



**INTEGRAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE
RISCO HAZOP E LOPA: APLICAÇÃO EM UMA CALDEIRA**

Rodrigo Ceraso Seixas Pires

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc

Janeiro de 2020

**INTEGRAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO HAZOP E LOPA:
APLICAÇÃO EM UMA CALDEIRA**

Rodrigo Ceraso Seixas Pires

Projeto de final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em engenharia química.

Aprovado por

Carlos André Vaz Júnior, D.Sc

Antonio Ribeiro, D.Sc.

Estevão Freire, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro de 2020

Ficha de identificação da obra

Pires, Rodrigo Ceraso Seixas.

Integração das metodologias de análise de risco HAZOP e LOPA: Aplicação em uma caldeira/ Rodrigo Ceraso Seixas Pires. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

xii; 92 p.; il

Projeto de Final de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior.

1. HAZOP. 2. LOPA. 3. Caldeira. 4. Projeto de Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Júnior. I. Integração das metodologias de análise de risco HAZOP e LOPA: Aplicação em uma caldeira/ Rodrigo Ceraso Seixas Pires).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha mãe, Rafaela, e ao meu pai, Paulo César, por terem proporcionado todos os meios e bases de apoio para que eu pudesse seguir meus sonhos e trilhar uma trajetória que me trouxe a este capítulo da minha vida. Estas páginas carregam um pedaço de cada um de vocês;

Agradeço à minha irmã, Juliana, e ao meu primo, Pedro, pelo companheirismo durante esta jornada e por tornarem possível a experiência do verdadeiro significado de fraternidade;

Agradeço a todos os amigos que me apoiaram e que foram diretamente responsáveis pelos momentos inesquecíveis vividos dentro e fora da universidade. A rotina da graduação jamais teria sido a mesma sem a participação de vocês;

Agradeço a minha namorada, Carolina, pelo carinho dedicado, companheirismo e compreensão em momentos em que não pude estar presente durante a condução deste trabalho;

Agradeço ao meu orientador, Professor Carlos André, por todo suporte prestado, disponibilidade e agilidade na resolução de dúvidas e pelos ensinamentos transmitidos;

Por fim, agradeço aos meus companheiros de trabalho da White Martins por terem tornado o meu período de estágio uma verdadeira fonte de aprendizado. Hoje, com felicidade e como funcionário da empresa, afirmo que vocês foram fundamentais para que eu enxergasse a segurança com outros olhos.

“You can’t ever reach perfection, but you can believe in an asymptote toward which you are ceaselessly striving.”

- Paul Kalanithi

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em engenharia química.

INTEGRAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO HAZOP E LOPA: APLICAÇÃO EM UMA CALDEIRA

Rodrigo Ceraso Seixas Pires

Janeiro, 2020

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

As transformações na indústria no século XX não se limitaram às inovações nos processos produtivos, mas demandaram também uma reformulação na segurança de diferentes operações. Neste contexto, este trabalho contemplou a avaliação de duas metodologias originadas nas últimas décadas e utilizadas no gerenciamento de riscos de processos – HAZOP (Hazard and Operability study) e LOPA (Layers of Protection Analysis) – apresentando suas premissas, abordagens, objetivos e especificidades frente à demais técnicas. A apresentação destas metodologias objetivou elucidar suas aplicações a fim de combiná-las, de acordo com seus principais diferenciais, em um estudo de caso de análise de risco em caldeira flamotubular. A partir da compreensão a respeito das metodologias de análise de risco e estabelecido o estudo de caso, uma proposta de integração entre o HAZOP e o LOPA foi adotada, combinando ambos métodos na análise de risco. Primeiramente, o HAZOP proporcionou uma avaliação qualitativa dos riscos oferecidos, permitindo que os cenários mais críticos fossem direcionados e avaliados, com maior rigor, pela análise semiquantitativa proporcionada pelo LOPA. Uma vez finalizada a aplicação de ambas abordagens, consolidou-se os principais resultados obtidos e explicitou-se os benefícios reais proporcionados por estes ao processo, a partir das considerações adotadas e referências utilizadas. Ao fim deste levantamento, inferiu-se que a combinação de ambas metodologias otimizou significativamente o gerenciamento de risco do processo avaliado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Possíveis fases de implementação da análise LOPA	19
Figura 2 – Etapas da Análise LOPA	20
Figura 3 - Deslocamento na Matriz de Risco quando a frequência obtida no LOPA é menor..	31
Figura 4 - Deslocamento na Matriz de Risco quando a frequência obtida no LOPA é menor..	31
Figura 5 - Sistemas de uma caldeira simples.....	35
Figura 6 - Componentes de uma caldeira de grande porte	36
Figura 7 - Sistema de caldeira flamotubular horizontal.....	37
Figura 8- Caldeira flamotubular vertical	38
Figura 9 - Sistema de tubulão inferior e tubulão superior em uma caldeira aquatubular	39
Figura 10 - Sistema tradicional de uma caldeira aquatubular.....	40
Figura 11 - Diagrama P&ID da caldeira.	47
Figura 12 - Integração das metodologias HAZOP e LOPA	48
Figura 13 - Nós definidos para a análise HAZOP	49
Figura 14- Template de formulário utilizado para a análise HAZOP.....	52
Figura 15 - Template utilizado para avaliação dos cenários pela metodologia LOPA.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargos e Áreas de conhecimento dos integrantes da equipe do estudo HAZOP	7
Tabela 2 - Palavras-chave e significados definidos pela ICI na aplicação da metodologia HAZOP	9
Tabela 3 – Exemplos de Parâmetros Operacionais considerados na Indústria Química.	9
Tabela 4 – Exemplos de possíveis desvios originados a partir da combinação de palavras-chave e parâmetro	9
Tabela 5 - Exemplo de Categorias de Frequência	12
Tabela 6 - Exemplo de Categorias de Severidade	13
Tabela 7 - Exemplo de uma matriz de risco que estabelece as categorias de risco. Fonte:.....	14
Tabela 8 - Classificação da severidade da consequência sem referência a danos em pessoas.	22
Tabela 9 - Modelos de classificação para consequências qualitativas com referência a danos em pessoas	23
Tabela 10 - Frequência pré-estabelecida para alguns eventos iniciadores	25
Tabela 11 - IPLs passivas e PFDs correspondentes	28
Tabela 12 - IPLs ativas e PFDs correspondentes.....	28
Tabela 13 - Componentes de uma caldeira de grande porte.....	36
Tabela 14 - Especificações da caldeira flamotubular	44
Tabela 15 - Vazões esperadas na geração de vapor.....	45
Tabela 16 - Nós de estudo no HAZOP	48
Tabela 17 - Relação de desvios para cada nó definido.....	50
Tabela 18 - Categorias de frequência adotadas na avaliação de cenários do HAZOP.....	51
Tabela 19 - Categorias de severidade adotadas na avaliação de cenários do HAZOP.....	51
Tabela 20 - Matriz de risco para a avaliação de risco dos cenários do HAZOP	52
Tabela 21 - Frequências de eventos iniciadores	53
Tabela 22 - IPLs e suas respectivas PFDs	54
Tabela 23 - Quantidade de cenários de cada nó e suas respectivas categorias de risco	56
Tabela 24 – Cenários identificados e suas respectivas categorias de risco	57
Tabela 25 - Cenários encontrados na avaliação HAZOP que apresentaram o maior grau de risco	58

