

**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola de Química**

**Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos**



Bibiano Winter Afonso

Dissertação de Mestrado

**Metodologia Para Quantificação de Erros
Humanos na Indústria de Processos**

Orientador

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Co-orientador

Salvador Ávila Filho, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril de 2015

METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DE ERROS HUMANOS NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS

Bibiano Winter Afonso

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientador

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Co-orientador

Salvador Ávila Filho, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril de 2015

Afonso, Bibiano Winter

Metodologia para quantificação de erros humanos na indústria de processos /
Bibiano Winter Afonso, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.
xvi, 67p.

(Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientador: Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini

Co-orientador: Salvador Ávila Filho

1. Erros Operacionais. 2. Avaliação de confiabilidade. 3. Confiabilidade Humana. 4.
Dissertação. (Mestrado – UFRJ/EQ). 5. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa I.

METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DE ERROS HUMANOS NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS

Bibiano Winter Afonso

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado por:

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
(orientador – presidente da banca)

Salvador Ávila Filho, D.Sc.
(Co-orientador)

Ana Mehl, D.Sc.

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, D.Sc.

Rio de Janeiro

Abril de 2015

A minha esposa, Danielle

Por seu interesse e dedicação, me incentivando a finalizar o mestrado.

AGRADECIMENTOS

- A minha Filha Violeta que me deu um grande incentivo para finalizar esta etapa da minha vida;
- A meu pai, Carlos Afonso, se estou concluindo este trabalho é graças a você, obrigado por tudo;
- A meu orientador Fernando Pellegrini e co-orientador Salvador, pelas orientações, e ajuda em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho;
- Ao apoio financeiro do CNPQ durante uma fase da minha vida onde seu apoio foi fundamental.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DE ERROS HUMANOS NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS

Bibiano Winter Afonso
Abril, 2015

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Prof. Salvador Ávila Filho, D. Sc.

Atualmente, a realização de análises de risco como, HAZOP e APR é comum para atender à legislação e projetar medidas de prevenção de acidentes na indústria. Estas técnicas são associadas a metodologias qualitativas com o objetivo de prever a frequência e a severidade de um determinado evento acidental.

A confiabilidade do operador na realização da tarefa influencia na definição do sistema de automação; portanto, afetando diretamente o custo da instalação industrial, instrumentos e equipamentos mais confiáveis (a prova de falha) geram custo que se dividem em custo de aquisição e de manutenção. Dependendo da dimensão de uma dada instalação os custos para aquisição de equipamentos são diluídos; porém, custos de manutenções preventivas e programadas são periódicos e constantes.

Este trabalho visa revisar a metodologia de SPAR-H (avaliação de confiabilidade humana simplificada), aprimorando os seus fatores de desempenho; e aplicar a um estudo de caso SPAR-H associado a técnicas estabelecidas de avaliação qualitativa e quantitativa de risco.

A metodologia revisada de SPAR-H foi aplicada juntamente com a metodologia clássica, desta forma pode-se observar q a metodologia SPAR-H fornece resultados de probabilidade de falha bem maiores que os aplicáveis a indústria de processo; porém a metodologia revisada fornece resultados mais próximos da realidade da indústria química.

Abstract of a Thesis presented to Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - EQ/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Technology of Chemical and Biochemical Processes.

METHODOLOGY FOR QUANTIFICATION OF HUMAN ERROR IN PROCESS INDUSTRY

Bibiano Winter Afonso
April, 2015

Supervisor: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Prof. Salvador Ávila Filho, D. Sc.

Currently, conducting risk analyzes as HAZOP and APR is common to meet legislation and designing accident prevention measures in the industry. These techniques are associated with qualitative methods aiming to predict the frequency and severity of a particular accident event.

The reliability of the operator in carrying out the task influences the definition of the automation system; therefore directly affecting the cost of industrial facility, instruments and more reliable equipment (Fail a) generate costs that are divided into cost of acquisition and maintenance. Depending on the size of a given installation costs for the acquisition of equipment are diluted; however, preventive and scheduled maintenance costs are periodic and constant.

This work aims to review the methodology of SPAR-H (Standardized Plant Risk HRA Method), improving its performance factors; and apply a SPAR-H in a case study, associated with established techniques of qualitative and quantitative risk assessment.

The reviewed SPAR-H was applied with the classic method thus it can be seen that classic technic provides results a lot higher than what is applied in industry; revised methodology provides results closer to the reality of the chemical industry.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A AVALIAÇÃO DE RISCO NA IDENTIFICAÇÃO DE CAUSAS DE ACIDENTES	1
1.1.1 GRANDES ACIDENTES INDUSTRIAIS E FATORES HUMANOS	4
1.2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 SEÇÕES DA DISSERTAÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE HUMANA	10
2.1.1 THERP	10
2.1.2 HEART	10
2.1.3 ÁRVORE DE FALHAS	11
2.1.4 SHARP1	14
2.1.5 MATRIZ DE CONFUSÃO	15
2.1.6 CREAM	16
2.1.7 SPAR-H	16
2.2 LOPA	17
2.2.1 APLICAÇÃO	17
2.3 HAZOP	18
2.3.1 MATRIZ DE RISCO	19
3 METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO ..	22
3.1 METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE EVENTOS ACIDENTAIS (HAZOP +MATRIZ DE RISCO)	22
3.2 METODOLOGIA LOPA	25
3.3 METODOLOGIA SPAR-H	30
3.3.1 PROPOSTAS DE MUDANÇA E MELHORIA DA METODOLOGIA	32
4 Estudo de Caso – Dutos e Terminal de entrega e recebimento de petróleo e derivados	38
4.1 – DESCRIÇÕES DAS INSTALAÇÕES	38
4.2 – FLUXOGRAMAS DE ENGENHARIA SIMPLIFICADOS E AVALIAÇÃO DE HAZOP + MATRIZ DE RISCO + SPAR-H + LOPA	39
4.2.1 RECEBIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE PETRÓLEO BRUTO	40
4.2.2 EXPEDIÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE DIESEL	52
5 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO A	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Simbologia da árvore de Falha.....	12
Figura 2. 2 - Exemplo de árvore de falha.....	13
Figura 2. 3– Algoritmo do método básico CREAM	16
Figura 2. 4 – Esquema do HAZOP	18
Figura 2. 5 – Exemplo de Matriz de Risco	21
Figura 3. 1 – Diagrama Associação HAZOP, SPAR-H e LOPA.....	22
Figura 3.2 – Algoritmo LOPA.....	27
Figura 3. 3 – Influências na Probabilidade de Falha.....	31
Figura 3. 4 – Esquema simplificado do Bombeamento de propeno.....	35
Figura 4. 1 – Diagrama de blocos das instalações	39
Figura 4. 2– Fluxograma Petróleo simplificado.....	41
Figura 4. 3 – Fluxograma Diesel simplificado	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1: Modelo de planilha de HAZOP com Matriz de Risco.....	24
Tabela 3. 2: Modelo de planilha de LOPA.....	28
Tabela 3. 3: Comparação entre severidade e frequência tolerável	29
Tabela 3. 4: Fatores de redução de risco e SIL (nível de segurança).....	30
Tabela 3. 5: Comparação valores de PSF SPAR-H	33
Tabela 4. 1: Planilhas de HAZOP sistema de petróleo.	42
Tabela 4. 2: Valores de PSF selecionados para avaliação conforme entrevista aos operadores balizados pela API 770, e demais questionamentos referentes ao estilo de operação.	44
Tabela 4. 3: Aplicação de LOPA PSL-001.....	46
Tabela 4. 4: Aplicação de LOPA PSL-001 (Continuação)	47
Tabela 4. 5: Aplicação de LOPA FSL-001.....	48
Tabela 4. 6: Aplicação de LOPA FSL-001(Continuação)	49
Tabela 4. 7: Aplicação de LOPA PSH-002	50
Tabela 4. 8: Aplicação de LOPA PSH-003	51
Tabela 4. 9: Planilhas de HAZOP sistema de diesel.	54
Tabela 4. 10: Aplicação de LOPA PSL-001	56
Tabela 4. 11: Aplicação de LOPA FSL-001.....	57
Tabela 4. 12: Aplicação de LOPA FSH-002.....	58
Tabela 4. 13: Aplicação de LOPA PSH-002	59
Tabela 4. 14: Aplicação de LOPA PSH-003	60
Tabela 4. 15: Resultados (RRF).....	61
Tabela A. 1: Palavras-Guia e suas descrições.....	66
Tabela A. 2: Exemplo de desvios mais comuns de HAZOP	66

LISTA DE SIGLAS

LOPA	Layer of Protection Analysis
CCPS	Center for Chemical Process Safety
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction
ASEP	Accident Sequence Evaluation Program
SHARP1	Systematic Human Action Reliability Procedure 1
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method
SPAR-H	Standardized Plant Risk HRA Method
HRA	Human Risk Analysis
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
HAZOP	Hazard and Operability Studies
APR	Avaliação Preliminar de Risco
PEH	Probabilidade de Erro Humano
SNL	Sandia National Laboratories
EPC	Error Producing Conditions
APOA	Assessed Proportion Of Affect
AA	Assessed Affect
IEC	International Electrotechnical Commission
ICEF	International Federation of Chemical, Energy, and General Workers Unions.
ICFTU	International Confederation of Free Trade Unions
ISO	International Organization for Standardization
LODA	Dependent Layers of Operation Decision Assessment
SHARP1	Systematic Human Action Reliability Procedure
SIS	Safety Instrumented System
SIL	Safety Integrity Level
SIF	Safety Instrumented Function

PSF

Performance Shaping Factor

1 INTRODUÇÃO

Diversas pesquisas indicam que erros humanos são as principais causas de acidentes industriais (Liu et al, 2009). Esse problema está se intensificando conforme o operador se encontra cada vez mais, sobrecarregado de informações, o seu papel passou a um mero espectador do sistema de controle de processos, (registrando informações em relatórios) perdendo a habilidade de tomar decisões complexas (Ávila, S. F. et al, 2013).

A caracterização de erro humano depende, principalmente, de uma definição clara do comportamento ou resultado esperado para uma determinada tarefa. De maneira geral, o termo *erro humano* pode ser utilizado quando uma sequência de atividades (físicas e/ou mentais) falha em relação ao resultado esperado (Reason J, 1990).

A quantificação de erros humanos ajuda a avaliar o impacto dos operadores em instalações industriais existentes ou futuras (instalações em fase de projeto), e os resultados podem ser utilizados para justificar a alocação de recursos para treinamentos adicionais, melhoria de condições de trabalho e demais fatores que influenciam o desempenho humano.

No decorrer desta dissertação, são citados e descritos diversos fatores que influenciam o desempenho do ser humano (operador): tempo disponível, carga de estresse, interface homem-máquina, treinamento, relações de trabalho, entre outros. Alguns dos fatores indicados podem impactar de forma positiva ou negativa, dependendo de características da organização.

1.1 A avaliação de risco na identificação de causas de acidentes

Os métodos de avaliação de risco utilizados, na atualidade, dividem-se, principalmente, em metodologias com raízes matemáticas (probabilísticas) e metodologias que procuram identificar possíveis causas para cenários acidentais ou danos à saúde (Covello *et al*, 1985). Muitas das ferramentas que foram desenvolvidas estão listadas em normas internacionais, a tomar como exemplo diversas normas da ISO (International Organization for Standardization – Organização Internacional para Padronização). Embora as metodologias possuam objetivos diferentes (enquanto uma procura quantificar a probabilidade, a outra

procura apenas identificar o cenário), são metodologias que são utilizadas em conjunto (em série ou em paralelo).

Algumas definições e conceitos são comuns a todos os estudos de avaliação de risco (constam em normas), são definições básicas e fundamentais para compreensão das metodologias e avaliação dos resultados:

Perigo – É o potencial de causar danos (International Organization for Standardization, 2000), seja de uma instalação industrial ou até mesmo equipamentos do dia a dia do homem;

Probabilidade de ocorrência de evento perigoso – É a chance de um evento perigoso acontecer, expressa em número de eventos por unidade de tempo (International Organization for Standardization, 2000);

Risco – É uma medida criada a partir da combinação entre o impacto de um evento acidental e a sua probabilidade de ocorrência (International Organization for Standardization, 2000);

Acidente/incidente – É um evento ou cadeia de eventos que pode ou tem a possibilidade de causar danos a pessoas, doença, danos a patrimônio ou ao meio ambiente (International Organization for Standardization, 2000);

Causa – É o fato que iniciou a cadeia de eventos que levou a um acidente ou um incidente;

Consequência – É a consequência do evento acidental, danos a patrimônio ou a pessoas, danos financeiros etc;

Cenário – O cenário é o par causa-consequência, descrito durante o desenvolvimento da avaliação de risco.

Na atualidade, a realização de estudos de avaliação de risco é requisito básico encontrado em muitas legislações vigentes, em normas de sociedades certificadoras (empresas que fornecem certificação como: ISO 9001, ISO 14001 etc) e também para agências de seguro. Algumas metodologias qualitativas de identificação de risco como o HAZOP (Hazard e Operability Studies – Estudo de Perigo e Operabilidade) e a APR (Análise Preliminar de Risco) são utilizadas em

larga escala na indústria, enquanto, no lado quantitativo, temos o LOPA (Layer Of Protection Analysis – Análise de Camada de Proteção). Conforme descrito no texto, tais metodologias são utilizadas em conjunto, enquanto uma identifica os cenários, a outra tenta quantificar a probabilidade de ocorrência.

Durante a avaliação probabilística de um cenário, faz-se necessário estimar a probabilidade de uma determinada falha. Existem diversas tabelas de probabilidade de falha de equipamentos, essa probabilidade de falha deriva de dados estatísticos de determinado equipamento. Organizações internacionais fornecem dados de falha de equipamentos, também não é incomum o próprio fabricante informar a taxa de falha de um dado equipamento, contudo, na maioria dos cenários acidentais, temos como causa iniciadora a falha humana. Para estimar a falha humana, existem diversas tabelas e técnicas, porém tal procedimento é restrito a alguns setores da indústria.

Ainda existe muito espaço para desenvolvimento na área de probabilidade de erro humano. O CCPS (Center for Chemical Process Safety – Centro para Segurança de Processos Químicos) em 2001 indicou uma faixa de probabilidade de falha do operador em executar procedimento de rotina, assumindo operador treinado, sem estresse, e descansado de 10^{-1} a 10^{-3} por oportunidade (CCPS, 2001); um erro a cada dez operações a um erro a cada mil operações; uma faixa bastante extensa, mas que ajuda a balizar valores extremos.

No exemplo específico da metodologia LOPA, utilizado na metodologia desta dissertação, é possível verificar que dados para falha humana estão expressos em falhas por oportunidade, enquanto falhas de equipamento são expressas em falha por unidade de tempo. Dessa forma, para correta aplicação dos valores de falha humana no LOPA, faz-se necessário a identificação de quantidade de tarefas por unidade de tempo (normalmente um dado que deve vir da operação).

