transição rápida de fase(RPT).	Válvula de controle de fluxo nas bombas; Detectores para checar se o navio não está se movimentando vigorosamente e capazes de ativar o sistema de emergência; Válvulas de parada de emergência.	Critica	Provável	Não aceito
		Explosão se houver formação de nuvens de vapor e fonte de ignição.		Catastrófica	Remoto	Não aceito
		Congelamento da água do mar sob os braços de carga e descarga.		Moderada	Ocasional	Aceito

Tabela 15 - Aplicação da técnica APR na etapa de armazenamento do terminal de regaseificação

Fonte: IKEDA,2010

Armazenamento						
Perigo	Causas	Efeitos	Deteccção/Salvaguarda	Severidade*	Frequência	Risco
Pequeno vazamento	Furo pequeno no tanque	Formação de nuvem tóxica	Sistemas de alertas de vazamentos de alta confiabilidade; Sistema de detecccção de líquido criogênico; Sistema de detecccção de gás; Sistemas de segurança e de parada de emergência; Diques para conter o vazamento.	Moderada	Provável	Moderada
		Incêndio em poça		Crítica	Remoto	Aceito
		Rápida transição de fase		Moderada	Ocasional	Aceito
		Explosão		Extremamente Crítica	Improvável	Aceito
Grande vazamento	Furo grande no tanque.	Formação de nuvem tóxica	Sistemas de alertas de vazamentos de alta confiabilidade; Sistema de detecccção de líquido criogênico; Sistema de detecccção de gás; Sistemas de segurança e de parada de emergência; Diques para conter o vazamento.	Crítica	Provável	Não aceito
		Incêndio em poça		Catastrófica	Remoto	Não aceito
		Rápida transição de fase		Crítica	Provável	Não aceito
		Explosão		Catastrófica	Remoto	Não aceito
		Bleve		Catastrófica	Improvável	Moderado
Roll Over nos tanques	Diferentes fornecedores de GNL.	Potencial danos aos tanques	Sistema de alívio de pressão; Sensor de temperatura e densidade.	Baixa	Provável	Aceito
		Sobrepessões dentro do tanque		Crítica	Provável	Não Aceito
		Dispersão do gás		Baixa	Ocasional	Aceito
Sobrecarregamento do tanque	Fechamento (shutdown) do sistema de alimentação de GNL em tempo insuficiente.	Potencial sobrepressão do tanque com perda limitada de carga.	Detector de sobrevolume no tanque; Sistema de alarme indicando sobrecarga.	Moderada	Provável	Moderado
Ar ingressa no tanque	Falha no equipamento de liberação de ar.	Mistura inflamável no tanque com potencial explosão.	Procedimentos operacionais durante startup e manutenção.	Extremamente crítica	Improvável	Aceito
BOG no interior do tanque	Falha no equipamento de liberação do BOG	Aumento da pressão no interior do tanque	Sistema de alívio de pressão.	Baixa	Frequente	Moderado

Tabela 16 - Aplicação da técnica APR na etapa de vaporização do terminal de regaseificação
 Fonte: IKEDA,2010

Vaporização						
Perigo	Causas	Efeitos	Deteccção/Salvaguarda	Severidade	Frequência	Risco
Pequeno vazamento	Furo pequeno no sistema de vaporização.	Potencial de o gás natural encontrar fontes ou processos de chama.	Detector de GN; Sistemas de segurança e de parada de emergência.	Crítica	Remoto	Aceito
Grande vazamento	Furo grande no sistema de vaporização.	Potencial de o gás natural encontrar fontes ou processos de chama.	Detector de GN; Sistemas de segurança e de parada de emergência.	Extremamente crítica	Improvável	Aceito

É importante destacar a partir avaliação dos resultados expostos nas tabelas que, apesar de as consequências (efeitos) serem as mesmas para furos pequenos e grandes, as consequências para o furo pequeno serão menos severas, uma vez que menor quantidade de GNL vazará. Além disso, a frequência foi analisada considerando a probabilidade da causa acontecer juntamente com o efeito, chegando a uma estimativa final da frequência.