Tabela 26 – Exemplos de causas dos cenários de risco médio e suas respectivas categorias frequências.....	61
Tabela 27 - Gestão das salvaguardas presentes em cenários de risco médio	63
Tabela 28 - Consolidação dos resultados obtidos no LOPA	81
Tabela 29 - Resultado final da integração do HAZOP e do LOPA.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	HAZOP	4
2.1.1	Contexto Histórico.....	4
2.1.2	Escopo.....	5
2.1.3	Objetivo	5
2.1.4	Metodologia.....	6
2.1.5	Vantagens	15
2.1.6	Limitações	16
2.2	LOPA	17
2.2.1	Contexto Histórico.....	17
2.2.2	Escopo.....	18
2.2.3	Objetivo	19
2.2.4	Metodologia.....	19
2.2.5	Vantagens	32
2.2.6	Limitações	33
2.3	SISTEMAS GERADORES DE VAPOR.....	34
2.3.1	Definição e componentes	34
2.3.2	Caldeiras Flamotubulares	37
2.3.3	Caldeiras Aquatubulares	39
2.3.4	Segurança e acidentes com caldeiras	41
3	ESTUDO DE CASO	44
3.1	Caldeira	44
3.2	Análises de Risco	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Resultados HAZOP	56
4.2	Resultado LOPA.....	64

4.2.1	Considerações Gerais	64
4.2.2	Análise LOPA – Cenário 1I.....	66
4.2.3	Análise LOPA – Cenário 1K	69
4.2.4	Análise LOPA – Cenário 1M.....	72
4.2.5	Análise LOPA – Cenários 3A e 3C	74
4.2.6	Análise LOPA – Cenários 3B e 3E.....	76
4.2.7	Análise LOPA – Cenário 3I.....	79
4.2.8	Considerações sobre o LOPA	80
5	CONCLUSÃO	84
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

A partir da metade do século XX, a indústria química mundial experimentou complexas transformações em sua estrutura, motivadas essencialmente pelo fenômeno da abertura de mercado pós Segunda Guerra Mundial, desenvolvimento da indústria petroquímica a partir de importantes jazidas descobertas no Oriente Médio e à sua consolidação em países cujo histórico era até então inexpressivo (WONGTSCHOWSKI, 2002). O surgimento deste novo cenário alinhado aos avanços tecnológicos contribuiu para que a indústria química mundial vivenciasse um crescimento expressivo nas últimas décadas, permitindo o advento de processos cada vez mais transformadores e complexos. Inevitavelmente, o surgimento de novas técnicas industriais exigiu uma maior compreensão e nível de detalhamento no entendimento da segurança (MANNAN et al., 2016).

No início do século XX, a segurança na indústria estava principalmente relacionada à segurança do trabalhador, limitando-se à programas de prevenção de acidentes baseados no uso de equipamentos de proteção individuais (EPI) e normativas que prezassem a integridade física do colaborador (CROWL; LOUVAR, 2011). No âmbito de segurança de processo, as análises de segurança conduzidas pelas organizações até a década de 50 não dispunham de metodologias que definissem a condução destes estudos, e, portanto, apoiavam-se diretamente no conhecimento e experiência dos engenheiros e demais colaboradores envolvidos nesta análise (CCPS, 2016).

A partir desta transformação, a ideia de uma gestão de segurança capaz de garantir a integridade do processo por métodos analíticos começou a emergir, revolucionando o conceito de segurança de processo. É neste cenário que a compreensão sobre segurança extrapola a relação com o trabalhador e contextualiza-se para a ideia de prevenção de perdas (CROWL; LOUVAR, 2011).

Frente a esse novo panorama, a partir da década de 60, técnicas formais de análise surgiram para atender às recentes necessidades das plantas de produção. Estas metodologias pautavam-se em uma abordagem qualitativa dos riscos oferecidos pelo processo, originando métodos consagrados utilizados na indústria química mundial que perduram até hoje, tais

como Análise Preliminar de Perigos (APP), Análise de Modo de Falha e Efeito (FMEA) e HAZOP (CCPS, 2016). No entanto, nas décadas subsequentes, novos mecanismos foram introduzidos nas organizações para contemplar os riscos de maior criticidade cuja análise exigia um grau de aprofundamento que os métodos qualitativos não podiam oferecer. Tais metodologias baseavam-se em técnicas de modelagem e cálculos, e, portanto, foram classificadas como análises quantitativas de risco (AQR) (MANNAN et al., 2016).