Avaliando os resultados de um estudo de LOPA, é possível identificar que a confiabilidade do operador na realização da tarefa influencia na definição do sistema de automação, portanto afeta diretamente o custo da instalação industrial. Instrumentos e equipamentos mais confiáveis (à prova de falha) geram custo que se dividem em custo de aquisição e de manutenção. Dependendo da dimensão de uma dada instalação, os custos para aquisição de equipamentos são diluídos, porém

custos de manutenções preventivas e programadas (ABNT NBR 5462, 1994) são periódicos e constantes, o que garante a confiabilidade de um dado equipamento ou instrumento.

Independentemente do nível de automatização de um sistema, o poder de julgamento e decisão do operador ainda são de grande importância, dessa forma, devem ser feitos esforços para identificar a probabilidade de falha do operador. De posse dos dados de falha do operador, é possível elaborar recomendações de melhoria da atividade proposta.

1.1.1 Grandes acidentes industriais e fatores humanos

A história está repleta de exemplos de acidentes industriais, tais acidentes geram um sentimento de desconfiança geral frente à segurança das atividades industriais (Llory *et al*, 2010). Esta seção apresenta exemplos de acidentes onde erros humanos foram fundamentais.

Union Carbide, Bhopal, Índia, 1984.

No dia 3 de dezembro de 1984, uma nuvem de metil isocianato (MIC) foi liberada, resultado de uma reação descontrolada na planta de pesticidas da *Union Carbide* em Bhopal na Índia, matando cerca de 2500 pessoas (Rice, 2006).

A *Union Carbide* afirma que o acidente foi causado por um funcionário insatisfeito (Browning, 1993). Em 1985, a Confederação Internacional dos Sindicatos Livres em conjunto com a Federação Internacional da Química, Energia e Sindicatos dos Trabalhadores emitiu um relatório (ICFTU/ICEF, 1985) citando os seguintes fatores como causa raiz do acidente:

- Atenção insuficiente em segurança de processo durante etapas de projeto;
- Procedimentos de operação perigosos e inadequados;
- Manutenção inadequada;
- Equipamentos apresentando falhas;
- Equipe reduzida;
- Treinamento inadequado;

- Falta de gerência e ação do governo frente a reclamações relacionadas à segurança;
- Construção de plantas químicas próxima a locais populosos;
- Falta de informação;
- Falta de planejamento de emergências.

O fato de a planta ser construída próxima a um centro populoso potencializou todos os danos.

Ambas as fontes convergem para causas relacionadas a fatores de erro humano, se o trabalhador agiu de forma intencional ou não é indiferente.

Nypro UK, Flixborough, Inglaterra, 1974.

Em primeiro de junho de 1974, ocorreu uma explosão na planta da *Nypro*, matando 28 e ferindo 36 pessoas (Ministry of the Environment, 2008).

Um reator em série foi substituído por uma tubulação que rompeu causando a explosão. A comissão que efetuou a investigação forneceu as seguintes causas para o acidente (Ministry of the Environment, 2008):

- A substituição do reator em série por uma tubulação não estava pautada em normas, adicionalmente nenhuma memória de cálculo foi elaborada prevendo essa modificação do projeto original. Foi uma falha humana, no nível de decisão da operação, gerada pelos seguintes fatores:
 - Procedimentos de operação perigosos e inadequados;
 - Manutenção inadequada;
 - Treinamento inadequado;
 - Falta de informação.

A descrição do acidente demonstra que falhas humanas aconteceram, em vários níveis de decisão (falha em treinamento, operação inadequada e perigosa), resultando na falha final de um equipamento (tubulação).

Three Mile Island nuclear reactor, Pensylvania, Estados Unidos, 1979.

Em um dos maiores acidentes da indústria de energia nuclear dos Estados Unidos, os operadores da instalação perderam o controle de pressão da parte nuclear da planta. Falhas em equipamentos e instrumentos impediram o rápido diagnóstico da operação o que resultou na ativação de uma válvula de alívio, que também falhou e se manteve aberta, o que resultou em vazamento de inventário radioativo (US NRC, 2014). Esse vazamento não causou danos, pois ocorreu dentro de uma área de contenção da planta nuclear.

A análise minuciosa desse acidente pode mostrar que falhas humanas ocorreram durante o desenvolvimento dos eventos, principalmente, em diagnóstico.

1.2 Técnicas de avaliação de risco e análise de confiabilidade humana

Entendendo a necessidade de prever a probabilidade da falha humana, diversas técnicas de ACH (Análise de Confiabilidade Humana) foram desenvolvidas. A primeira técnica elaborada foi o THERP (Swain, 1983), posteriormente, o HEART (Williams, 1985), e outras técnicas que serão descritas na seção 2 desta dissertação.

Em 2004, o livro com a metodologia do SPAR-H foi publicado (Gertman *et al*, 2004), apresentando uma metodologia simplificada e desenvolvida nos moldes de seus predecessores, porém com aplicação direta, o que facilita a sua utilização na avaliação de risco. Essa grande vantagem foi a motivação de utilizar a técnica neste trabalho, todavia, para aplicação correta na indústria de processos, certas adaptações de alguns fatores são necessárias.

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação é propor melhorias nos fatores de desempenho da metodologia SPAR-H e, dessa forma, refinar as métricas para estimar falhas dos operadores. Objetiva-se também aplicar a metodologia em conjunto com HAZOP e LOPA, em um estudo de caso real, e avaliar o quanto isto pode impactar nos requisitos de confiabilidade de um sistema.

O resultado esperado é uma métrica segura e confiável, que estime com a maior confiabilidade os erros operacionais associados a cenários de avaliação de risco.

1.4 Seções da Dissertação

A segunda seção contém uma revisão bibliográfica, que apresenta, em ordem cronológica, metodologias que foram desenvolvidas antes do SPAR-H, dessa forma mostra todo o desenvolvimento da área de confiabilidade humana até a técnica utilizada.

Na terceira seção, é feita uma descrição detalhada das técnicas que serão utilizadas no estudo de caso, demonstrando as modificações propostas no SPAR-H.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desempenho humano é um componente chave para muitos incidentes e acidentes da indústria (Gertman et al, 2004), diferentes setores tem maturidade diferente quando consideram a avaliação da falha humana (Ribeiro, 2012). Existe uma tendência geral de expor o trabalhador que reporta uma falha ou deslize (Swain e Guttman,1983). Por este motivo muitos eventos não são reportados por completo (erros são omitidos nos registros). Desta forma, tem-se uma grande escassez de dados sobre falha humana (Swain e Guttman,1983).

Desenvolvidas inicialmente para a indústria nuclear, as técnicas de análise de confiabilidade humana podem gerar resultados extremamente conservadores quando aplicadas na indústria de processos. O motivo principal deste desvio é que boa parte das metodologias existentes possuem grande influência da opinião dos especialistas (neste caso especialistas em indústria nuclear) na definição de fatores de desempenho (Gertman et al, 2004), cada metodologia possui uma tabela de fatores de desempenho e comparações podem ser realizadas.

Para qualquer avaliação de confiabilidade humana alguns passos básicos devem ser utilizados (Swain e Guttman,1983):

- 1) Definir as falhas de interesse, falhas que são influenciadas por fatores humanos;
- 2) Listar todas as tarefas de operação;
- 3) Estimar as probabilidades relevantes de erro;
- 4) Estimar os efeitos dos erros humanos no sistema;
- 5) Recomendar mudanças e recalcular probabilidades.

Esta seção tem como objetivo descrever as técnicas avaliação de confiabilidade humana que foram desenvolvidas, mostrando desta forma a evolução das metodologias (estado da arte), bem como suas vantagens e desvantagens. Nas seções 2.2 e 2.3 encontram-se definições básicas (e descrições) das técnicas LOPA e de HAZOP, que serão descritas na seção 3 onde se encontra a metodologia deste trabalho.

2.1 Técnicas de avaliação de confiabilidade humana

2.1.1 THERP

Criado no SNL (Sandia National Laboratories) em novembro de 1962, o THERP (Technique for Human Error Rate Prediction – Técnica para previsão de erro humano) é um método para prever a probabilidade de erro humano (PEH), através da avaliação da degradação de um sistema homem-máquina (Swain e Guttmann, 1983).

Conforme metodologia descrita em Swain e Guttmann (1983), uma das ferramentas básicas da técnica é a árvore de eventos, onde cada ponto de ramificação representa as duas opções viáveis (operador realizou tarefa corretamente ou incorretamente); a probabilidade de cada ramificação binária deve somar 1. As probabilidades de falha ou acerto são definidas conforme tabelas contidas no “handbook” da técnica.

É a técnica de ACH mais antiga, e por este motivo existem diversos exemplos de aplicação. Adicionalmente por possuir uma metodologia clara e normatizada, a mesma pode ser auditada (Bell and Holroyd, 2009).

A desvantagem principal do THERP é sua grande complexidade, existem diversos algoritmos que definem qual tabela deve ser utilizada para uma determinada tarefa de operação. A

Devido a sua complexidade, o tempo que deve ser gasto para uma avaliação completa pode ser elevado. A dinâmica atual da indústria acarreta na utilização de técnicas mais simples.

2.1.2 HEART

HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique - Técnica de redução e avaliação de erro humano) é uma técnica que calcula a probabilidade de falha de uma determinada tarefa genérica utilizando fatores que contabilizam condições que produzem os erros (EPC, Error Producing Conditions – condições de produção do erro). A técnica é baseada em uma grande base de dados de erro humano e considera que o desempenho do ser humano deteriora quando influenciado por um EPC (Williams, 1985).

O procedimento é simples: escolhe-se a tarefa básica que se enquadra na avaliação (dentre as 9 opções da técnica) e, desta forma, pode-se definir com isso é definido o PEH nominal da tarefa (Bell e Holroyd, 2009). Em seguida, são definidas as condições de erro dentre as 38 opções; as tabelas da metodologia informam um valor de probabilidade para cada EPC e o mesmo é associado a uma APOA (Assessed Proportion Of Affect – Proporção de efeito contabilizado), através da equação 2.1 é calculado o AA (Assessed Affect – Efeito contabilizado) que nada mais é que um fator que vai influenciar a probabilidade de erro humano nominal (PEH_N), a equação 2.2 demonstra o calculo da probabilidade de erro humano (PEH).

$$AA = (EPC - 1) \times APOA + 1 \quad 2.1$$

$$PEH = PEH_N \times \prod AA \quad 2.2$$

A aplicação da técnica é muito simples e rápida, e os resultados são diretos quanto à falha humana. Ao final dos cálculos a metodologia abre espaço para recomendações de melhoria, e estas melhorias podem ser contabilizadas nos cálculos (toda melhoria tem como objetivo a redução da probabilidade de ocorrência de um evento indesejado).

Existem diversas desvantagens com a aplicação desta metodologia, principalmente porque ela não leva em consideração a interdependência dos EPC, gerando a possibilidade de contabilizar duas condições comuns em um mesmo cálculo.

A dificuldade de encontrar a interdependência dos EPC's gera resultados inconsistentes, dois analistas podem encontrar resultados bem diferentes avaliando a mesma tarefa (Bell e Holroyd, 2009).

2.1.3 Árvore de Falhas

A metodologia da árvore de falha consiste em um diagrama lógico que representa as relações de falhas de vários elementos de um sistema. Inicialmente um determinado evento indesejado é selecionado (exemplo: um acidente). A partir deste evento são definidas todas as relações causais deste evento indesejado até os eventos de base. O diagrama lógico possui operadores E e OU, que definem como as probabilidades serão contabilizadas a partir dos eventos básicos (Stapelberg, 2009).

Existem diversos exemplos de identificação de fatores humanos no desenvolvimento de árvores de falhas, nas mais diversas operações e áreas de trabalho, os trabalhos de Furtado e May (2002) e Tetlow e Jenkin (2005) demonstram alguns exemplos.

Esta técnica não gera os valores das probabilidades de falha, apenas auxilia na identificação de causas raiz para um evento acidental. A metodologia pode ser associada a qualquer técnica existente de ACH, de uma forma similar à árvore de eventos descrita na THERP.

A Figura 2.1 e a Figura 2.2, apresentam respectivamente a simbologia básica (com os símbolos lógicos) para a técnica e um exemplo de evento avaliado pela técnica.

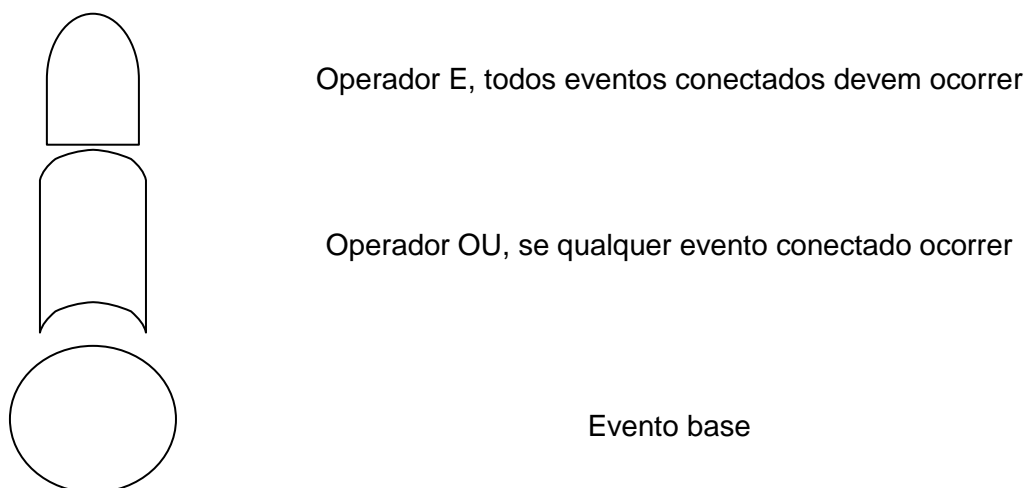


Figura 2. 1 - Simbologia da árvore de Falha
Fonte: Adaptado de ISO-IEC-31010 (2009).