A coluna Deteccção/Salvaguarda refere-se a qualquer mecanismo capaz de detectar os eventos descritos na primeira coluna. Esse mecanismo pode ser tanto instrumental (alarmes de pressão, sensores e etc), quanto percepção humana (visual, odor e etc). A coluna também apresenta algumas salvaguardas disponíveis para o evento.

A Análise Preliminar de Riscos feita nesse estudo teve como objetivo principal auxiliar a técnica LOPA, destacando os riscos mais relevantes para um terminal de regaseificação de GNL. A aplicação da LOPA confirmará ou não, de uma forma quantitativa, a frequência de cada cenário formado. Somente os cenários com riscos “não aceitos” foram analisados pela LOPA.

A APR é um método intuitivo e fornece informações de uma forma qualitativa. É um método subjetivo e depende da experiência e do conhecimento da equipe que faz a análise, podendo o resultado variar conforme a equipe.

6.3 Aplicação da Metodologia LOPA

Conforme apresentado, a aplicação da Análise Preliminar de Riscos (APR) ao processo em estudo gerou possíveis cenários de riscos, alguns mais ou menos prováveis que outros, alguns mais ou menos severos que outros. Ou seja, cada um alocado em uma classe de risco diferente.

Assim, para a aplicação do LOPA foi considerado somente os cenários que apresentaram um risco “não aceitável”, conforme critério de classificação aqui adotado. A aplicação da LOPA irá certificar ou não a frequência desses cenários, permitindo compreender melhor o nível de risco do cenário e ajudando a tomar as medidas adequadas.

A frequência tolerada (f_{TOL}) para que o risco seja aceitável vai depender do padrão de referência usado, tal como norma de aceitabilidade de risco emitida pela CETESB ou INEA ou critério próprio da indústria, seguradora, etc.

Essa frequência (f_{TOL}) será comparada com a frequência calculada do cenário (f_i^C). Caso f_i^C seja menor ou igual a f_{TOL} , as camadas de proteção existentes bastam. Caso f_i^C seja maior que f_{TOL} , deve-se adicionar camadas de risco complementares para reduzir o risco a um nível tolerável.

Atribuindo-se valores numéricos às frequências dos possíveis eventos iniciadores (f_i) e às probabilidades de falha na demanda (PFD) de cada camada de proteção existente, foi possível obter o valor da frequência do cenário pela equação 1. Em seguida, comparou-se a frequência calculada pela equação com o valor pré-estipulado como tolerável (f_{TOL}).

O LOPA não define quais camadas de proteção adicionar ou como projetá-las, mas auxilia na avaliação das medidas alternativas que podem ser implementadas para que se alcance a redução de frequência, e consequentemente de risco, requerida.

6.3.1 Desenvolvimento dos cenários

É importante destacar que cada evento iniciador só poder ter uma consequência, assim foram montados diversos cenários com a mesma causa iniciadora porém com diferentes consequências.

Os cenários foram compostos por um único par evento iniciador – consequência, montados a partir das Tabelas 14,15 e 16, para aqueles perigos que apresentaram um risco não aceitável. Foram montados sete cenários que podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17 - Cenários Montados

Cenário	Evento Iniciador	Consequência
1	Extensão potencial e ruptura dos braços da ligação navio-terminal devido aos movimentos do navio.	Transição rápida de fase (RPT).
2	Extensão potencial e ruptura dos braços da ligação navio-terminal devido aos movimentos do navio.	Explosão
3	Furo grande no tanque.	Formação de nuvem tóxica
4	Furo grande no tanque.	Incêndio em poça
5	Furo grande no tanque.	Transição rápida de fase(RPT).
6	Furo grande no tanque.	Explosão
7	Roll Over nos tanques	Sobrepensões dentro do tanque

6.3.2 Identificação das frequências dos eventos iniciadores

A frequência do evento iniciador foi retirada da Tabela 6.