Apesar das décadas de 60 e 70 terem trazido um elevado grau de maturidade para a segurança de processo - por conta do aumento da complexidade das operações - e promovido técnicas que são utilizadas até hoje, foi na década de 80 que a indústria química precisou aprimorar e integrar as percepções existentes no mercado a respeito dos riscos envolvidos em seus processos industriais (KUMAR, 2014). Em 1984, uma planta química na Índia liberou acidentalmente metilisocianato, um material tóxico e inflamável, causando a morte de milhares de pessoas na cidade de Bhopal (CCPS, 2016). Apesar da planta ser equipada com um número de salvaguardas considerado satisfatório, a falha de cada uma destas durante o momento do acidente resultou em consequências gravíssimas à comunidade (ECKERMAN, 2005).

O acidente de Bhopal evidenciou as consequências que um gerenciamento ineficiente dos riscos oferecidos pelo processo pode ocasionar à comunidade, mobilizando esforços da indústria químicas. É neste contexto que a American Institute of Chemical Engineers (AIChE), nos EUA, cria o Center for Chemical Process Safety (CCPS) em 1985, uma organização sem fins lucrativos cuja missão consiste em melhorar a segurança de processos industriais.

O CCPS contribuiu para que uma nova perspectiva sobre o gerenciamento de riscos de um processo fosse desenvolvida e difundida, de modo que atividades e procedimentos fossem estabelecidos para as diferentes etapas de um acidente, dentre estas a prevenção, preparação, mitigação, resposta e restauração. Este panorama, somado às diferentes técnicas de análise de risco originadas nas décadas de 60 e 70, direcionou o gerenciamento de riscos

de processo ao patamar de sofisticação que encontramos nos dias atuais em inúmeras indústrias e complexos químicos (SANDERS, 2005).

À medida que a estruturação do gerenciamento de risco tornou-se cada vez mais madura e capaz de garantir a integridade do processo nas últimas décadas, foi possível que a indústria química investisse tempo e revisitasse uma das etapas mais significativa de toda gestão - a análise de risco. Dessa forma, devido à esta circunstância, novas metodologias baseadas na integração de técnicas consagradas começaram a ser testadas e novos conceitos de análise surgiram, modelando o cenário atual de segurança de processos químicos.

Portanto, este trabalho propõe-se a estudar o Hazards and Operability Study (HAZOP), por ser uma técnica consagrada de análise de risco, e integrá-la à uma das técnicas de análise de risco originadas recentemente na década de 90 e que vem mostrando-se uma boa ferramenta para a avaliação da influência de salvaguardas, a Layers of Protection Analysis (LOPA). Tais metodologias foram aplicadas a um estudo de caso de um processo que se encontra presente no setor industrial desde o início da Revolução Industrial, a geração de vapor, através de uma caldeira.

1.1 Objetivo

A integração das metodologias de análise de risco HAZOP e LOPA objetiva compreender os benefícios que a associação entre estes dois métodos fornece ao gerenciamento de riscos do processo estudado. Além disso, busca-se compreender como cada elemento e conceito de cada método possibilita a identificação de novas barreiras preventivas e mitigatórias para a redução do risco dos cenários avaliados a níveis aceitáveis.

Dessa forma, compreende-se entre os objetivos específicos deste trabalho:

- integrar as premissas fundamentais de cada metodologia e aplicá-las a um estudo de caso, no caso, uma caldeira flamotubular;
- avaliar e discutir os principais resultados obtidos a partir da implementação conjunta destas técnicas no gerenciamento de risco do processo estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HAZOP

2.1.1 Contexto Histórico

Em 1963, a Heavy Chemical Organic Division (Divisão de Substâncias Químicas Orgânicas Pesadas) da Imperial Chemical Industries (ICI) estava desenvolvendo o projeto da planta de produção de fenol e acetona a partir de cumeno, contudo, sob uma severa redução de orçamento para a implementação deste. Diante desta situação, líderes do Departamento de Produção reconheceram que tais cortes comprometiam severamente a operação da planta, e uma equipe de três membros foi responsável por exibir evidências à Alta Direção que o desempenho esperado estava comprometido (KLETZ, 1997).

A técnica adotada pelo grupo consistiu na avaliação do processo por meio de uma análise crítica direcionada por discussões entre os membros com o objetivo de determinar as deficiências do projeto. Estas discussões eram estabelecidas por meio de perguntas que avaliavam a operação sob uma determinada circunstância, possibilitando a identificação de perigos potenciais e falhas operacionais que não haviam sido contemplados no projeto. Em suma, a técnica foi empregada de modo a gerar desvios ao processo que permitissem o reconhecimento de deficiências operacionais. A difusão desta técnica nos novos projetos da ICI permitiu o reconhecimento desta como uma metodologia de análise de perigos potenciais e falhas operacionais, sendo considerada a primeira aplicação prática da metodologia HAZOP registrada na indústria (KLETZ, 1997).

Na literatura, a primeira publicação sobre HAZOP foi um artigo escrito por Herbert Lawley, apresentado em 1973 no AIChE Loss Prevention Symposium. Em 1977, o Chemical Industries Association (CIA) Guide encorajou o emprego do HAZOP para fins de análise de risco nas indústrias químicas de modo a tornar seus processos mais seguros. (CRAWLEY; TYLER, 2015).

À medida que esta técnica alcançava diferentes indústrias com operações totalmente distintas, novos desvios passaram a ser utilizados no HAZOP de modo a proporcionar uma análise focada na operação estudada. Além disso, com a introdução de plantas automatizadas

nas indústrias químicas por todo globo, novos perigos e deficiências operacionais no projeto avaliado começaram a ser identificados pela equipe responsável, evidenciando a versatilidade da metodologia HAZOP (KLETZ, 1997).

Após mais de 40 anos de uso do método HAZOP e de diversas modificações ocasionadas pela mutabilidade das operações das indústrias químicas e das tecnologias emergentes, pode-se dizer que esta técnica segue amplamente aceita e cumpre a necessidade de grande variedade de operações, consagrando-se como uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de riscos de um determinado processo até os dias de hoje (KOTEK; TABAS, 2012).