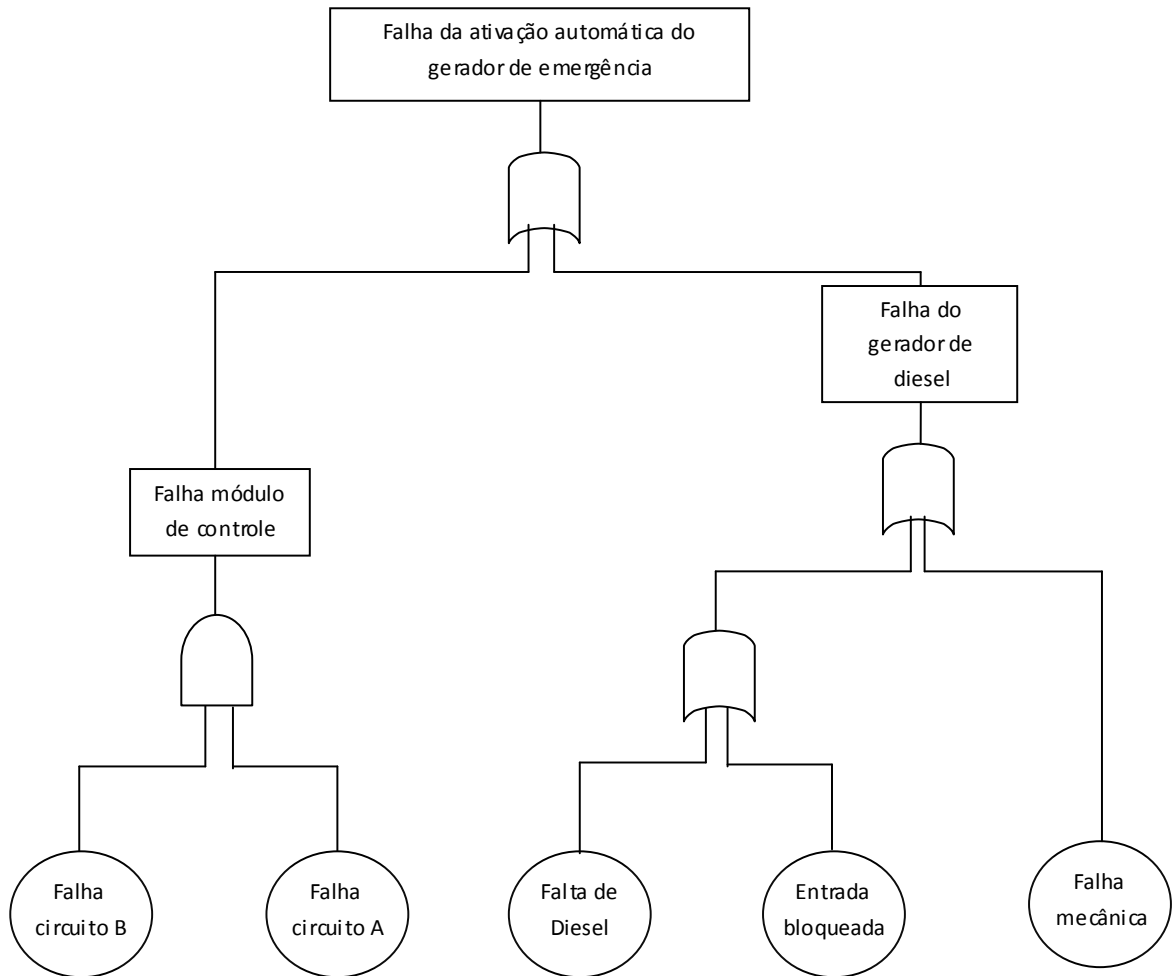


Figura 2. 2 - Exemplo de árvore de falha
 Fonte: Adaptado da ISO-IEC-31010 (2009).

É uma metodologia que identifica todas as causas raízes de um dado evento indesejado; para quantificar as probabilidades depende de valores de probabilidade de falha para estas causas iniciais, esta é a principal desvantagem quando utilizamos apenas esta técnica para consideração de fatores humanos.

A avaliação dos eventos gerados com a aplicação da metodologia é completa, porém consome muito tempo e a sua confiabilidade depende de uma equipe multidisciplinar e que também conheça muito bem todos os procedimentos e equipamentos do evento avaliado.

2.1.4 SHARP1

SHARP1 (Systematic Human Action Reliability Procedure – Procedimento sistemático de confiabilidade de ação humana) é uma técnica com foco especial na dependência e de interfaces com equipamentos, bastante similar à técnica de árvore de falha. A técnica foi dividida em quatro etapas, para facilitar sua aplicação (Wakefield. et al, 1990):

- 1) Construção do Modelo de lógica da instalação;
- 2) Quantificação;
- 3) Análise de ações de recuperação;
- 4) Revisão interna.

A etapa 1 se concentra na identificação de todas as ações humanas na instalação e integra estas ações no modelo de lógica. Na etapa 2 é quantificada a probabilidade de erro humano nas tarefas definidas. Na terceira etapa são identificadas outras ações humanas que não foram incluídas na primeira etapa, pois não constam em procedimentos, e a última etapa é uma avaliação do procedimento para evitar inconsistências (Wakefield et al, 1990).

Existem diversos métodos para obtenção de dados de falha humana (para utilização nesta técnica), como por exemplo:

- 1) Utilizar bases de dados para falha humana (literatura);
- 2) Julgamento de especialistas – Criação de escalas e correlacionar às taxas de falhas as respostas dos especialistas;
- 3) Simulações por Monte Carlo – Dados de atividades são inseridos em rotinas computacionais até obter uma base de dados estatística volumosa o suficiente para prever a taxa de falha em uma tarefa.

As vantagens e desvantagens são similares a árvore de falha.

2.1.5 Matriz de Confusão

As usinas nucleares são dotadas de um tempo de autarquia de 30 minutos, durante o qual elas se protegem automaticamente, após este tempo os operadores, seguindo procedimentos apropriados, assumirão o controle. Este tempo é utilizado para diagnosticar o evento indesejado.

O maior foco desta técnica é o diagnóstico de eventos indesejados. A técnica foi desenvolvida para determinar a probabilidade de um operador diagnosticar incorretamente um evento acidental (Potash *et al*, 1981).

No decorrer da aplicação da técnica são investigados acidentes com causas similares, que podem causar confusão no diagnóstico da operação.

A matriz é elaborada colocando os desvios (também descritos como sintomas, que podem ser aplicáveis a diversos cenários acidentais) na coluna vertical e na coluna horizontal os acidentes. Várias matrizes podem ser desenvolvidas para cada etapa de resposta aos desvios; após a elaboração, os analistas adicionam as probabilidades de cada desvio acontecer (este item pode ser adicionado utilizando alguma base de dados ou a própria experiência da equipe).

O resultado é a probabilidade de diagnóstico incorreto considerando eventos similares.

Esta técnica traz um novo conceito de avaliação do diagnóstico do operador, e pode ajudar a representar diversos erros que não foram considerados em outras técnicas; porém é uma técnica que depende da fonte dos dados de falha cedidos pela equipe, e apenas define erros de diagnóstico do operador.

2.1.6 CREAM

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method – Método de análise cognitivo de erro e confiabilidade) é uma técnica bidirecional; os princípios podem ser aplicados em uma análise retrospectiva dos resultados (Hollnagel, 1998). O Algoritmo da Figura 2.3 indica as etapas básicas da técnica.

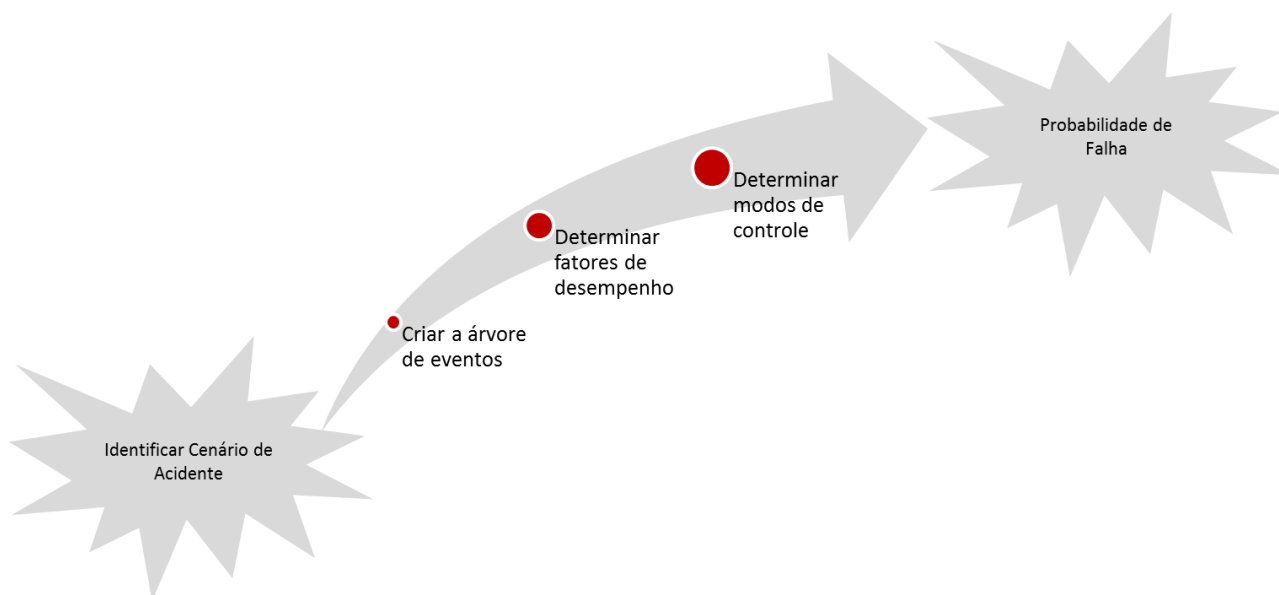


Figura 2. 3– Algoritmo do método básico CREAM
Fonte: Adaptado de E. Hollnagel, 1998.

Assim como diversas ferramentas de ACH, esta metodologia também utiliza a criação de árvores de evento.

Similar às técnicas de THERP e HEART. O trabalho de Gertman (2004) faz uma comparação de todos os fatores multiplicadores para a identificação de PEH, incluindo os valores para CREAM. As vantagens e desvantagens são similares aos demais métodos, variando obviamente os valores dos fatores de desempenho.

2.1.7 SPAR-H

Assim como seus predecessores, utiliza a árvore de eventos. A metodologia divide entre dois tipos de tarefas, ação e diagnóstico, e cada uma delas recebe influência dos fatores que afetam desempenho.

No capítulo 3 será feita uma descrição da metodologia de forma mais completa, bem como as propostas de modificação nos fatores de desempenho (PSF – Fatores de performance).

2.2 LOPA

A crescente preocupação com segurança nas atividades industriais fez com que as empresas e os grupos industriais desenvolvessem normas próprias para a construção e a manutenção do que chamaram de SIS (safety instrumented system - sistema instrumentado de segurança); o sistema instrumentado de segurança consiste em conjunto de elementos iniciadores (instrumentos), processadores de lógica e elementos finais (atuadores, equipamentos, entre outros) que tem como objetivo levar o sistema a um estado seguro (CCPS, 2001).

Para a criação do SIS, um dos dados de entrada mais importantes é a informação sobre a probabilidade de falha exigida para cada SIF (função instrumentada de segurança). O SIL (safety integrity level – nível de segurança integrado) representa o nível confiabilidade de uma dada malha do sistema de segurança (CCPS, 2001).

O princípio básico da metodologia é a avaliação das camadas de proteção de um determinado sistema; para cada camada é fornecido um valor de probabilidade de falha, e ao final do cálculo é avaliado se o sistema tem uma probabilidade de falha menor que a probabilidade requerida.

2.2.1 Aplicação

O LOPA é um método semi-quantitativo que leva em conta reduções de risco por outras camadas de proteção diferentes do SIS, permitindo avaliações mais consistentes dos cenários e produzindo uma documentação mais completa.

Isto é feito atribuindo-se valores numéricos às frequências das possíveis causas iniciadoras e às probabilidades médias de falha na demanda de cada camada de proteção existente, e comparando-se o valor do risco assim obtido com o valor pré-estipulado de frequência tolerável (CCPS, 2001). A Frequência da Consequência é dada pelo produto dos valores definidos, sem creditar nenhuma redução de risco a SIF (função instrumentada de segurança).

Se o risco estimado para um cenário não for tolerável, outras camadas de proteção devem ser adicionadas, a fim de se atingir a redução de risco necessária. A 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 risco requerida.

É importante lembrar que o LOPA não define cenário nem o nível dos impactos; isto deve ser previamente definido através de outras metodologias de avaliação de risco (HAZOP, APR, etc).

Os resultados do LOPA são semi-quantitativos e dependentes dos valores de probabilidade de falha fornecidos na literatura (falha humana, falha de equipamentos), ou em referências específicas de cada empresa.

2.3 HAZOP

O HAZOP é uma técnica que tem como objetivo a identificação de desvios de operação de determinados pontos do sistema (denominados “nós” a serem estudados). A técnica se utiliza de palavras-guia (tais como: “mais”, “menos”, “não”, “nenhum”, “outro que”) e parâmetros de processo (vazão, temperatura, pressão) que, quando combinados formam os desvios de operação (Dunjó et al, 2008). A Figura 2.4 ilustra o processo de HAZOP, que consiste em avaliar desvios da operação normal. A técnica se concentra em desvios com potencial de causar acidentes, outros desvios sem consequência podem ser encontrados e registrados para informação.

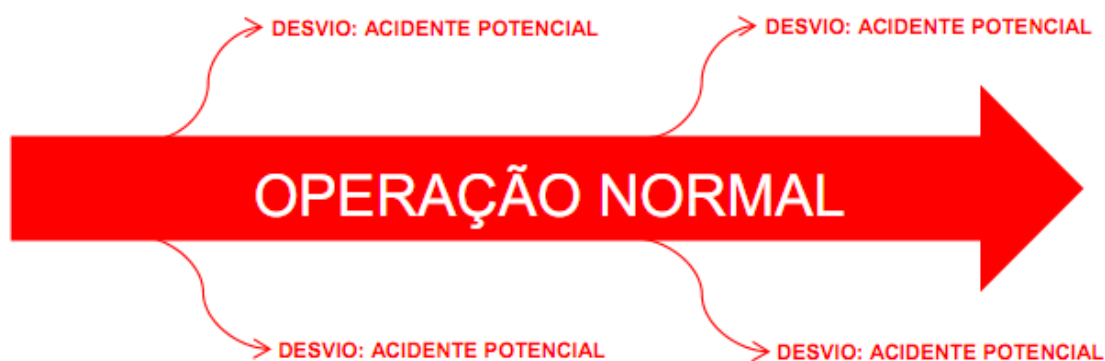


Figura 2. 4 – Esquema do HAZOP

Depois que a equipe do HAZOP identifica os desvios, é feita a determinação dos pares causa-consequências de um dado desvio e, desta forma, é definido o cenário que será transportado para o LOPA ou para qualquer metodologia de análise de confiabilidade.

É uma técnica extremamente útil para identificar qualquer tipo de falha em um determinado sistema (BS IEC 61882, 2001). A aplicação da técnica é bastante variada, podendo ser aplicada também a procedimentos operacionais, tendo como

resultados a identificação de falhas de procedimento e recomendações de melhorias. Independente da forma que o HAZOP é aplicado, é bastante comum identificar diversas possíveis falhas de operadores.