A Tabela 18 indica a frequência para cada evento iniciador aqui empregado.

Tabela 18 - Frequência do evento iniciador

Cenário	Evento Iniciador	Frequência(fi) (Eventos/ano)
1	Extensão potencial e ruptura dos braços da ligação navio-terminal devido aos movimentos do navio.	$1 \cdot 10^{-1}$
2	Extensão potencial e ruptura dos braços da ligação navio-terminal devido aos movimentos do navio.	$1 \cdot 10^{-1}$
3	Furo grande no tanque.	$1 \cdot 10^{-2}$
4	Furo grande no tanque.	$1 \cdot 10^{-2}$
5	Furo grande no tanque.	$1 \cdot 10^{-2}$
6	Furo grande no tanque.	$1 \cdot 10^{-2}$
7	Roll Over nos tanques	$1 \cdot 10^{-1}$

6.3.3 Identificação das IPLs relacionadas e estimativa das PFDs

Nessa etapa, foram definidas quais salvaguardas disponíveis na instalação são possíveis de serem consideradas como “camadas de proteção independentes” (IPLs). Somente as salvaguardas que são de fato IPLs foram então consideradas. Essas IPLs podem ser vistas na Tabela 19.

Também, foram retirados os valores das probabilidades de falha na demanda (PFD) de cada IPLs para cada cenário através das Tabelas 7 e 8. Esses dados estão na Tabela 19.

Tabela 19 - Probabilidades de Falha

Cenário	IPLS	PFD(falhas/demanda)
1	Válvula de controle de fluxo nas bombas (Válvula reguladora)	$1*10^{-2}$
	Ação do operador ao detector indicando movimentos vigorosos do navio	$1*10^{-1}$
2	Válvula de controle de fluxo nas bombas (Válvula reguladora)	$1*10^{-2}$
	Resposta do operador ao detector indicando movimentos vigorosos do navio	$1*10^{-1}$
3	Bacia/dique de contenção	$1*10^{-2}$
	Ação do operador ao alarme indicando vazamento	$1*10^{-1}$
4	Bacia/dique de contenção	$1*10^{-2}$
	Ação do operador ao alarme indicando vazamento	$1*10^{-1}$
5	Bacia/dique de contenção	$1*10^{-2}$
	Ação do operador ao alarme indicando vazamento	$1*10^{-1}$
6	Bacia/dique de contenção	$1*10^{-2}$
	Ação do operador ao alarme indicando vazamento	$1*10^{-1}$
7	Sistema de alívio de pressão	$1*10^{-1}$

6.3.4 Determinação da frequência dos cenários

A frequência para cada cenário montado foi calculada de acordo com a Equação 1 descrita no Capítulo 3. O resultado encontra-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Frequência dos Cenários

Cenário	Frequência do cenário (f_i^C)(Eventos/ano)
1	1×10^{-4}
2	1×10^{-4}
3	1×10^{-5}
4	1×10^{-5}
5	1×10^{-5}
6	1×10^{-5}
7	1×10^{-4}

6.3.5 Determinação do risco e tomada de decisão

O risco foi calculado de acordo com a Matriz de Risco apresentada na Tabela 9. A severidade permaneceu sendo estimada a partir de conceitos qualitativos desenvolvidos durante a Análise Preliminar de Risco. A frequência passou ser determinada a partir dos cálculos apresentados. Deste modo, um novo risco para cada cenário foi estimado. A análise de risco dos cenários é apresentada abaixo.

➤ Cenário 1

A frequência desse cenário (f_i^C) foi igual a 1×10^{-4} que é uma frequência classificada como “remota” segundo critério adotado. Da Análise Preliminar de Risco, esse cenário apresenta uma severidade “crítica”. Através da Matriz de Risco, é percebido que a frequência tolerável para esse cenário deve ser menor que 10^{-3} , e como f_i^C é menor que esse valor então, tem-se que o **risco é aceitável**.