2.1.2 Escopo

Apesar de ter surgido como uma alternativa para analisar projetos de novas plantas, a aplicação da metodologia do estudo HAZOP não se limitou a este escopo, e, atualmente, exerce uma função essencial em diferentes etapas do ciclo de vida de uma determinada unidade química atual. Modificações de grande e pequeno impacto em plantas existentes, elaborações de planos de emergência de unidades industriais, comissionamentos e descomissionamentos de plantas químicas também se provaram capazes de usufruir das informações que o estudo HAZOP gera (CRAWLEY; TYLER, 2015).

Compreender a abrangência oferecida por este método torna-se necessário para entender como seu alcance está distribuído pelas organizações como forma de gerenciamento de riscos. Entretanto, só é possível analisar o porquê de como um dos primeiros métodos de análise de riscos foi capaz de se posicionar ao longo de décadas como uma forte ferramenta, e ser reconhecido como umas das técnicas mais consagradas, quando examinamos seu propósito.

2.1.3 Objetivo

O objetivo do estudo HAZOP tradicional é identificar riscos potenciais e problemas operacionais envolvidos em um processo por meio da colaboração de uma equipe multidisciplinar. A partir disto, a equipe deve ainda ser capaz de elaborar ações preventivas relacionadas a cada um dos cenários críticos identificados no processo (KOTEK; TABAS, 2012).

Crawley e Tyler (2015), por sua vez, oferecem maior detalhamento quando expressam que o objetivo do estudo HAZOP é identificar e avaliar quaisquer riscos remanescentes em um processo ou operação que não foram contemplados em etapas anteriores do projeto. Além disso, frisam que os riscos de interesse estão associados aos danos que estes oferecem às pessoas, propriedade, meio ambiente e qualidade, seja dentro ou fora do espaço físico onde é conduzido o processo químico.

Ao relacionar ambas definições, evidencia-se que o estudo HAZOP desempenha a função de ferramenta de análise de riscos capaz de proporcionar o entendimento de como estes estão distribuídos no processo. A identificação e avaliação dos riscos permite que soluções sejam desenvolvidas a fim de fornecer informações para que, em etapas subsequentes de análise de risco, seja possível eliminar ou mitigar os danos oferecidos por estes a níveis aceitáveis.

2.1.4 Metodologia

2.1.4.1 Definição da equipe multidisciplinar

Os recursos humanos da metodologia de estudo HAZOP constituem a primeira etapa para a identificação dos riscos do processo. Os profissionais designados para constituírem a equipe de avaliação devem possuir um alto grau de conhecimento das entradas e saídas do processo químico, das normas e procedimentos de segurança difundidos na indústria e da engenharia da planta, de acordo com Kotek e Tabas (2012).

Segundo Mushtaq e Chung (2000), para que a equipe tenha autonomia e capacidade de conduzir a análise de riscos assertivamente, o quadro de membros ideal deve seguir o que se encontra representado na Tabela 1. Apesar desta conformação não ser uma exigência para garantir o sucesso da implementação do HAZOP, adotá-la como referência aumenta a possibilidade da análise ser eficiente em reconhecer os riscos.

Além disso, outra exigência que deve ser obedecida é que o líder da equipe deve ter, no mínimo, as seguintes atribuições:

- a) Deve estar treinado formalmente na atividade de liderança da técnica HAZOP;

- b) Deve ter em seu histórico participações de, no mínimo, cinco reuniões, ou de ter sido líder em pelo menos duas destas;
- c) Deve ter conhecimento sobre o processo analisado;
- d) Deve preparar e emitir o relatório do HAZOP para o Responsável Técnico.

Tabela 1 - Cargos e Áreas de conhecimento dos integrantes da equipe do estudo HAZOP.

Fonte: CCPS (2008)

Cargos	Áreas de conhecimento
Engenheiro do Projeto	Detém conhecimento das necessidades, objetivos, custos e prazos do projeto da planta química, o engenheiro do projeto é capaz de incorporar modificações no projeto de acordo com as necessidades apresentadas.
Engenheiro de Processo	Detém conhecimento do processo analisado, e, portanto, contribui no esclarecimento das particularidades oferecidas por este.
Engenheiro de Segurança	Detém conhecimento de normas, políticas e métodos de segurança da indústria e busca analisar criticamente os aspectos de segurança do processo.
Especialista Químico	Detém conhecimento das substâncias químicas, bem como de suas propriedades quando submetidas à certas circunstâncias presentes no processo.
Líder da Equipe	Detém conhecimento sobre a metodologia de estudo HAZOP e auxilia na condução deste.

Existem ainda requisitos e atividades para os demais participantes envolvidos na condução do HAZOP. Dentre estes, destaca que os participantes, de forma geral:

- a) Devem analisar a documentação de suporte previamente;

b) Devem ter experiência mínima de 3 anos na área que representam;

É importante ressaltar que, para a escolha dos demais membros, deverá ser levada em consideração a experiência prévia destes em estudos HAZOPs conduzidos, de modo a garantir a repetibilidade dos critérios. Esta condição torna-se fundamental visto que é necessário manter uma coerência entre as metodologias empregadas em plantas de uma mesma empresa.

2.1.4.2 Definição do escopo

Na indústria, é comum que a equipe multidisciplinar divida o processo em diversos segmentos, de modo a aumentar a robustez da análise de riscos e permitir um direcionamento pontual a cada um destes. O método de segmentação das etapas do processo fica a critério da equipe avaliadora devido à particularidade que cada processo químico industrial oferece. Na indústria química, cada segmento dividido é chamado de nó (CCPS, 2008).

Uma vez definido o nó do processo que será avaliado, inicia-se a fase de preparação do estudo, sendo fundamental a reunião de documentos que forneçam informações a respeito da seção a ser avaliada. Neste contexto, dispor de conhecimento e material sobre as substâncias químicas e suas propriedades, procedimentos operacionais aplicáveis e o diagrama de instrumentação do processo é essencial para que a equipe responsável tenha recursos suficientes para auxiliar no reconhecimento dos riscos do processo (VENKATASUBRAMANIAN; VAIDHYANATHAN, 1994).