Por se tratar de uma técnica antiga diversas adições e melhorias foram feitas, no quesito de erros humanos pode-se citar a técnica do HAZOP social (Ávila *et al*, 2013) que pode ser aplicada logo após um HAZOP clássico (HAZOP de processo, realizado sobre informações técnicas).

O HAZOP social também separa os sistemas em seções; porém, são seções sociais que representam o grupo de operadores. O foco da avaliação é o comportamento dos operadores, suas palavras guias são norteadas por fatores humanos como: níveis de competência, qualidades psicológicas da equipe, tecnologia apropriada, ambiente organizacional, entre outros (Ávila *et al*, 2013).

O HAZOP clássico ou mesmo o social geram recomendações de melhorias ao sistema avaliado. A eficiência das melhorias depende principalmente do líder e da equipe do estudo, bem como das premissas adotadas. Recomendações genéricas sobre treinamento adicional ou melhorias organizacionais (ambiente de trabalho), podem não gerar resposta da companhia (ação), dependendo exclusivamente a cultura da organização.

2.3.1 Matriz de Risco

Durante o HAZOP ainda existe a possibilidade de associar mais uma técnica, de avaliação qualitativa de risco, a técnica normalmente utilizada é a matriz de risco.

A Figura 2.5 apresenta um exemplo de matriz de risco com base em norma internacional ISO-17776 (2000); cada companhia possui seu modelo de matriz de risco.

Com a matriz de risco é possível classificar o risco como tolerável, moderado ou não tolerável.

Conforme ISO-17776 (2000) são definidos os impactos para 4 categorias:

- Pessoas – Pessoal da instalação ou áreas próximas;
- Patrimônio – Equipamentos da empresa ou simplesmente parada de produção (continuidade operacional)

- Meio Ambiente – Todo e qualquer dano ao sistema ecológico próximo a instalação do estudo.
- Reputação – Reputação da companhia frente a clientes, funcionários, população local, mídia nível nacional ou internacional.

					FREQUENCIA TOLERÁVEL (EVENTOS/ANO)					
					A (EXTREMAMENTE REMOTA)	B (REMOTA)	C (RARO)	D (POSSÍVEL)	E (FREQUENTE)	
					1 E-1	1 E-2	1 E-3	1 E-4	1 E-5	
PESSOAS	PATRIMÔNIO	MEIO AMBIENTE	REPUTAÇÃO							
IMPACTOS	CASOS DE PRIMEIRO SOCORROS COM EFEITOS LIMITADOS OU NENHUM DANO A SAÚDE	DANOS MENORES A EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES	DANOS INSIGNIFICANTES	IMPACTO INSIGNIFICANTE	1	T	T	T	T	M
	LESÕES LEVES, OU DOENÇA RELACIONADA AO TRABALHO COM TRATAMENTO SIMPLES	DANOS MENORES A EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES COMPROMETENDO CONTINUIDADE OPERACIONAL	DANOS LEVES	IMPACTO LOCAL	2	T	T	T	M	M
	LESÕES GRAVES INTRAMUROS, OU DOENÇA RELACIONADA AO TRABALHO COM DANOS PERMANENTES A SAÚDE	DANOS MODERADOS A EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES	DANOS MODERADOS	IMPACTO REGIONAL	3	T	T	M	M	NT
	FATALIDADES (1-3) INTRAMUROS OU DOENÇA RELACIONADA AO TRABALHO COM ASPECTOS QUE REDUZEM ESPECTATIVA DE VIDA	DANOS SEVEROS A EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES	DANOS SEVEROS COM EFEITO LOCALIZADO	IMPACTO NACIONAL	4	T	M	M	NT	NT
	DIVERSAS FATALIDADES E DOENÇAS COM EFEITOS QUE REDUZEM ESPECTATIVA DE VIDA	DANOS CATASTRÓFICOS A EQUIPAMENTOS PODENDO LEVAR A PERDA DA INSTALAÇÃO	DANOS INSIGNIFICANTES	IMPACTO INTERNACIONAL	5	M	M	NT	NT	NT

<p>Tolerável: Risco tolerável, nenhuma medida precisa ser recomendada, o projeto o tarefa esta seguro com as proteções existentes.</p>
<p>Moderado: Risco moderado, controles e medidas de segurança adicionais devem ser avaliadas.</p>
<p>Não Tolerável: Risco não tolerável, proteções atuais não são suficientes, métodos alternativos de proteção devem ser avaliados com o objetivo de reduzir a frequência do evento ou mitigar seus impactos.</p>

Figura 2. 5 – Exemplo de Matriz de Risco
Fonte: Baseado em ISO-17776 (2000).

3 METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO

As técnicas de avaliação de confiabilidade humana por si só não são metodologias de elaboração de cenários acidentais.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama de blocos mostrando a metodologia proposta, e a função de cada ferramenta utilizada.

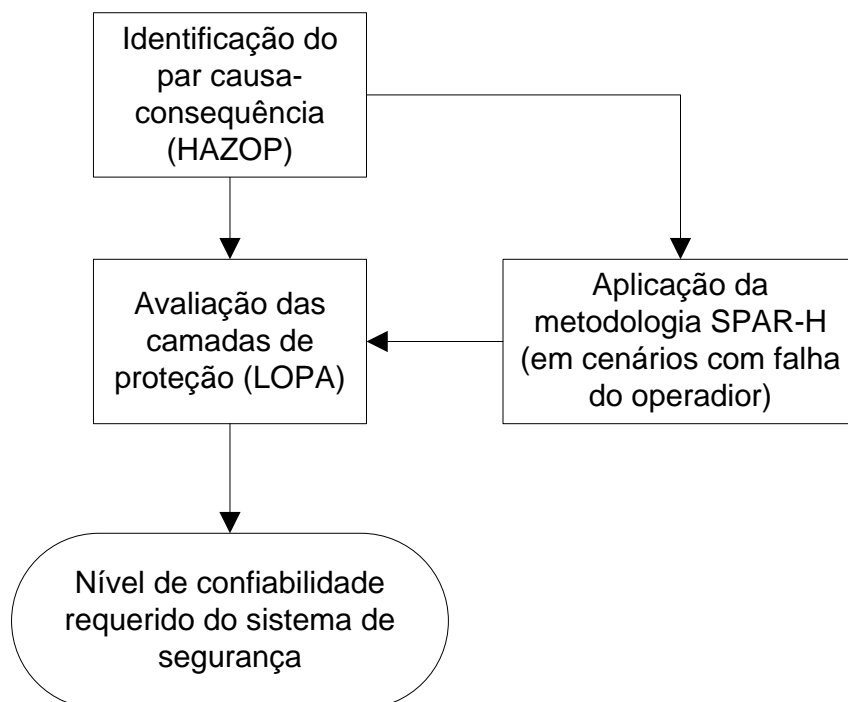


Figura 3. 1 – Diagrama Associação HAZOP, SPAR-H e LOPA.

Conforme descrito na Figura 3.1 o HAZOP será a ferramenta de , bem como definir a confiabilidade requerida de malhas de segurança.

3.1 Metodologia de Identificação e qualificação de Eventos acidentais (HAZOP +Matriz de Risco)

O HAZOP utiliza palavras guia e parâmetros de operação (Stapelberg, 2009). As tabelas A.1 e A.2 bem como algumas definições no Anexo A desta dissertação, foram utilizadas para realização correta de um estudo de HAZOP.

Os parâmetros descritos no Anexo A são apenas alguns parâmetros utilizados na metodologia de HAZOP. Dependendo da instalação ou operação analisada outros parâmetros podem ser utilizados ou até mesmo criados (a criação de parâmetros depende bastante da experiência do líder da equipe de

HAZOP, o coordenador do estudo); para tal, é importante que a equipe do estudo seja multidisciplinar, e capaz de responder a todos os questionamentos propostos durante a aplicação da técnica.

Depois de determinar os desvios, a equipe discute possíveis causas e consequências, e também descreve as barreiras existentes (salvaguardas que impedem ou mitigam o evento acidental) e modos de detecção (Stapelberg, 2009). Stapelberg (2009) faz uma recomendação para que seja avaliada a severidade e probabilidade de cada cenário, para desta forma definir prioridades de melhorias.

A metodologia de matriz de risco possibilita, principalmente, a avaliação das recomendações e dos impactos de um evento acidental, pautando-se nos seguintes princípios:

- A nova salvaguarda recomendada é realmente necessária, posto o risco que previne?
- O risco do cenário proposto é aceitável?

A Tabela 3.1 é o modelo de planilha que registra todos os itens discutidos em um HAZOP. No primeiro item encontra-se o desvio selecionado, depois tem-se causas e consequências; antes de definir as colunas centrais, descrevem-se as salvaguardas. Utilizando os fatores qualitativos da matriz de risco, definimos o risco de um dado cenário (impacto e frequência) para pessoas (PE), patrimônio (PA), meio ambiente (MA) e reputação da companhia (RE). Riscos toleráveis não demandam nenhuma medida adicional de controle de risco; quando se tem um risco moderado, é comum ter uma avaliação de uma medida de redução de risco e, quando se tem um risco não tolerável é comum que todas as medidas de controle recomendadas sejam implementadas obrigatoriamente.

Tabela 3. 1: Modelo de planilha de HAZOP com Matriz de Risco.

Nó		Intenção de Operação:					
Descrição:							
Desvio	Causas iniciadoras	Consequências finais	I	F	R	Barreiras (Salvaguardas)	Recomendações
1. Mais Fluxo					T		
					T		
					T		
					T		
2.Menos Fluxo					NT		
					NT		
					NT		
					NT		

Fonte: Elaboração própria baseado na ISO-17776 (2000).

3.2 Metodologia LOPA

LOPA (“Layer of Protection Analysis” ou Análise das camadas de proteção) é uma metodologia que consiste em calcular a frequência de ocorrência de uma consequência, contabilizando a probabilidade de falha de todas as salvaguardas (CCPS, 2001).

Todas as definições pertinentes à técnica do LOPA estão dispostas abaixo:

- SIS (Sistema instrumentado de segurança) – Sistema instrumentado usado para implementar uma ou mais funções instrumentadas de segurança, um SIS é composto por um conjunto de iniciadores, executores da lógica e elementos finais;
- SIF (função instrumentada de segurança) – É o objetivo da análise do LOPA, que tem como objetivo atribuir um nível de confiabilidade a uma dada função;
- Cenário – É o cenário que é descrito durante o estudo de avaliação de risco (APP, APR, HAZOP);
- ICF (frequência da causa iniciadora)– É a frequência da causa raiz do evento que gera o cenário acidental;
- EC (condição habilitadora) – Condição ou ação que precisa existir para permitir que a causa iniciadora leve ao cenário acidental;
- FC (frequência da consequência) – É a frequência do cenário acidental, calculada como uma composição de probabilidades (este calculo será descrito mais a frente nesta seção);
- FT (frequência tolerável) – Definida de acordo com os níveis de impactos definidos durante o HAZOP;

- IPL (camada de proteção independente) – É uma camada independente da SIF que também evita ou mitiga a consequência final do cenário acidental. No HAZOP estas camadas são as salvaguardas (existem critérios que definem a independência de uma salvaguarda para que a mesma seja incluída como IPL);
- MF (Fatores Modificadores) – Em alguns casos para que ocorra o dano são necessárias algumas condições específicas como fontes de ignição e presença de pessoas, deve-se adicionar as probabilidades associadas a estas condições para calcular corretamente o risco.
- RRF (Fator de redução do risco) – É um número sem unidade dimensional que representa a redução de risco; seu valor é sempre zero ou positivo;
- Critérios para caracterização de uma camada independente (sistema, dispositivo ou ação):
 - Efetiva em prevenir a consequência quando funcionam corretamente;
 - Independente do evento iniciador ou e dos componentes de uma outra IPL.

O LOPA procede conforme o algoritmo descrito abaixo Figura 3.2:

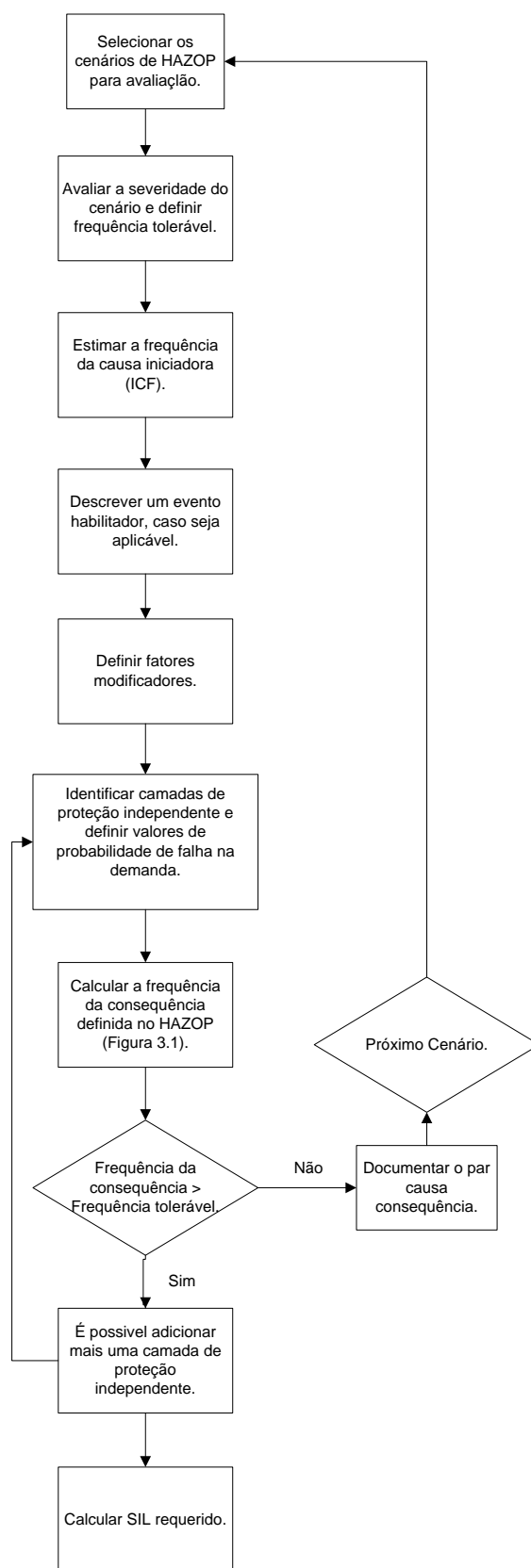


Figura 3.2 – Algoritmo LOPA.
Fonte: Baseado CCPS (2001).

Todas as informações discutidas pela equipe são registradas em planilhas, um exemplo de planilha esta representado na Tabela 3.2:

Tabela 3. 2: Modelo de planilha de LOPA.