Logo, como foi atingido o valor de tolerabilidade do risco, não é necessário implementar novas camadas independentes de proteção para aumentar a segurança.

➤ Cenário 2:

A frequência desses cenários foi igual a 1×10^{-4} sendo uma frequência da classe “remota”. Da Análise Preliminar de Risco, esse cenário apresenta uma severidade considerada como “catastrófica”. Assim, a partir da Matriz de Risco observa-se que esse cenário apresenta um **risco não aceito**. Nesse caso, o risco foi o mesmo da análise APR.

Para alcançar um nível de risco aceitável é necessário uma frequência menor que 1×10^{-4} . Logo é indicado implementar novas camadas independentes de proteção para aumentar a segurança.

➤ Cenário 3

A frequência desse cenário foi igual a 1×10^{-5} que é uma frequência classificada como “improvável”. Segundo Análise Preliminar de Riscos esse cenário apresenta uma severidade “crítica”. Usando a Matriz Risco verifica-se que esse cenário apresenta um **risco aceitável**, não sendo necessário adicionar novas camadas de proteção.

Assim destaca-se que o resultado da LOPA para esse cenário indicou que as proteções estão atendendo aos critérios de tolerabilidade de risco e não é necessário adicionar mais camadas. O cenário considerado anteriormente inaceitável pela metodologia APR passou a ser aceitável.

➤ Cenário 4

A partir da aplicação da metodologia LOPA foi possível calcular que a frequência desse cenário é de 1×10^{-5} . Da APR obteve-se uma estimativa para severidade da classe “catastrófica”. Através da Matriz Risco diagnostica-se que esse cenário apresenta um **risco moderado**, não sendo compulsório adicionar novas camadas de proteção.

O cenário atende de “forma moderada” aos critérios de tolerabilidade de risco. Discussões sobre novas camadas de proteção mostram-se recomendadas, embora não obrigatórias. O conceito de ALARP (risco tão baixo quanto possível) deve ser empregado. Ressalta-se porém que a redução da frequência pra 1×10^{-6} pode mostrar-se inviável economicamente. Reduções na severidade podem ser mais adequadas.

➤ Cenário 5:

A frequência desse cenário obtida via LOPA foi de 1×10^{-5} , enquanto sua severidade é classificada como “crítica”. Esse cenário apresentou um **risco aceitável**, não sendo necessário adicionar novas camadas de proteção.

➤ Cenário 6:

A frequência calculada para esse cenário também foi de 1×10^{-5} que é uma frequência da classe “improvável”. A partir da APR estimou-se uma severidade na classe “catastrófica”. Através da Matriz Risco observa-se que esse cenário apresenta um **risco moderado**, não sendo obrigatório adicionar novas camadas de proteção, embora uma maior discussão sobre o cenário seja recomendada.

➤ Cenário 7:

A frequência desse cenário foi igual a 1×10^{-4} (frequência da classe “remota”), e uma severidade da classe “moderada”. Via Matriz Risco o cenário mostra ter **risco aceitável**.

Para a maioria dos cenários foi possível observar uma diferença no grau de frequência obtido pela APR e pelo LOPA. Esse fato deve-se a técnica APR ser puramente qualitativa, baseada na opinião e experiência da equipe responsável pela elaboração do estudo. Essas características tornam a APR mais subjetiva, enquanto a LOPA apresenta-se baseada em valores numéricos, reduzindo sua subjetividade mas não necessariamente contribuindo para estimativas melhores. Os números empregados precisam ser adequados para a realidade da planta em estudo. O uso de estatísticas inadequadas, que reflitam outras condições operacionais e mesmo de manutenção, pode resultar em dados numéricos de aparente exatidão, mas profundamente inadequados.