2.1.4.3 Estabelecendo os desvios

Com a equipe definida, nós efetivamente estabelecidos e documentação disponível, inicia-se a fase de formulação de desvios passíveis de ocorrerem no processo. Segundo CCPS (2008), um desvio é uma alteração nas condições de projeto pré-estabelecidas. Como estas condições estão associadas aos parâmetros operacionais do processo, é preciso que estes estejam documentados e acessíveis à equipe, uma vez que assim torna-se possível entender quais desvios podem ocorrer na operação avaliada.

O desvio é abordado pela equipe através da união de um parâmetro do processo e uma palavra-chave, de acordo com Crawley e Tyler (2015). Palavras-chave, também chamadas de palavras-guia por demais autores, são definidas como “palavras simples que são

utilizadas para qualificar ou quantificar os desvios de cada seção do processo de modo a guiar e estimular a identificação de riscos”. Nas Tabelas 2, 3 e 4 encontram-se as palavras-chave, parâmetros e exemplos de desvios, respectivamente, difundidos por indústrias químicas no mercado mundial.

Tabela 2 - Palavras-chave e significados definidos pela ICI na aplicação da metodologia HAZOP. Fonte: CCPS (2008).

Palavras-chave	Significado
Não ou Sem	Não cumprimento da determinação
Menor ou Menos que	Redução quantitativa
Maior ou Mais que	Aumento quantitativo
Uma parte de	Redução qualitativa
Tão alto quanto	Aumento qualitativo
Inverso	Lógica oposta à determinação
Diferente de	Substituição completa

Tabela 3 – Exemplos de Parâmetros Operacionais considerados na Indústria Química. Fonte: CCPS (2008).

Parâmetros		
Fluxo	Pressão	Temperatura
Nível	Tempo	Composição
pH	Agitação	Frequência
Viscosidade	Voltagem	Separação

Tabela 4 – Exemplos de possíveis desvios originados a partir da combinação de palavras-chave e parâmetro. Fonte: CCPS (2008).

Palavra-chave	Parâmetro	Desvio
Sem	Agitação	Sem agitação
Mais	Pressão	Aumento da pressão
Inverso	Fluxo	Contra fluxo
Menor	Nível	Diminuição do Nível

Apesar das sugestões apresentadas estarem difundidas mundialmente, a metodologia utilizada varia de acordo com as necessidades da organização. Empresas e instituições

modificam a relação de palavras-chave e parâmetros com a finalidade de estudar especificamente suas operações e direcionar a equipe responsável de forma mais efetiva para as seções onde possam existir problemas significativos de segurança (CCPS, 2008). Além disso, há casos de elaborações autorais de palavras-chave quando o padrão difundido na indústria não é capaz de suprir as demandas de uma análise robusta do processo em questão (KLETZ, 1997).

Invariavelmente, desvios devem ser originados para cada e todo equipamento pertencente ao processo (DOWELL; WILLIAMS, 2005). Além disso, Crawley e Tyler (2015) defendem que a união de um parâmetro e palavra-chave possibilita a geração de um desvio somente se houver significado físico para tal combinação. Para Kotek e Tabas (2012), a fase de geração de desvio é a responsável por representar as particularidades do processo avaliado, e, portanto, torna-se um ponto crucial para que a avaliação dos problemas operacionais e de segurança enfrentados pelo processo sejam endereçados adequadamente.

Os cuidados discutidos pelos autores para o arranjo de palavras-chave e parâmetros evidencia, portanto, a importância desta etapa no fluxo do estudo HAZOP. Dessa forma, uma combinação eficiente destes termos possibilita que a determinação de causas iniciadoras, fase sucessora à elaboração dos desvios, represente adequadamente a realidade do processo, direcionando progressivamente a um método de análise efetivo.

2.1.4.4 Identificando causas e consequências

Cada desvio estabelecido na etapa anterior exigirá uma avaliação da equipe a fim de buscar possíveis causas que resultem no desvio apontado na análise. Segundo Crawley e Tyler (2015), não deve haver restrição quanto à natureza da causa durante a discussão de identificação, e, portanto, inúmeras são as possibilidades que constituem as alternativas de causas de desvios nesta fase. Diante disso, conforme afirma Kletz (1997), fatores humanos, erros em sistemas computadorizados e fadiga de material são causas admissíveis no estudo HAZOP.

Ao prosseguir com a metodologia, para cada desvio especificado é necessário também avaliar a consequência gerada por este ao sistema. Entretanto, a escolha da consequência não deve ser arbitrária, mas sim abordar consequências diretas ao próprio

processo sem considerar as futuras implicações que estas podem ocasionar, como por exemplo, danos à propriedade, incêndio em poça ou lesões à funcionário (CCPS, 2008).

A percepção do que compromete e o que é comprometido no processo a partir do desvio esclarece à equipe os possíveis cenários os quais a planta está sujeita, direcionando a análise para a próxima etapa do estudo HAZOP: a escolha de salvaguardas que integrarão o processo.

2.1.4.5 Identificando salvaguardas

Todas as etapas predecessoras foram orientadas de modo que a análise fosse concluída possibilitando a identificação de riscos e erros operacionais associados ao processo para que proteções pudessem ser implementadas objetivando a prevenção e/ou mitigação destes. Estas proteções são chamadas de salvaguardas e visam minimizar a ocorrência das causas e as severidades das consequências dos desvios listados durante a análise.

Crawley e Tyler (2015) afirmam que existem incertezas durante a seleção das salvaguardas que integrarão o processo. Uma das abordagens usuais é a avaliação da consequência descartando-se quaisquer salvaguardas existentes em vigor, isto é, alarmes, *vents*, etc. Desse modo, a equipe baseia-se no cenário discutido a fim de definir quais são as salvaguardas e planos de ação necessários para garantir a segurança e integridade do processo.

Em contrapartida, algumas organizações adotam metodologias que consideram as salvaguardas instaladas no processo, visto que julgam que não é possível ignorá-las e desvincular suas contribuições à segurança do processo em um projeto de planta bem elaborado. Portanto, procedem com esta avaliação e, por conseguinte, estabelecem as novas salvaguardas e ações a partir da mesma fonte de informações: as causas e consequências dos desvios determinados.