Aplicação de LOPA											
Desvio:											
Cenário do HAZOP	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
FT:						FC:			RRF requerido:		

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

Baseando-se no algoritmo descrito na Figura 3.2 a Tabela 3.2 pode ser preenchida, seguindo as etapas:

1. Transcrever do HAZOP as causas, consequências e severidades da matriz de risco (utilizando os cenários onde existem malhas de instrumentação como salvaguardas), a coluna causa iniciadora, consequência e PE/PA/MA (impactos para pessoas, patrimônio e meio ambiente);
2. A coluna de ICF é preenchida com a probabilidade do evento iniciador (falha dos operadores, equipamentos, instrumentos, etc); neste trabalho o SPAR-H é utilizado no cálculo de falha dos operadores; para as demais falhas as tabelas do CCPS (2001) serão aplicáveis;
3. Com base na tabela 3.3 definir a frequência tolerável para o evento que foi selecionado (preencher a coluna FT);

Tabela 3. 3: Comparação entre severidade e frequência tolerável

Categoria de Severidade	FT (evento/ano)
V	1×10^{-5}
IV	1×10^{-4}
III	1×10^{-3}
II	1×10^{-2}
I	1×10^{-1}

Fonte: Adaptado de N-2595¹ - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

4. Descrever a condição habilitadora se for aplicável, utilizando-se do conceito de “time at risk”, fração de tempo que o sistema esta em risco (CCPS, 2001):
 - a. Calculado pela razão entre tempo de existência do risco em horas por ano e o total de horas em um ano (8760);
5. Quando aplicável são utilizados os fatores modificadores;
6. São descritas as camadas independentes e fornecidas as probabilidades de falhas.

¹A norma N-2595 é uma norma de uma empresa, portanto não representa um padrão nacional ou internacional.

Ao final da aplicação é calculada a frequência de uma dada consequência pela equação 3.1:

$$FC = ICF \times EC \times \prod_i MF_i \times \prod_j IPL_j \quad 3.1$$

Comparando a FC com a FT, pode-se calcular o fator de redução de risco pela equação 3.2:

$$\frac{FC}{FT} = \text{Fator de redução do risco} \quad 3.2$$

Para cada faixa de valores para fator de redução de risco requerido é fornecido um nível de confiabilidade, que será atribuído à função instrumentada de segurança. Note que a função instrumentada avaliada será mais confiável, se e somente se, suas proteções independentes possuírem taxa de falha elevada.

Tabela 3. 4: Fatores de redução de risco e SIL (nível de segurança).

FATOR DE REDUÇÃO DO RISCO	SIL
>10 a ≤100	1
>100 a ≤1000	2
>1000 a ≤10000	3
>10000 a ≤100000	4

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

Para níveis de SIL igual a 4 a metodologia LOPA não é recomendada (CCPS, 2001). Para cada nível de confiabilidade existem critérios específicos de redundância de instrumentação e mudança na rotina de manutenção, que vão depender diretamente do fator de redução de risco requisitado para uma determinada função instrumentada de segurança.

3.3 Metodologia SPAR-H

O SPAR-H foi desenvolvido para atender aos modelos de avaliação de risco humano para a comissão regulatória de energia nuclear dos Estados Unidos da América (NRC – “U.S. Nuclear Regulatory Commission”); porém tem exemplos de utilização em outros tipos de operações industrial (Gertman *et al*, 2005).

Criado como uma revisão das metodologias iniciais de ACH, o SPAR-H divide as tarefas humanas em dois tipos de atividades: Ação (Exemplos: Operar válvulas, acionar bombas, calibrar ou testar equipamentos, etc.) e Diagnóstico (Exemplos:

Ações baseadas no conhecimento, planejamento e determinação de cursos de ação).

A técnica utiliza oito fatores que influenciam no desempenho: Tempo disponível, Fator de estresse, Experiência e treinamento, Complexidade da tarefa, Ergonomia, Procedimentos, Aptidão física para o serviço, Relações de trabalho. Cada um destes itens está devidamente definido na publicação original da técnica Gertman *et all* (2005). Os fatores de desempenho são utilizados como multiplicadores da probabilidade nominal (Figura 3.3).

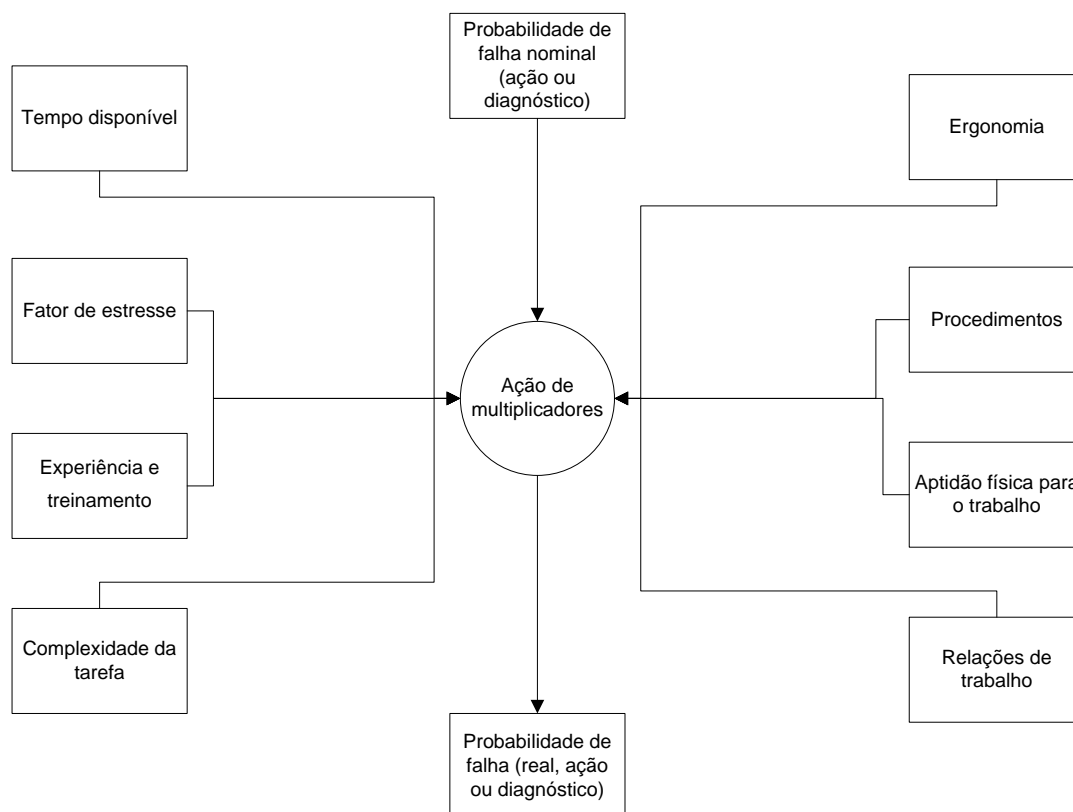


Figura 3. 3 – Influências na Probabilidade de Falha.

Fonte : Baseado em Gertman *et all* (2005).

O procedimento da metodologia inicia selecionando os valores nominais de falha humana para cada tipo de tarefa: 10^{-2} para diagnóstico e 10^{-3} para ações (por oportunidade), em seguida os fatores de desempenho são selecionados. As probabilidades nominais indicadas pela metodologia estão dentro da faixa do CCPS, indicada na primeira seção deste trabalho.

Um dos pontos principais do SPAR-H é a utilização de fatores de desempenho (PSF), com influências positivas da probabilidade nominal..

Ao final da avaliação os fatores são aplicados para corrigir o valor de falha humana:

$$PEH = \left(\frac{PEH_N \times PSF_c}{PEH_N \times (PSF_c - 1) + 1} \right) \quad 3.3$$

Onde

PEH – Probabilidade de Erro Humano

PEH_N – Probabilidade de Erro Humano nominal

PSF_c – Produtório de todos os PSF's (fatores de desempenho) aplicáveis.

A metodologia de SPAR-H demonstra que os valores nominais de probabilidade de falha podem ser muito afetados por fatores modificadores de desempenho.

O SPAR-H é um método simples e seus fatores de desempenho atendem diversos possíveis cenários, mas, conforme Forester et al (2006), a resolução dos fatores pode ser inadequada em avaliações mais detalhadas. Os autores da técnica estimulam a utilização de valores adaptados e mais atuais de fatores de desempenho, mas não existe nenhum tipo de recomendação de como outros fatores devem ser implementados.

Quando a técnica foi desenvolvida, foi feita uma análise de consistência com os demais métodos de ACH existentes, e, de fato, a técnica é consistente; porém como a fonte dos dados para desenvolvimento dos PSF's nem sempre é clara a sua validação também não é clara (Gertman *et al*, 2005).

Para validação de qualquer metodologia de avaliação probabilística, é de suma importância que a mesma represente dados reais, nesta dissertação o principal fator para validação é atender a faixa de erro disposta na Tabela 1.1 1 falha a cada 10 operações a 1 falha em cada 1000 operações (Trabalhador não estressado em tarefa de rotina), quando o trabalhador.

3.3.1 Propostas de mudança e melhoria da metodologia

Santos (2014) observou que adaptações devem ser feitas a metodologia SPAR-H, para melhor se adaptar a indústria de processos. O exemplo do bombeamento de propeno foi utilizado como validação das mudanças propostas.

A Tabela 3.5 apresenta uma comparação entre os valores originais de PSF da metodologia e os valores propostos neste trabalho.

Tabela 3. 5: Comparação valores de PSF SPAR-H

PSF	Nível do Fator	Multiplicador original	Multiplicador Revisado
Tempo disponível	Tempo inadequado	Probabilidade de Falha = 1	-
	Tempo disponível = Tempo requerido	10	-
	Tempo disponível = Tempo nominal para realizar a tarefa (pequena folga)	1	-
	Tempo disponível >= 5 vezes o tempo	0,1	-
	Tempo disponível >= 50 vezes o tempo	0,01	-
Fator de estresse	Extremo	5	-
	Alto	2	1,2
	Nominal	1	-
Experiência e treinamento	Pouca experiência e/ou nível baixo de	3	2
	Nominal	1	-
	Alto nível de treinamento e/ou	0,5	-
Complexidade da tarefa	Complexidade elevada	5	2
	Complexidade moderada	2	1
	Nominal	1	-
Ergonomia (interface homem máquina)	Faltando ou interface com muitas distrações	50	-
	Interface pobre	10	5
	Nominal	1	-
	Boa interface	0,5	-

PSF	Nível do Fator	Multiplicador original	Multiplicador Revisado
Procedimentos	Procedimentos não disponíveis	50	-
	Procedimentos disponíveis porém incompletos	20	10
	Procedimentos disponíveis porém pobres em detalhes	5	2
	Nominal	1	-
Aptidão física para o serviço	Inadequado	Probabilidade de Falha = 1	-
	Capacidade física degradada	5	-
	Nominal	1	-
Relações de trabalho	Pobre	2	-
	Nominal	1	-
	Bons processos	0,8	-

Fonte : Adaptado de Gertman *et al* (2005), com melhorias propostas pelo Autor

O foco da revisão foram cinco PSF's que a principio tem menos impacto na indústria de processo. A revisão dos fatores focou em reduzi-los, porém sem perder a referencia de outras metodologias pré estabelecidas, para não perder validade estatística; algumas metodologias como THERP, HEART e CREAM são bem estabelecidas e já foram utilizados em outras industrias.

Fator de estresse → Fora da indústria nuclear o operador esta exposto a níveis de estresse menores. No trabalho de Gertman *et al* (2005) para estresse alto pode ser encontrado o multiplicador de 1.2 na metodologia CREAM. Desta forma foi feita uma substituição direta;

Experiência e treinamento → Por se tratar de uma indústria menos complexa o impacto de falta de treinamento é menor e pode ser reduzido; THERP e CREAM apresentam o valor de 2 para pouca experiência e este foi o valor alterado (Gertman *et al*, 2005);

Complexidade da tarefa → Igualmente ao item anterior as composições de tarefas nesta indústria são mais simples, desta forma decidiu-se reduzir os valores, se baseando também nos valores encontrados na metodologia CREAM (Gertman *et al*, 2005);

Ergonomia (interface homem máquina) → A interface homem máquina nesta indústria é menos importante; para este motivo foi possível reduzir o multiplicador para interface pobre, conforme disposto na metodologia CREAM (Gertman *et al*, 2005);

Procedimentos → Conforme recomendações de Santos (2014), foi feita uma redução destes valores, com base nas metodologias THERP e CREAM (Gertman *et al*, 2005), o nível mais alto se manteve 50, porem o nível de procedimentos incompletos pode se reduzir para 10 conforme a THERP e procedimentos pobres para 2 conforme .CREAM (Gertman *et al*, 2005).

Cada redução de valor foi devidamente fundamentada em valores de outras metodologias que possuem aplicação em indústria de processo.

A operação avaliada é a partida de uma bomba de propeno, a figura abaixo representa um esquema simplificado desta bomba:

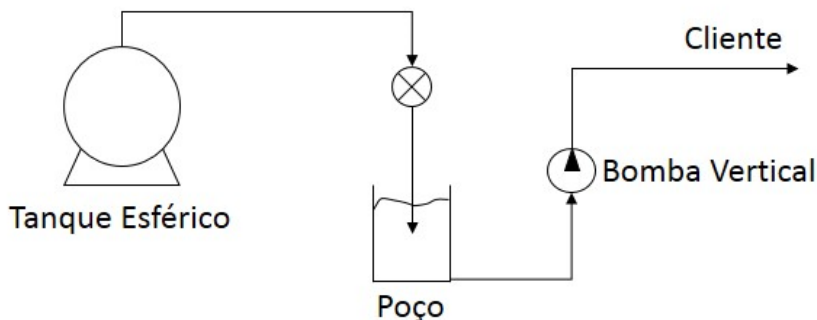


Figura 3. 4 – Esquema simplificado do Bombeamento de propeno
Fonte: Santos (2014)

Os procedimentos de partida de bomba descritos no trabalho de Santos D. R. (2014) dependem de tarefas de diagnóstico e ações, a Tabela 3.8 indica os valores redefinidos no estudo de caso.

Tabela 3.8: Valores de PSF selecionados para avaliação conforme Santos D. R. (2014).

PSF	Nível do Fator	Multiplicador
Tempo disponível	Tempo disponível = Tempo nominal para realização da tarefa	1
Fator de estresse	Alto	1,2
Experiência e treinamento	Alto nível de treinamento e/ou muita experiência	0,5
Complexidade da tarefa	Complexidade moderada	1
Ergonomia (interface homem máquina)	Interface pobre (diagnóstico)	5
	Nominal (ação)	1
Procedimento	Procedimentos disponíveis porem incompletos	10
Aptidão física para o serviço	Nominal	1
Relações de trabalho*	Bons processos	0,8

Fonte :Informações retiradas de Santos D. R. (2014).