7. Conclusão

A partir do desenvolvimento deste estudo ficou clara a importância da realização conjunta das metodologias APR-LOPA, de forma a contribuir e facilitar a avaliação dos riscos envolvidos em uma planta. Ao realizar os dois processos de maneira integrada, mais fácil se torna o acoplamento entre os resultados dos dois métodos. Aumentando conseqüentemente a eficiência das ferramentas.

Ressalta-se ainda que a principal contribuição da metodologia LOPA é a sua vertente quantitativa aos resultados do APR, caracterizando se as salvaguardas especificadas ou existentes são suficientes para atingir o nível de risco exigido. A partir dos resultados, caso as salvaguardas já existentes não sejam suficientes, a metodologia é capaz de determinar até que ponto são necessárias novas camadas de proteção.

Complementarmente, nesse trabalho foi observada a importância de um profissional experiente para estimar não apenas os cenários, causas e conseqüências empregadas no APR, mas também na verificação das frequências da causa iniciadora e as probabilidades de falha na demanda usadas no LOPA. Esses dados são importantes para a execução do LOPA e infelizmente revelam-se difíceis de serem encontrados para todas as situações necessárias. Portanto, um profissional com um maior conhecimento do processo poderia ter uma avaliação mais profunda deste e fornecer dados mais próximos da realidade.

Outro desafio foi a caracterização das salvaguardas como sendo ou não “IPL”. A caracterização implica em uma análise mais profunda e específica do processo em questão, que muitas vezes apenas especialistas da área são capazes de identificar.

A aplicação das técnicas de análise de risco para um terminal de regaseificação revelou que plantas operando produtos perigosos demandam avaliação cuidadosa dos riscos. A simples abordagem qualitativa, propiciada pelo APR, pode não ser suficientemente precisa para definir se os cenários ultrapassam ou não o nível risco tolerado. O manual de análise de riscos emitido pela CETESB aponta em direção semelhante, ao indicar métodos de análise quantitativa para empreendimentos com níveis de riscos mais elevados.

Por último, o aumento da participação do gás natural na matriz energética mundial, assim como a demanda energética total, contribui para o desenvolvimento de toda a cadeia do petróleo e do gás natural – com conseqüentemente o aumento do volume transportado em terminais de regaseificação por todo mundo. Neste ambiente fica evidente a importância da análise de risco nesses grandes empreendimentos, garantindo que operem de forma mais segura possível.

8. Referências bibliográficas:

AGUIAR, L. A. *Metodologias de Análise de Riscos APP & HAZOP*. Rio de Janeiro.

ALMEIDA, A.C.C. *Introdução às boas práticas de Engenharia Aplicadas à Gestão dos Sistemas Instrumentados de Segurança: Uma Abordagem de SIL*. Risk and Reliability Senior Consultant DNV Energy Solutions. Certified Functional Safety Engineer.

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 deligamento de um reator nuclear*. Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de engenharia da UFRJ. Abril,2007

ABIQUIM – Programa de Atuação Responsável.

CALDARA, J.A., FARIAS, P.I.V., TORRES, R.C., *Aplicação de Metodologia de Integração LOPA / HAZOP em Sistema de Gás Combustível Offshore*. Projeto Final de curso em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Dezembro 2012.

CARVALHO, E.C. *Avaliação Técnica-Econômica do Armazenamento, Transporte e Regaseificação do Gás Natural Liquefeito*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo,2008.

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

CCPS, *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes*. American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 1993.

CETESB, Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos. Norma técnica. P.4261. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos> /Emeg%C3%AAncias-Qu%C3%ADmicas/12-Grandes-Acidentes>

COSTA, P. *O Maior Acidente da refinaria Duque De Caixas (RJ) – BRASIL: Um Estudo Geográfico-Histórico*. Revista Geográfica de América Central. Número Especial EGAL, 2011- Costa Rica II Semestre 2011 pp. 1-11.

COUTINHO, C. A. *Análise e Gerenciamento de Riscos de Processos Industriais*. Pós- graduação em engenharia de segurança, UFF.