2.1.4.6 Classificação do Risco

Para os casos onde o HAZOP é aplicado com o objetivo de avaliar os riscos de forma mais branda, como por exemplo em revisões periódicas, a etapa de identificação de salvaguardas configura a última fase da análise de risco. Tal fato ocorre pois, uma vez as salvaguardas estejam definidas, é possível estabelecer ferramentas para garantir sua

implementação e, conseqüentemente, permitir que a condução do processo se dê de forma eficiente e segura (CCPS, 2008).

No entanto, quando a avaliação é conduzida buscando-se mapear os riscos do processo com maior rigor e definir prioridades baseadas neste, torna-se indispensável classificar o risco envolvido para os cenários determinados. Diante disso, a partir das causas, conseqüências e salvaguardas explicitadas nas etapas anteriores, Crawley e Tyler (2015) salientam a relevância de classificar a frequência e severidade de cada cenário a fim de possibilitar a avaliação dos riscos oferecidos por este. Segundo Kletz (1997), essa avaliação, conduzida de forma estritamente qualitativa, busca oferecer à equipe informações preliminares a respeito da natureza do evento, sem que métodos quantitativos sejam empregados nesta fase.

Portanto, para que a avaliação do risco dos cenários determinados no HAZOP seja possível, inicialmente deve-se elaborar categorias de classificação para a frequência e severidade de um cenário. Vale frisar que o número de categorias utilizado para ambos varia de acordo com os critérios adotados pela organização, entretanto, convencionalmente, considera-se 4 ou 5 categorias um número suficiente para que as diferentes faixas de frequência e severidade sejam contempladas.

Na categorização de frequência, a unidade adotada corresponde a ano⁻¹. Além disso, a frequência indicada para cada categoria depende, sobretudo, da organização que conduziu o HAZOP. Apesar do grande número de possibilidades, as categorias encontradas na indústria tendem a adotar padrões semelhantes, onde as frequências geralmente são segmentadas em 5 categorias. (CCPS, 2008). A Tabela 5 apresenta possíveis categorias de classificação de frequência para cenários acidentais adotados internacionalmente.

Tabela 5 - Exemplo de Categorias de Frequência. Fonte: CCPS (2008)

Categorias de Frequência	
Categoria	Frequência de Ocorrência do Evento
1 - Frequente	1 vez em 1 ano (possível de ocorrer frequentemente)
2 - Provável	1 vez em 5 anos (possível de ocorrer sob circunstâncias normais)
3 - Ocasional	1 vez em 15 anos (possível de ocorrer sob circunstâncias não usuais)
4 - Improvável	1 vez em 30 anos (possível de ocorrer durante vida útil do equipamento)
5 - Remota	1 vez em 100 anos (possível, mas não provável de ocorrer durante a vida útil da planta)

Já na categorização da severidade, diferentes critérios podem ser adotados para mensurar a ordem de grandeza dos danos ocasionados por um determinado evento. Dentre estes, destacam-se a quantidade de substância química liberada, diminuição no volume de produção, prejuízo gerado ou lesões em pessoas. Segundo Baybutt (2015), o critério de severidade mais recorrente na indústria é aquele orientado pelos danos causados a humanos, uma vez que dessa forma a organização consegue implementar medidas mais assertivas capazes de garantir a segurança de seus funcionários, contratados e terceiros. A Tabela 6 fornece uma das possibilidades de categorização da severidade de evento baseadas em danos em humanos.

Tabela 6 - Exemplo de Categorias de Severidade. Fonte: CCPS (2008)

Categorias de Severidade	
Categoria	População Interna
1- Catastrófica	Uma ou mais fatalidades
2 - Severa	Lesão com afastamento
3 - Moderada	Pequenos ferimentos
4- Desprezível	Sem ferimentos, pequenos danos a propriedade/equipamentos
5 - Negligenciável	Problema operacional recuperável

Uma vez que as categorias de frequência e severidade tenham sido definidas pela equipe, é possível classificar qualitativamente os cenários, sendo estes representados pelos pares de causa e consequência definidos nas etapas anteriores. A combinação de uma categoria de frequência com uma categoria de severidade permite mensurar o risco oferecido por aquele evento ao processo.

Para que essa estimativa seja realizada satisfatoriamente, torna-se fundamental estabelecer-se uma categorização qualitativa para o risco. Na indústria, a ferramenta mais utilizada é a matriz de risco, onde, com base nas combinações das categorias de frequência e severidade, são estabelecidas possíveis categorias (CCPS, 2008). As possibilidades de combinações variam de acordo com a organização, no entanto, usualmente, a quantidade de

categorias de risco limita-se a três. Na Tabela 7 é apresentado um exemplo de uma matriz de risco desenvolvida a partir das combinações de frequência e severidade de um evento qualquer, onde estão definidas as categorias de risco baixo, intermediário e alto.

Tabela 7 - Exemplo de uma matriz de risco que estabelece as categorias de risco. Fonte: CCPS (2008)

Matriz de Risco						
		Frequência				
		5 - Remota	4 - Improvável	3 - Ocasional	2 - Provável	1 - Frequente
Consequência	1- Catastrófica	Intermediário	Intermediário	Alto	Alto	Alto
	2 - Severa	Intermediário	Intermediário	Intermediário	Alto	Alto
	3 - Moderada	Baixo	Baixo	Intermediário	Intermediário	Alto
	4- Desprezível	Baixo	Baixo	Baixo	Intermediário	Intermediário
	5 - Negligenciável	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Intermediário

Uma vez definida a matriz de risco, é possível classificar, qualitativamente, cada um dos cenários identificados quanto ao seu risco. Essa compreensão permite segmentar os eventos críticos e, conseqüentemente, estabelecer prioridades para que as medidas capazes de reduzir o risco oferecido por estes sejam implementadas prioritariamente. Dessa forma, a classificação do risco oferecido por cada um dos eventos corresponde à última etapa do HAZOP.