* O Autor do presente estudo considerou que a utilização do fator 1, foi rigorosa demais já que é descrito um bom procedimento de trabalho.

Utilizando a equação 3.3 as probabilidades de falha são calculadas:

$$PEH_{\text{Diag}}=0,2$$

$$PEH_{\text{Ação}}= 0,05$$

$$PEH_{\text{Total}}=0,25$$

Com as alterações propostas teríamos uma taxa de falha de aproximadamente 25%, longe dos 84% encontrados por Santos (2014) em seu trabalho; onde utilizou os valores originais da técnica.

Este resultado representa 1/4 das partidas tem algum tipo de problema, porém o sistema consiste em duas bombas em paralelo; logo, a confiabilidade do sistema pode ser calculada como a multiplicação da confiabilidade de cada bomba, desta forma a taxa de falha é aproximadamente 6,25%.

A cada 100 operações aproximadamente 6 teriam algum tipo de falha; o valor encontrado se situa em um valor intermediário da faixa do CCPS (2001). O valor original de Santos (2014) estava fora da faixa, e se demonstrava conservador.

A metodologia foi revisada com base em valores de outras técnicas que foram validadas, desta forma foi garantida a validade dos dados utilizados. Nenhuma das metodologias existentes indica de forma muito clara a fonte de seus dados; informação estatística sobre erros humanos são bastante escassas.

O fato de a metodologia revisada gerar um resultado dentro da faixa do CCPS indica que fornece resultados melhores que a metodologia original; e, desta forma, pode ser aplicada a indústria de processo.

Na próxima seção o estudo de caso, vai mostrar uma comparação entre a falha humana utilizando SPAR-H sem modificação e com a modificação.

4 Estudo de Caso – Dutos e Terminal de entrega e recebimento de petróleo e derivados

Nesta seção as ferramentas descritas na seção anterior serão aplicadas a um estudo de caso baseado em dados reais da indústria, principalmente com a aplicação da metodologia SPAR-H revisada.

O objetivo desta seção é comparar os resultados da aplicação de HAZOP + SPAR-H + LOPA e avaliar se os resultados são satisfatórios frente à confiabilidade de malhas exigida, comparando com estudo de avaliação de risco feito sob a mesma instalação, utilizando apenas métricas dos operadores para falhas operacionais.

4.1 – Descrições das instalações

As instalações descritas são parcialmente existentes, posto que o estudo foi realizado sob a ampliação das mesmas. Conforme descrito no texto inicial desta seção as instalações são compostas de um terminal marítimo e uma malha dutoviária de envio e recebimento de petróleo e derivados de e para navios.

O terminal é composto de uma área de recebimento de petróleo e expedição de derivados através de navios de grande porte (até 290 metros de comprimento e até 170 mil barris de petróleo), ponte de acesso, tubovias e berços com braços de carregamento, área auxiliar com tanques de petróleo e derivados, esferas de GLP e dutos com área de bombas de grande porte.

As vazões dos braços de carregamento variam de 250 m³/h (derivados) a até 6400 m³/h (petróleo bruto); as pressões nas linhas de recebimento e expedição variam de 5 a 10 kgf/cm²; as válvulas nos “headers” e “manifold’s” possuem estanqueidade garantida para evitar contaminação dos produtos. Cada conjunto de braços de recebimento atende a uma embarcação por vez e a frequência de expedição e recebimento é variável.

As áreas de tancagem possuem tanques de 3.000 a 30.000 metros cúbicos de capacidade; a transferência de produtos nas áreas de tancagem é diária. A Figura 4.1 representa um diagrama de blocos com as informações básicas das instalações.

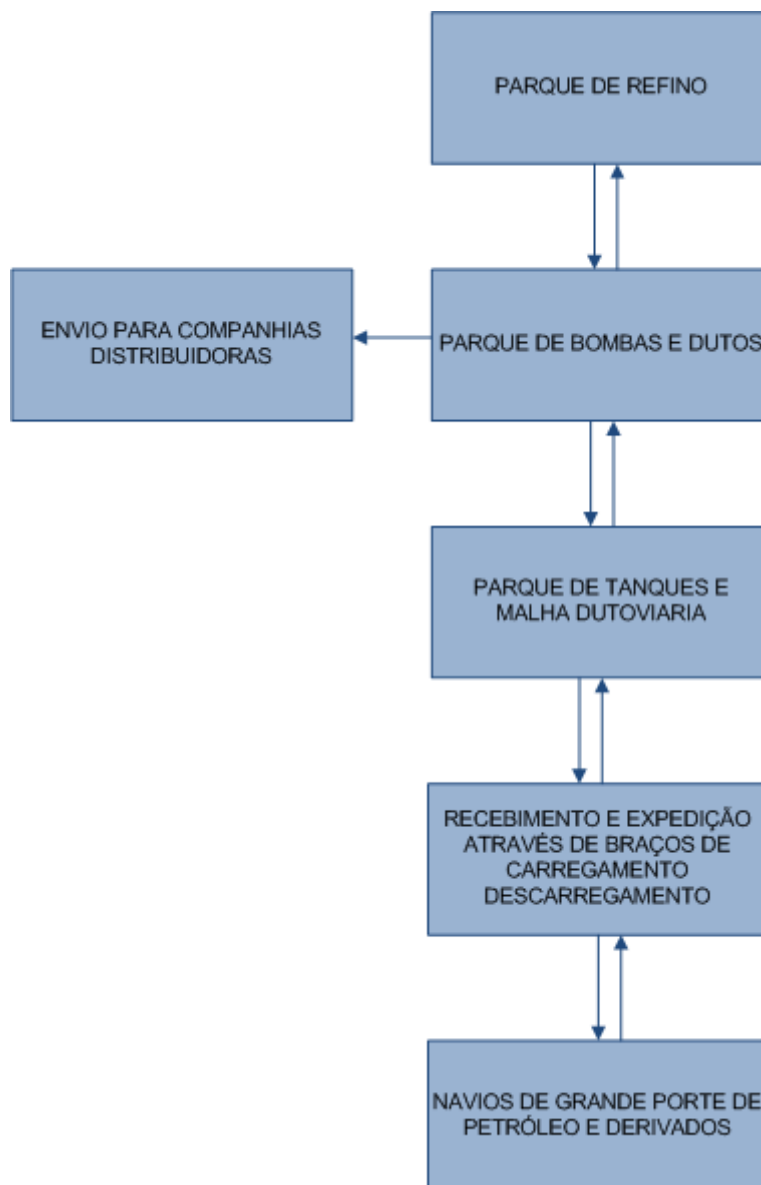


Figura 4. 1 – Diagrama de blocos das instalações
Fonte: O Autor.

4.2 – Fluxogramas de engenharia simplificados e avaliação de HAZOP + Matriz de Risco + SPAR-H + LOPA

Para avaliação deste trabalho foram coletadas informações apenas sobre as operações mais críticas das instalações. As Tabelas 4.1 a 4.12 são aplicações diretas das tabelas dispostas no capítulo três bem como a Equação 3.4, e são registros das avaliações realizadas:

- Recebimento e transferência de Petróleo (Figura 4.2);
- Expedição e transferência de diesel (Figura 4.3).

4.2.1 Recebimento e transferência de Petróleo Bruto

É a operação com as maiores vazões e conseqüentemente maior riscos, no fluxograma simplificado apresentado na Figura 4.2 são indicados apenas os principais dispositivos de segurança que podem sofrer a avaliação de LOPA.

Os intertravamentos indicados pelas letras I seguidos por números sequenciais estão descritos a seguir:

- I1 → Em caso de pressão baixa na linha de sucção da bomba a mesma é desligada por uma chave de pressão muito baixa (PSLL);
- I2 → Em caso de pressão alta na descarga da bomba a mesma é desligada por uma chave de pressão muito alta (PSHH);
- I3 → Em caso de vazão baixa na descarga da bomba uma chave de vazão baixa desliga a mesma (FSL);
- I4 → Em caso de vazão alta no duto uma chave de vazão muito alta desliga todas as bombas que estiverem ligadas (lembrando-se do arranjo em série)
- I5 → Em caso de pressão alta na linha de recebimento um sinal pneumático fecha uma válvula, de mesmo principio no “pé” do braço de carregamento.

É importante reafirmar que diversos dispositivos manuais como: válvulas de bloqueio, válvulas de alívio térmico e instrumentos não foram representados neste fluxograma simplificado, permanecendo apenas os itens fundamentais para as avaliações que serão aplicadas. Desta forma, pode-se considerar uma avaliação bastante conservativa no quesito de segurança.

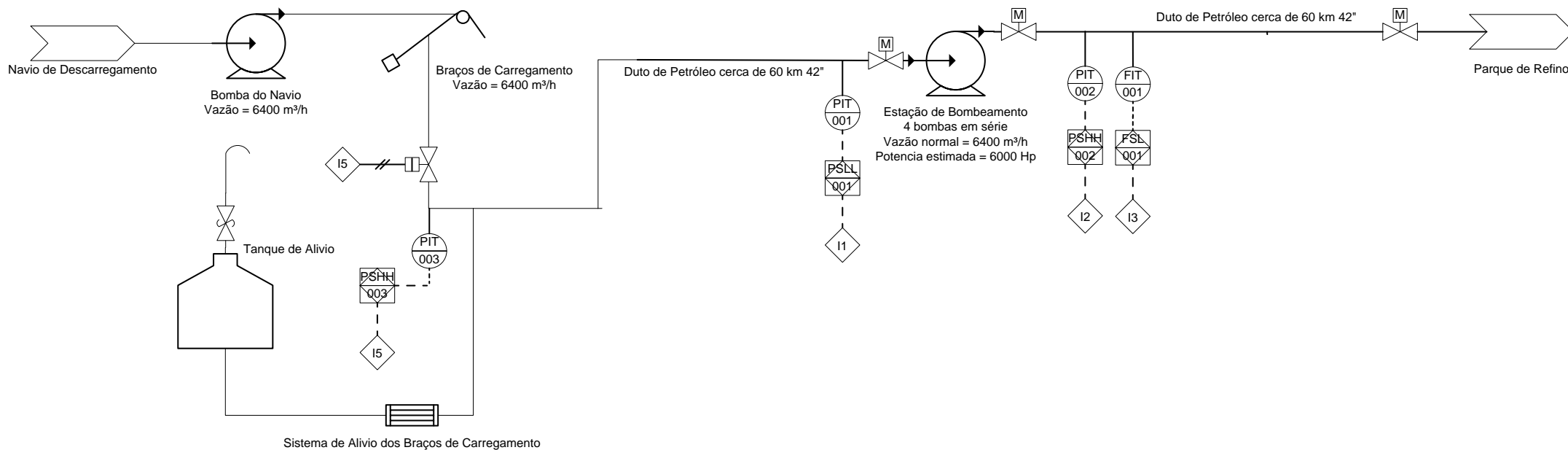


Figura 4. 2– Fluxograma Petróleo simplificado

Fonte: O Autor

Os principais cenários do HAZOP estão descritos na Tabela 4.1; os resultados da análise dependem da equipe responsável pela avaliação (dependem do analista de risco); desta forma os impactos e frequências indicadas são de responsabilidade da equipe que realizou o estudo.

Tabela 4. 1: Planilhas de HAZOP sistema de petróleo.

Nó 1		Intenção de Operação: Recebimento e transferência de petróleo						
Descrição: Recebimento e transferência de petróleo								
Item	Desvio	Causas	Consequências	I	F	R	Salvaguardas	Recomendações / Observações
1.1	Mais Fluxo	Vazão do Navio maior que a capacidade do sistema.	Menor pressão devido à maior perda de carga, levando à cavitação das bombas do duto (Estação de bombeamento).	PE.I	C	T	Salvaguardas: PSLL-001	Observação1: Todas as recomendações propostas seriam nos navios, e como os navios não são controlados pelo empreendimento não foi definida nenhuma recomendação.
				PA.IV		M		
				MA.I		T		
				RE.I		T		
		PE.I	B	T	Salvaguardas: Sistema de alívio	Recomendação1: Implementar um alarme de vazão alta para ação prévia do operador antes da chave de vazão alta, evitando possíveis danos.		
		PA.IV		M				
	MA.II	T						
	RE.I	T						
	Bombas da estação de bombeamento ligadas indevidamente quando a operação requer um número menor de bombas.	Dano por vácuo nos tanques dos navios.	PE.I	B	T		Salvaguardas: Sistema de alívio	Recomendação1: Implementar um alarme de vazão alta para ação prévia do operador antes da chave de vazão alta, evitando possíveis danos.
			PA.IV		M			
			MA.I		T			
			RE.II		T			

Fonte: Elaboração própria (Baseado na ISO-17776, 2000), preenchido pelo Autor.

Tabela 4.1: Planilhas de HAZOP sistema de petróleo (continuação)

Item	Desvio	Causas	Consequências	I	F	R	Salvaguardas	Recomendações / Observações	
1.2	Menos Fluxo	Vazão de bombeio do navio menor do que a vazão mínima para funcionamento das bombas da estação de bombeamento.	Cavitação das bombas da estação de bombeamento.	PE.I	C	T	Salvaguardas: PSLL-001 FSL-001	Observação1: Todas as recomendações propostas seriam nos navios, e como os navios não são controlados pelo empreendimento não foi definida nenhuma recomendação.	
				PA.IV		M			
				MA.I		T			
				RE.I		T			
		Bloqueios e restrição em válvulas das linhas serão avaliados no caso extremo de nenhum fluxo			PE.				
					PA.				
					MA.				
					RE.				
1.3	Nenhum Fluxo	Bloqueio indevido das válvulas na sucção das bombas da estação de bombeamento.	Cavitação das bombas da estação de bombeamento.	PE.I	A	T	Salvaguardas: PSLL-001 FSL-001		
				PA.IV		T			
				MA.I		T			
				RE.I		T			
		Bloqueio indevido das válvulas na descarga das bombas da estação de bombeamento.	Danos às bombas da estação de bombeamento por trabalharem na pressão de máxima e possibilidade e danos às linhas		PE.I	C	T	Salvaguardas: FSL-001 PSHH-002	
					PA.IV		M		
					MA.I		T		
					RE.I		T		
1.4	Mais Pressão	Bloqueio indevido das válvulas a jusante dos braços.	Transiente hidráulico com possibilidade de vazamento nos braços de carregamento.	PE.III	C	M	Salvaguardas: PSHH-003 Sistema de alívio dos braços de carregamento		
				PA.II		T			
				MA.III		M			
				RE.III		M			

Fonte: Elaboração própria (Baseado na ISO-17776, 2000), preenchido pelo Autor

As cinco malhas (intertravamentos descritos) são passíveis de passar pela avaliação de LOPA, e todas as causas podem ser consideradas erros humanos.. Para avaliação de SPAR-H pode ser considerado que ambos os operadores (do navio e do terminal) tem o mesmo PEH (probabilidade de erro humano) e estão relacionadas principalmente a ações e diagnóstico.