CROWL, D. A., LOUVAR, J. F. *Chemical process safety: fundamentals with applications*. USA: Prentice Hall, 2002.

CORREIA, L.C, DIAS, P.F. *Avaliação teórica da aplicabilidade da metodologia LOPA fatores humanos*. Curso de especialização em engenharia de segurança do trabalho. Salvador,2009.

DE CICCO, A.F, FANTAZZINI, M.L., *Tópicos especiais de gerência de riscos*. v. 1-6. São Paulo: ITSEMAP do Brasil, 1994.

EASTON, C. *The Application of Layers of Protection Analysis Technique in the Process Industries*. ProSalus Limited – United Kingdom. 10th International TÜV Rheinland Symposium – May, 2012.

Greenpeace, Disponível em : <http://www.greenpeace.org.br/bhopal/docs/Bhopal_desastre_continua.pdf>

IEC 61511-3-"*Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector*"

IKEDA, N. H., MARTINS, M.R., SOUZA, G. F. M., Análise Preliminar de Perigos aplicada a Navios Transportadores de Gás Natural Liquefeito (GNL). 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro, Outubro de 2010.

JUNG, M., CHO, J. H., RYU, W. *LNG terminal design feedback from operator's practical improvements*. 22nd World Gas Conference. Tokyo, 2003.

KLERTZ, T. A, *Learning from Accidents in Industry* Butterworths, London, U.K., 1991.

LASSEN, C.A. *Layer of protection analysis (LOPA) for determination of safety integrity level (SIL)*. Aker Solutions. The Norwegian University of Science and Technology Department of Production and Quality Engineering June 2008.

LEE, C.J, LIM, Y, PARK, C, et all. *Synthesis of Unloading Operation Procedure for a Mixed Operation of Above-Ground and In-Ground Liquefied Natural Gas Storage Tanks Using Dynamic Simulation*. School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea, 2010.

MACHADO, M.A, Lopes, M.T, *CIPA – Comissão Interna de Prevenção de Acidentes NR 5*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

MENDONÇA, R.A. *Sistema de Gestão de segurança e saúde ocupacional em micro e pequenas empresas: Um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro*. Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química. Dissertação de Mestrado. 2011.

MUNIZ, T. P. *Gerenciamento de Riscos, uma ferramenta básica de segurança: Estudo prático em uma unidade marítima de exploração de hidrocarbonetos*. Projeto Submetido ao corpo docente ao curso de engenharia ambiental da UFRJ. Fevereiro 2011.

PASCON, P.E. Disponível em: <http://www.processos.eng.br/Portugues/PDFs/flixborough_25_anos.pdf >

PIRES, B. O. R. *Análise de Confiabilidade de um Terminal de Regaseificação de Gás Natural Liquefeito*. Projeto Final de curso em Engenharia Química Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Abril 2012.

SAUER, M. E. L. J. *Análise dos Procedimentos de Partida do Reator IEA-R1- Uma Aplicação da técnica HAZOP*. Autarquia Associada a Universidade de São Paulo. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear. São Paulo, 2000.

SOARES, V. B. *Análise Crítica das Camadas de Proteção Exigidas pela NR 13 e sua Adequação para Processos de Extração Supercrítica*. Programa de pós-graduação em Engenharia Química, 2010.

SOUZA, E. A. *O Treinamento industrial e a gerência de riscos – uma proposta de instrução programada*. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia. Florianópolis, Setembro 1995.

SUMMERS, A. E. *Introduction to Layers of Protection Analysis*, Journal of Hazardous Materials, v.104, 2003.

VASCONCELLOS, F. M. *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*. Dissertação submetida à Universidade Federal do Rio De Janeiro para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Nuclear. Rio de Janeiro, Março 2008.

YOUNG, G. G., CROWE, G. S. *Modifying LOPA for Improved Performance*. Glenn Young & Associates, LLC PSM Consulting. Louisiana, 2006.