No entanto, é válido frisar que para o caso onde o HAZOP seja uma etapa prévia de uma análise de risco semiquantitativa ou quantitativa, é possível utilizar a matriz de risco para selecionar os cenários que exigirão uma análise mais aprofundada. Tal fato é justificado pois, como as classificações da frequência e da severidade tendem a ser superestimadas pela equipe, os eventos de baixo risco dispensam reavaliações enquanto eventos críticos podem ter seu risco reavaliado por metodologias adicionais mais assertivas. Portanto, esta categorização via matriz de risco também permite que o volume de eventos avaliados seja minimizado em análises que integrem o HAZOP a um outro método, conferindo agilidade e otimização ao processo de avaliação de risco (CRAWLEY; TYLER, 2015).

2.1.5 Vantagens

Segundo Baybutt (2015), o estudo HAZOP é a metodologia de análise de riscos de processo mais utilizada no mundo atualmente e é classificada por muitos profissionais da área como o método mais minucioso e completo.

Primeiramente, conforme destaca Dowell e Williams (2005), a metodologia HAZOP é capaz de prever os riscos e problemas operacionais de um processo de forma harmonizada e sequencial. A divisão de nós permite o entendimento individual de cada uma das etapas do processo e de que forma a operação pode ser impactada. Esta delimitação se reflete no nível de sofisticação que a avaliação gera à equipe multidisciplinar responsável por este processo.

Aliado a isto, a precisão empenhada neste estudo permite que considerações operacionais de projeto sejam reavaliadas devido a identificação de riscos não reconhecidos na fase de desenvolvimento do processo. Este reconhecimento, por fim, garante que haja acréscimo de salvaguardas capazes de mitigar quaisquer riscos provenientes dos cenários identificados (SWANN; PRESTON, 1995).

Além disso, a metodologia implementada no HAZOP também ganha destaque segundo Kletz (1997). Uma vez que os desvios são responsáveis por guiar a equipe ao reconhecimento de riscos e deficiências operacionais, combinações de palavras-chave e parâmetros operacionais para diferentes processos químicos encontram-se disseminadas em organizações por meio de normas e difundidas na indústria por meio de manuais emitidos por instituições de engenharia química. Estas informações fornecem suporte para que a análise seja conduzida de forma orientada, permitindo uma maior eficiência no reconhecimento de riscos e uma destinação de esforços à avaliação de causas e consequências.

Somado a isto, Baybutt (2015) afirma que o uso de diferentes desvios originados a partir da combinação de palavras-chave e parâmetros, em alguns casos, direcionam para um mesmo cenário acidental. Esta repetição, de acordo com o autor, evidencia o nível de detalhamento que a análise oferece, diminuindo a probabilidade de determinado cenário não ser contemplado neste estudo.

Diante das vantagens oferecidas, entende-se as principais razões pelas quais um dos métodos pioneiros de análise de riscos tornou-se consagrado e é utilizado mundialmente até hoje. No entanto, é preciso considerar suas limitações para que sua utilização se restrinja somente aquilo que o método se propõe.

2.1.6 Limitações

As evidências apresentadas demonstram que a discussão proporcionada pelo HAZOP permite o reconhecimento de diversos cenários acidentais, contribuindo para o objetivo da análise. No entanto, a ausência de algoritmos e modelos de método heurístico viabiliza a desconsideração de determinados cenários, diminuindo sua eficiência. A falta de um padrão claro de seleção é observada, sobretudo, nas etapas de determinação de eventos iniciadores e consequências do desvio obtido, tornando-se etapas críticas neste estudo (BAYBUTT, 2015).

A subjetividade da escolha dos parâmetros impacta na identificação de cenários pertinentes ao objetivo do estudo. Uma vez que a definição dos parâmetros pode contemplar variáveis de processo e atividades operacionais, existe a possibilidade de determinados cenários serem ignorados caso o líder da equipe não estabeleça um critério de seleção capaz de reconhecer os riscos e problemas operacionais do processo. A seleção das palavras-chave também está suscetível a um método inadequado de escolha, e, portanto, intensifica a incerteza quanto ao reconhecimento posterior dos cenários objetivados. (BAYBUTT, 2015)

Do mesmo modo que a origem de diferentes desvios permite que se alcancem os mesmos cenários, tal convergência pode impactar negativamente a percepção do time em relação aos resultados obtidos pela análise. A identificação de dois cenários idênticos pode frustrar a equipe multidisciplinar pela crença de que não há progresso à medida que se avança com a análise. Tendo em vista que o entrosamento do grupo é fundamental para uma condução eficiente do estudo, o impacto na confiança do grupo em buscar cenários pode comprometer a identificação destes de forma considerável (KLETZ, 1997).

Por fim, a metodologia HAZOP enquadra-se como uma metodologia para a identificação de riscos ou cenários acidentais. Adotá-la como um método único para uma análise de risco aprofundada, de forma avulsa, é ineficiente e insuficiente para que a gestão de risco seja conduzida no processo estudado (CRAWLEY; TYLER, 2015).

Desse modo, torna-se essencial definir etapas posteriores para que as informações obtidas a partir desse estudo sejam complementadas por métodos adicionais a fim de que os riscos envolvidos no processo químico de interesse sejam gerenciados e mitigados.

2.2 *Layers of Protection Analysis (LOPA)*

2.2.1 Contexto Histórico

Em diferentes processos químicos, diversas salvaguardas estão implementadas de modo a reduzir a frequência de consequências indesejadas. Ao longo da década de 90, muito se discutia a respeito do número e capacidade de proteção das salvaguardas empregadas, uma vez que os métodos de seleção se baseavam majoritariamente em critérios subjetivos. A ausência de métodos sistemáticos e direcionados resultava em inúmeras perguntas, como por exemplo: “O quão suficientemente seguro está o processo?”; “Quantas camadas de proteção são necessárias?”; “Quanta redução do risco esta camada ofereceu ao processo?” (CCPS, 2001).