Tabela 4. 2:Valores de PSF selecionados para avaliação conforme entrevista aos operadores balizados pela API 770, e demais questionamentos referentes ao estilo de operação.

PSF	Nível do Fator	Multiplicador	Multiplicador Revisado
Tempo disponível	Tempo disponível = Tempo nominal para realização da tarefa	1	1
Fator de estresse	Alto	2	1,2
Experiência e treinamento	Alto nível de treinamento e/ou muita experiência	0,5	0,5
Complexidade da tarefa	Complexidade elevada	5	2
Ergonomia (interface homem máquina)	Nominal	1	1
Procedimento	Procedimentos disponíveis porem pobres em detalhes	5	2
Aptidão física para o serviço	Nominal	1	1
Relações de trabalho*	Nominal	1	1

Fonte :O Autor

Pode-se observar que os operadores responderam positivamente a maioria dos itens que geram redução de erros humanos da API 770; em alguns casos foi decidido utilizar os valores nominais garantir uma avaliação conservadora. Utilizando a equação 3.3 tem-se os seguinte resultados para falha humana:

$$PEH_{total} = 0,23 \text{ falhas por oportunidade (SPAR-H clássico)}$$

$$PEH_{total} = 0,026 \text{ por oportunidade (SPAR-H revisado)}$$

O valor calculado para a metodologia SPAR-H original encontra-se fora da faixa do CCPS(2001), enquanto a metodologia revisada forneceu um resultado dentro da faixa. A metodologia SPAR-H clássica tem uma sensibilidade muito alta, qualquer alteração nos fatores afeta a probabilidade de erro humano, para que o SPAR-H clássico tenha resultados dentro da faixa do CCPS; a instalação deverá possuir características muito positivas, o que pode ser muito incomum em instalações comuns.

Para utilizar estes valores nas planilhas de LOPA é necessário multiplica-los pela quantidade de operações por ano, e desta forma utilizador o valor em falhar por ano, os operadores forneceram este número – 160 operações por ano.

$$PEH_{ano} = 37 \text{ erros/ano}$$

$$PEH_{ano} = 4 \text{ erros/ ano}$$

Inicialmente toda e qualquer malha que considerada proteção independente receberá a probabilidade de falha de 0,1 ou 1 falha a cada 10 anos. É importante sempre revisar o cálculo com a confiabilidade real de uma camada independente, porem isso afeta a confiabilidade da malha inicial, e em muitos casos tem que se decidir a malha que será mais confiável; quando esta decisão deve ser feita, se escolhe os valores mais conservadores.

Tabela 4. 3: Aplicação de LOPA PSLL-001

Aplicação de LOPA para o PSLL-001											
Desvio: Mais Fluxo											
	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
Cenário do HAZOP 1.1	Vazão do Navio maior que a capacidade do sistema.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Menor pressão devido à maior perda de carga, levando a cavitação das bombas do duto (Estação de bombeamento).	I	IV	I	Não aplicável.	PSHH-003	0,1
	FT: 0,0001 FC:1,11 / 0,12									RRF requerido:	11.100 / 1.200
Cenário do HAZOP 1.2	Vazão de bombeio do navio menor do que a vazão mínima para funcionamento das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Cavitação das bombas da estação de bombeamento	I	IV	I	Não aplicável.	FSL-001	0,1
	FT: 0,0001 FC: 1,11 / 0,12									RRF requerido:	11.100 / 1.200

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

Tabela 4. 4: Aplicação de LOPA PSL-001 (Continuação)

	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha*
Cenário do HAZOP 1.3	Bloqueio indevido das válvulas na sucção das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Cavitação das bombas da estação de bombeamento	I	IV	I	Não aplicável.	FSL-001	0,1
							FT:	0,0001	FC:	1,11 / 0,12	RRF requerido:

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

* Inicialmente as probabilidades de falha de malhas de controle foram consideradas como um a cada 10 anos, conforme métrica do CCPS (2001).

** A condição habilitadora foi calculada com informações médias da operação: $EC = \frac{7,5 \text{ (média diária)} \times 365 \text{ (dias no ano)}}{8760 \text{ (horas no ano)}} \cong 0,3$

Na mesma tabela foram aplicados ambos os resultados do SPAR-H desta forma foi gerado dois resultados de redução de risco; onde aplicável os resultados estão separados pela barra. O SPAR-H clássico forneceu um resultado coerente com SIL 4 (RRF - 11.100), um nível de SIL extremamente elevado para uma planta de processo; a metodologia revisada gerou a necessidade de um SIL 3 (RRF - 1200), que é comum na indústria de processo. O objetivo deste trabalho é mostrar os resultados com a metodologia proposta, desta forma nas próximas tabelas o valor de confiabilidade do PSL-001 será compatível com SIL 3.

Tabela 4. 5: Aplicação de LOPA FSL-001

Aplicação de LOPA para o FSL-001												
Desvio: Mais Fluxo												
Cenário do HAZOP 1.2	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *	
		Vazão de bombeio do navio menor do que a vazão mínima para funcionamento das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Cavitação das bombas da estação de bombeamento	I	IV	I	Não aplicável.	PSLL-001	0,001
FT:						0,0001			FC: 0,011 / 0,0012		RRF requerido:	111 / 12
Cenário do HAZOP 1.3	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha*	
		Bloqueio indevido das válvulas na sucção das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Cavitação das bombas da estação de bombeamento	I	IV	I	Não aplicável.	PSLL-001	0,001
FT:						0,0001			FC: 0,011 / 0,0012		RRF requerido:	111 / 12

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais

(2012)

Tabela 4. 6: Aplicação de LOPA FSL-001(Continuação)

	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha*
Cenário do HAZOP 1.3	Bloqueio indevido das válvulas na descarga das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Danos as bombas da estação de bombeamento por trabalharem na pressão de máxima e possibilidade e danos as linhas	I	IV	I	Não aplicável.	PSHH-002	0,1
							FT:	0,0001	FC: 1,11 / 0,12	RRF requerido:	11.100 / 1.200

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

* A malha do PSSLL-001 é SIL 3, porém a malha do FSHH-002 ainda não foi avaliada; desta forma, o valor padrão será uma falha a cada 10 anos.

** A condição habilitadora foi calculada com informações médias da operação: $EC = \frac{7,5 \text{ (média diária)} \times 365 \text{ (dias no ano)}}{8760 \text{ (horas no ano)}} \cong 0,3$

Para uma mesma malha de controle o pior cenário define a confiabilidade requerida do sistema, e da mesma forma que a malha anterior tem-se SIL 4 ou SIL 3, os demais cenários requisitavam SIL 1 ou SIL2 (RRF - 1110 e RRF - 120). Para manter a consistência de avaliação, as próximas malhas avaliadas e que possuem FSL-001 como IPL receberão a redução compatível com SIL 3.

Tabela 4. 7: Aplicação de LOPA PSHH-002

Cenário do HAZOP 1.3	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha*
	Bloqueio indevido das válvulas na descarga das bombas da estação de bombeamento.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Danos as bombas da estação de bombeamento por trabalharem na pressão máxima e possibilidade e danos as linhas	I	IV	I	Não aplicável.	FSL-001	0,001
						FT:	0,0001	FC: 0,011 / 0,0012	RRF requerido:	111 / 12	

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

* A malha do FSL-001 é SIL 3.

** A condição habilitadora foi calculada com informações médias da operação: $EC = \frac{7,5 \text{ (média diária)} \times 365 \text{ (dias no ano)}}{8760 \text{ (horas no ano)}} \cong 0,3$

Conforme pode-se observar tem-se SIL 2 ou SIL 1; para manter a consistência será utilizado SIL 1.

Tabela 4. 8: Aplicação de LOPA PSHH-003

	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha*
Cenário do HAZOP 1.3	Bloqueio indevido das válvulas a jusante dos braços.	37 / 4	Bombeio de petróleo	0,3	Transiente hidráulico com possibilidade de vazamento nos braços de carregamento.	I	IV	I	Não aplicável.	Sistema de Alívio	0,01
							FT:	0,0001	FC: 0,11 / 0,012	RRF requerido:	1110 / 120

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

* O sistema de alívio tem a confiabilidade conforme métrica do CCPS (2001)

** A condição habilitadora foi calculada com informações médias da operação: $EC = \frac{7,5 \text{ (média diária)} \times 365 \text{ (dias no ano)}}{8760 \text{ (horas no ano)}} \cong 0,3$

Para uma mesma malha de controle o pior cenário define a confiabilidade requerida do sistema, e da mesma forma que a malha anterior tem-se SIL 4 ou SIL 3, os demais cenários requisitavam SIL 3 ou SIL 2 (RRF - 1110 e RRF - 120).

Ao final da avaliação, observa-se que muitas malhas avaliadas são proteções independentes das demais neste caso é feita uma reavaliação geral dos resultados incluindo a confiabilidade final de cada malha.

4.2.2 Expedição e transferência de diesel

É uma operação similar a de petróleo, porém com uma vazão um pouco menor e a direção do fluxo é contrária. No fluxograma simplificado apresentado na figura 4.3 são indicados apenas os principais dispositivos de segurança que podem sofrer a avaliação de LOPA.

Os intertravamentos indicados pelas letras I seguidos por números sequenciais estão descritos a seguir:

- I1 → Em caso de pressão baixa na linha de sucção da bomba a mesma é desligada por uma chave de pressão muito baixa (PSLL);
- I2 → Em caso de pressão alta na descarga da bomba a mesma é desligada por uma chave de pressão muito alta (PSHH);
- I3 → Em caso vazão baixa na descarga da bomba uma chave de vazão baixa desliga a mesma (FSL);
- I4 → Em caso de vazão alta no duto uma chave de vazão muito alta desliga todas as bombas que estiverem ligadas (lembrando-se do arranjo em série);
- I5 → Em caso de pressão alta na linha de recebimento um sinal pneumático fecha uma válvula, de mesmo princípio no braço de carregamento.

Pode-se considerar uma avaliação bastante conservativa no quesito de segurança, da mesma forma que a avaliação anterior.

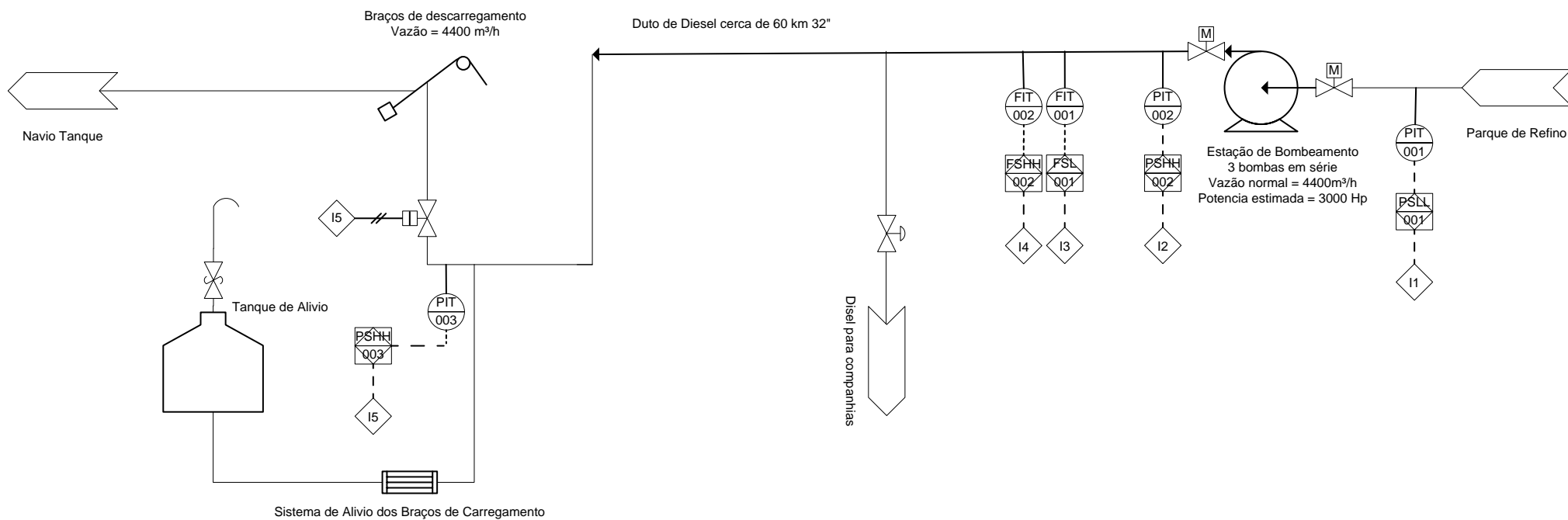


Figura 4. 3 – Fluxograma Diesel simplificado
Fonte: O Autor.

Os principais cenários do HAZOP estão descritos na planilha a seguir (modelo de planilha apresentado no capítulo três), todos os cenários foram condensados em apenas 1 nó (seção de estudo, este nó terá a denominação de 2 para não ser confundido com o estudo anterior) devido à simplificação do fluxograma, cabe afirmar que os resultados da análise dependem da equipe responsável pela avaliação (dependem do analista de risco):

Tabela 4. 9: Planilhas de HAZOP sistema de diesel.

Nó 2 Descrição: Expedição de óleo diesel			Intenção de Operação: Transferência e expedição de diesel						
Item	Desvio	Causas	Consequências	I	F	R	Salvaguardas	Recomendações / Observações	
1.1	Mais Fluxo	Ligação simultânea de todas as bombas da estação de bombeamento.	Danos aos tanques de diesel do navio, da refinaria e das companhias.	PE.I	C	T	Salvaguardas: FSHH-002 Sistema de alívio	Recomendação 1: Implementar intertravamento seletivo para cada operação.	
				PA.IV		M			
				MA.I		T			
				RE.I		T			
1.2	Nenhum Fluxo	Fechamento indevido de válvulas a montante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	Cavitação das bombas da estação de bombeamento.	PE.I	A	T	Salvaguardas: PSLL-001 FSL-001		
				PA.III		T			
				MA.I		T			
				RE.I		T			
	Nenhum Fluxo	Fechamento indevido de válvulas a jusante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	Transiente hidráulico com possibilidade de vazamento nos braços de carregamento e linhas de envio para companhias.		PE.IV	B	M	Salvaguardas: Sistema de alívio nos braços PSHH-002 PSHH-003	Recomendação 2: A equipe não encontrou recomendação economicamente viável
					PA.IV		M		
					MA.III		T		
					IM.III		T		

Fonte: Elaboração própria (Baseado na ISO-17776, 2000), preenchido pelo Auto

Por se tratar dos mesmos operadores os valores de probabilidade de falha permanecem os mesmos, porem o número de atividades é diferente – 130 operações por ano:

$$PEH_{ano} = 30 \text{ erros/ano}$$

$$PEH_{ano} = 4 \text{ erros/ano}$$

Tabela 4. 10: Aplicação de LOPA PSLL-001

Aplicação de LOPA para o PSLL-001											
Desvio: Mais Fluxo											
	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
Cenário do HAZOP 1.1	Fechamento indevido de válvulas a montante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	30 / 4	Envio de diesel para navio.	0,15	Cavitação das bombas da estação de bombeamento.	I	III	I	Não aplicável.	FSL-001	0,1
							FT:	0,001	FC: 0,45 / 0,06	RRF requerido:	450 / 60

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

* Inicialmente as probabilidades de falha de malhas de controle foram consideradas como um a cada 10 anos, conforme métrica do CCPS (2001).

** A condição habilitadora foi dada pela operação como operação em 15% do ano: EC = 0,15.

Nesta malha temos o resultado de SIL 2 (SPAR-H classico) e SIL 1 (SPAR-H revisado). Para manter a consistência será considerado o resultado com SIL 1.

Tabela 4. 11: Aplicação de LOPA FSL-001

Aplicação de LOPA para o FSL-001											
Desvio: Mais Fluxo											
	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
Cenário do HAZOP 1.1	Fechamento indevido de válvulas a montante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	30 / 4	Envio de diesel para navio.	0,15	Cavitação das bombas da estação de bombeamento.	I	III	I	Não aplicável.	PSLL-001	0,1
							FT:	0,001	FC: 0,45 / 0,06	RRF requerido:	450 / 60

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

* Inicialmente as probabilidades de falha de malhas de controle foram consideradas como um a cada 10 anos, conforme métrica do CCPS (2001).

** A condição habilitadora foi dada pela operação como operação em 15% do ano: **EC = 0,15**.

Nesta malha temos o resultado de SIL 2 (SPAR-H classico) e SIL 1 (SPAR-H revisado). Para manter a consistência será considerado o resultado com SIL 1.

Tabela 4. 12: Aplicação de LOPA FSHH-002

Aplicação de LOPA para o FSHH-002											
Desvio: Mais Fluxo											
Cenário do HAZOP 1.1	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
		Ligação simultânea de todas as bombas da estação de bombeamento.	30 / 4	Envio de diesel para navio.	0,15	Danos aos tanques de diesel do navio, da refinaria e das companhias.	I	IV	I	Não aplicável.	Sistema de alívio.
						FT:	0,0001	FC:0,045 / 0,006		RRF requerido:	450 / 60

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

** O sistema de alívio tem a confiabilidade conforme métrica do CCPS (Center for Chemical Process Safety – CCPS, 2001).

** A condição habilitadora foi dada pela operação como operação em 15% do ano: **EC = 0,15**.

Nesta malha temos o resultado de SIL 2 (SPAR-H classico) e SIL 1 (SPAR-H revisado). Para manter a consistência será considerado o resultado com SIL 1.

Tabela 4. 13: Aplicação de LOPA PSHH-002

Aplicação de LOPA para o PSHH-002											
Desvio: Mais Fluxo											
	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
Cenário do HAZOP 1.1	Fechamento indevido de válvulas a jusante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	30 / 4	Envio de diesel para navio.	0,15	Transiente hidráulico com possibilidade de vazamento nos braços de carregamento e linhas de envio para companhias.	I	IV	I	Não aplicável.	Sistema de alívio. PSHH-003	0,01 0,1
							FT:	0,0001		FC:0,0045 / 0,0006	RRF requerido:

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012).

** O sistema de alívio e malha de controle tem a confiabilidade conforme métrica do CCPS (Center for Chemical Process Safety – CCPS, 2001).

** A condição habilitadora foi dada pela operação como operação em 15% do ano: EC = 0,15.

Com abordagem do SPAR-H classico a malha seria SIL 1, com a metodologia revisado encontra-se uma malha não classificada.

Tabela 4. 14: Aplicação de LOPA PSHH-003

Aplicação de LOPA para o PSHH-002											
Desvio: Mais Fluxo											
	Causa Iniciadora	ICF	Condição habilitadora	EC**	Consequências	PE	PA	MA	Fatores Modificadores (MF)	IPL	Probabilidade de Falha *
Cenário do HAZOP 1.1	Fechamento indevido de válvulas a jusante das bombas quando do envio para o navio e companhia simultaneamente.	30 / 4	Envio de diesel para navio.	0,15	Transiente hidráulico com possibilidade de vazamento nos braços de carregamento e linhas de envio para companhias.	I	IV	I	Não aplicável.	Sistema de alívio. PSHH-002	0,01 0,1
							FT:	0,0001		FC:0,0045 / 0,0006	RRF requerido:

Fonte: Adaptado de N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais (2012)

** O sistema de alívio e malha de controle tem a confiabilidade conforme métrica do CCPS (Center for Chemical Process Safety – CCPS, 2001).

** A condição habilitadora foi dada pela operação como operação em 15% do ano: **EC = 0,15**.

Com abordagem do SPAR-H classico a malha seria SIL 1, com a metodologia revisado encontra-se uma malha não classificada.

A Tabela 4.15 condensa todos os resultados de RRF, é notável a diferença dos resultados quando se usa SPAR-H classico e o revisado.

Tabela 4. 15: Resultados (RRF)

Malha	Petróleo Bruto	
	SPAR-H clássico	SPAR-H revisado
PSLL-001	11.100	1.200
FSL-001	11.100	1.200
PSHH-002	111	12
PSHH-003	1.110	120
Diesel		
PSLL-001	450	60
FSL-001	450	60
FSHH-002	450	60
PSHH-002	45	6
PSHH-003	45	6

O SPAR-H revisado fornece em média resultados com uma ordem de grandeza menor, o que impacta diretamente no nível de SIL.

O SPAR-H fornece resultado de falhas por operação e desta forma é dependente do número de operações realizadas em uma dada instalação; tal informação deve ser obtida com entrevista direta dos operadores e da supervisão, logo em um universo que cada operador vai realizar 100 a 200 operações que dependem de ação e diagnóstico este operador vai falhar em média 4 vezes por ano, baseando-se no resultado do SPAR-H revisado neste trabalho. Cada instalação terá a sua métrica de falhas por ano; este resultado deve ser discutido com os operadores para fazer ajustes na metodologia.

Não existe apenas uma técnica para avaliação de falhas humanas e sim várias técnicas bem estruturadas, todas tem que ser reavaliadas quando aplicadas à indústria de processo.

5 CONCLUSÕES

Os resultados descritos na seção anterior demonstram claramente a relação entre falha humana e custo; neste caso, custo de instrumentação e funções de segurança.

A metodologia do SPAR-H clássico, foi desenvolvida para a indústria nuclear, e a não ser que as condições do operador sejam ótimas os resultados da técnica serão conservadores, quando aplicada à indústria de processo. É importante definir que os fatores revisados, foram modificados utilizando valores de outras metodologias já estabelecidas, e que foram aplicadas na indústria química de processo. Desta forma cada valor revisado tem seu embasamento estatístico de sua própria técnica de origem.

A metodologia criada é rápida simples e fornece resultados dentro de faixas estabelecidas, como os dados de falha humana do CCPS.

Dados de falha humana são escassos e nenhuma das metodologias fornece seus dados básicos para julgamento e avaliação de seus praticantes (pessoas que utilizam).

Como propostas para trabalhos futuros:

- Aprofundar a validação de novos termos para o SPAR-H através da avaliação de entrevista a operadores e procurar balizar os valores dos fatores de desempenho da metodologia;
- Associar outras metodologias de avaliação de confiabilidade humana a métodos de avaliação de risco qualitativos e quantitativos, já estabelecidos para a indústria de processo;
- Avaliar estatisticamente dados de falha humana para garantir a eficácia dos fatores de desempenho, e criar uma base de dados de falha humana;

Os trabalhos futuros devem ter o objetivo de simplificar as técnicas, de forma que sejam aplicadas ao cenário atual de produtividade e eficácia. No meio industrial não existe tempo nem recursos para aplicação de técnicas de avaliação risco com alta complexidade; deve-se procurar simplificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade, 1994. 37p.

Ávila, S.F. Etiologia das anormalidades operacionais na indústria: modelagem para aprendizagem, 296 f.: il. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2010.

Ávila, S.F. Review of Risk Analysis and Accident on the Routine Operations in the Oil Industry. 5o LCPS – 5 TH Latin America Conference on Process Safety. Cartagena, 2013.

Bell, J.; Holroyd J. Review of human reliability assessment methods. Health and Safety Laboratory, 2009.

Browning, J. Union Carbide: Disaster at Bhopal , 1993. 15p.

Center for Chemical Process Safety, Layer of Protection Analysis - Simplified process risk assessment. New York, 2001. 270p.

Covello, V. T.; Mumpower J. L. Risk analysis and Risk Management: an historical perspective. Texas, 1985.

Dunjó, J.; Fthenakis, V.; Darbra, R.; Vílchez, J. E Arnaldos, J, 2011. Conducting HAZOP's in continuous chemical processes: Part II. A new model for estimating HAZOP time and a standardized approach for examining nodes. Process Safety and Environmental Protection, Volume 89, Issue 4, Pages 224-233, ISSN 0957-5820.

Forester, J.; Kolaczowski, A.; Lois, E.; Kelly, D. Evaluation of Analysis Methods Against Good Practices. Final Report. NUREG-1842. U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, 2006.

Furtado, H. C.; May, I. L. Human Factors and Failure Analysis. Trabalho apresentado no 6º COTEQ , Salvador, agosto, 2002.

Gertman, D.; Blackman, H.; Marble, J.; Byers, J.; Smith, C. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method (NUREG/CR-6883INL/EXT-05-00509). Idaho Falls, 2005.

Hale, A.R.; Glendon, A.I. Individual Behavior in the Control of Danger. Elsevier, Amsterdam, 1987.

Hollnagel, E., Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM), Oxford, Elsevier, 1998.

ICFTU/ICEF. The Trade Union Report on Bhopal, Brussels/Geneva, 1985. Disponível em: <http://www.ilo.org/public/english/pro-tectio/safework/chemsfty/bhopal/icftu.pdf>.

International Electrotechnical Commission and International Organization for Standardization, ISO-IEC 31010: – Risk management – Risk assessment techniques. 2009, 176p.

International Organization for Standardization. ISO 17776: Petroleum and natural gas industries - Offshore production installations - Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment, 2000. 59p.

Liu, H.; Hwang, S.; Liu, T. Economic assessment of human errors in manufacturing environment. Safety Science 47, 2009, p170 - p182.

"Llory M., Montmayeul R. O Acidente e a Organização, 2010. Tradução de Marlene Machado Zica Vianna Belo Horizonte: Fabrefactum, 2014. 192p. (Série: Confiabilidade Humana)

Título original: L'accidente et l'organisation."

Ministry of the Environment - DPPR / SEI / BARPI. Catastrophic explosion of a cyclohexane cloud June 1, 1974 - Flixborough United Kingdom. London, 2008, 9p.

N-2595 - Critérios de Projeto, Operação e Manutenção de Sistemas Instrumentados de Segurança em Unidades Industriais. Petrobras, 2012

Potash, L. M.; Stewart, M.; Dietz, P. E.; Lewis, C. M.; Dougherty Jr. E. M. Experience in Integrating the Operator Contributions in the PRA in Actual Operating Plants. In: Proceedings of the ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Risk Assessment, Port Chester, NY, Vol. II, pages 1054-1063. American Nuclear Society, LaGrange Park (USA), 1981.

Reason J. Human Error. 1st Edition, Port Melbourne, Australia, Cambridge University Press, 1990, 9p.

Ribeiro, A. C. O., Quantificação do impacto de fatores humanos e organizacionais em probabilidades de falha humana usadas em análise probabilística de segurança. Tese de doutorado, UFRJ / COPPE, XIV, 144p, 2012.

Rice A., Bhopal revisited – the tragedy of lessons ignored. Asian-Pacific Newslett on Occup Health and Safety 2006;Finland; 13:46p–47p.

Santos, D. R. Análise de confiabilidade humana no processo de bombeio de propeno em uma refinaria utilizando o método SPAR-H. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

Stapelberg, R. F. Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design. Springer-Verlag, London, 2009.

Swain, A. D.; Guttman H. E. Handbook of Human Reliability Analysis mwith Emphasis on Nuclear Power Plant Applications Final Report. 1983, 728p.

Tetlow, D.R. S.; Jenkin, S. The use of fault tree analysis to visualise the importance of human factors for safe diving with closed-circuit rebreathers (CCR). International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol 26, No 3, 2005.

US NRC, disponível em : <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>, atualizado em 2014.

Wakefield, D.; Parry, G.W.; Spurgin, A.J. Revised Systematic Human Reliability Analysis Procedure (SHARP1), EPRI TR-10711, Palo Alto, California, Electric Power Research Institute, 1990.

Williams, J.C. HEART – A proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology in Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (SaRS). NEC, Birmingham, 1985.

ANEXO A

Tabelas para HAZOP e definições

Tabela A. 1: Palavras-Guia e suas descrições

PALAVRAS-GUIA	DESCRIÇÃO
Não, Nenhum	Completa negação das intenções de projeto
Menos	Diminuição quantitativa de uma propriedade física relevante
Mais	Aumento quantitativo de uma propriedade física relevante
Parte de	Redução
Também, Bem como	Adição
Outro que	Substituição completa
Reverso	O oposto lógico da intenção de projeto

Fonte: O Autor, Baseado em Stapelberg (2009).

Tabela A. 2: Exemplo de desvios mais comuns de HAZOP

PARÂMETRO	PALAVRA-GUIA	DESVIOS
Fluxo	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos fluxo
	Mais	Mais fluxo
	Reverso	Fluxo reverso
Pressão	Menos	Menos pressão
	Mais	Mais pressão
Nível	Nenhum	Nenhum nível
	Menos	Nível baixo
	Mais	Nível alto
Temperatura	Menos	Temperatura baixa
	Mais	Temperatura alta
Reação	Nenhum	Nenhuma reação
	Menos	Reação lenta
	Mais	Reação descontrolada
	Parte de	Reação incompleta

Fonte: O Autor, Baseado em Stapelberg (2009).

O parâmetro fluxo (e seus desvios) se aplica a nós (pontos do sistema), que englobam processos de escoamento de fluidos por tubulação, bombas, dutos, processos de purga, etc.

O parâmetro pressão (e seus desvios), muitas vezes pode ser associado ao parâmetro fluxo (exemplo: menos fluxo a jusante de uma válvula, pode significar mais pressão a montante da mesma). Vasos de pressão, equipamentos de compressão, entre outros, também podem ser motivo de desvios de pressão.

O parâmetro nível, normalmente é associado a tanques e reservatórios.

O parâmetro reação é muito comum em plantas químicas, onde o reator faz parte do nó de estudo.