Neste cenário, a sistemática LOPA (*Layers of Protections Analysis* ou Análise de Camadas de Proteção) surge com o objetivo de responder tais questionamentos e fornecer um método objetivo à indústria química a respeito da quantificação, de forma estimada, da redução de riscos e sua relação com as salvaguardas existentes (CCPS, 2001).

Os primeiros registros que remetem à origem desta metodologia estão disponíveis no *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes*, publicado pelo CCPS em 1993. A metodologia LOPA foi sugerida como um método para determinar o nível de integridade de uma função instrumentada de segurança. Apesar de ter surgido inicialmente com um propósito específico, a sistemática forneceu um modelo passível de ser replicado em diversas análises (SUMMERS et al., 2011).

O desenvolvimento da análise LOPA se deu em diferentes empresas, adaptando-se de acordo com o processo de interesse. O desenvolvimento gradativo de expertise nesta área, alinhado à uma demanda por metodologias consistentes de análise de risco, possibilitou que o método se tornasse relevante na segurança de processos. Neste contexto, documentos sobre definição de critérios e de técnicas formais da metodologia LOPA começaram a ser

desenvolvidos, possibilitando a difusão desta técnica ao longo de toda indústria química. (MANNAN et al., 2016).

Diante da crescente aplicação da metodologia, o CCPS reuniu grandes indústrias químicas visando reunir informações sobre as boas práticas e técnicas empregadas durante a análise LOPA. Estas informações possibilitaram o desenvolvimento de um material sobre como conduzir uma análise de riscos eficiente baseando-se no conceito de camadas de proteção. Conforme pretendido, a reunião destas diretrizes e orientações em um único formato possibilitou a difusão desta metodologia pela indústria química, disponibilizando informações, dados e técnicas utilizados como referências até os dias atuais (CCPS, 2001).

2.2.2 Escopo

De acordo com CCPS (2001), a metodologia LOPA é aplicável a maioria das etapas do ciclo de vida de um processo. No entanto, os benefícios de sua aplicação destacam-se, sobretudo, nas seguintes etapas:

- a) Após a definição do projeto do processo. É nesta etapa onde o fluxo do processo já está definido, bem como os documentos da planta, tais como projeto arquitetônico e P&IDs estão concluídos e disponíveis;
- b) Sempre que um processo químico, malha de controle ou camada de proteção for modificado.

São nessas etapas onde a análise LOPA potencializa seus resultados e seus impactos na segurança de processo, visto que tais fases consolidam o projeto do processo, e, portanto, são predecessoras à avaliação das camadas de proteção. No entanto, também é possível aplicá-la em diferentes fases do ciclo de vida de uma planta. A Figura 1 explicita as fases do ciclo de vida nas quais o LOPA pode ser aplicado de modo a orientar no gerenciamento de riscos.

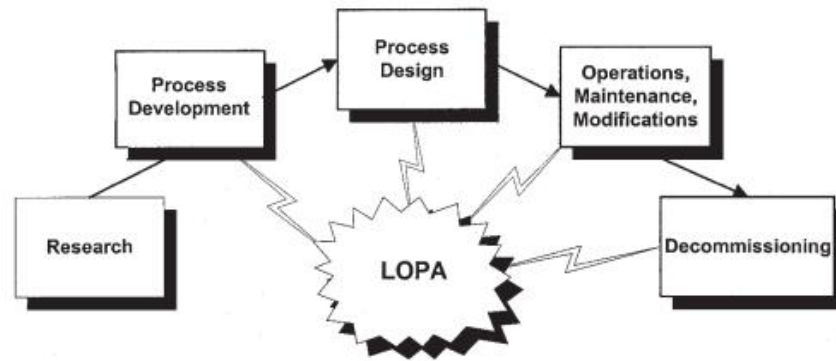


Figura 1- Possíveis fases de implementação da análise LOPA. Fonte: CCPS (2001)

2.2.3 Objetivo

O método de análise LOPA busca avaliar um cenário acidental partindo-se de um par de causa e consequência. Devido a necessidade de definir pares de causa e consequência, este método é altamente empregado após a condução de uma análise qualitativa de riscos, como por exemplo, o HAZOP. As informações herdadas são utilizadas pelo LOPA de modo a conduzir uma nova análise de riscos, baseada em estimativas, que proporcione um grau de avaliação mais sofisticado. No entanto, por fundamentar-se em estimativas, o método LOPA não fornece o grau de complexidade visto em métodos quantitativos (AQR) (CCPS, 2001). Portanto, essa característica fornece à metodologia LOPA a classificação de análise semiquantitativa, a qual objetiva, por meio de estimativas, determinar se as salvaguardas em vigor são capazes de mitigar o risco do processo dentro de um critério pré-estabelecido a níveis aceitáveis (DOWELL; WILLIAMS, 2005).

2.2.4 Metodologia

De modo similar às demais análises de riscos, o estudo LOPA pode ser segmentado em diversas etapas. De acordo com o CCPS (2001), a sequência de fases necessárias para alcançar o objetivo do processo está ilustrado na Figura 2.

De acordo com a figura, a etapa inicial da análise consiste na estimativa da consequência e da severidade. A partir disto, na segunda etapa, define-se os cenários (*developing scenarios*) que podem levar às consequências discutidas na fase inicial. Na terceira etapa, busca-se avaliar quais são as causas, e suas frequências de ocorrência, que

podem levar aos cenários da etapa anterior (*identifying initiating event frequency*). Ao definir a causa e consequência dos cenários, prossegue-se para a quarta etapa: a determinação das camadas de proteção independentes (IPL: *independent protection layer*), uma categoria de salvaguarda que pode ser classificada como efetiva, auditável e independente. A partir da caracterização e dos valores obtidos nas fases anteriores, calcula-se a frequência de ocorrência do cenário, contando com as IPLs, permitindo a determinação do risco envolvido no processo. Finalmente, compara-se o risco obtido anteriormente ao critério de risco de referência a fim de verificar se as salvaguardas em vigor permitem a mitigação desejada ao processo.

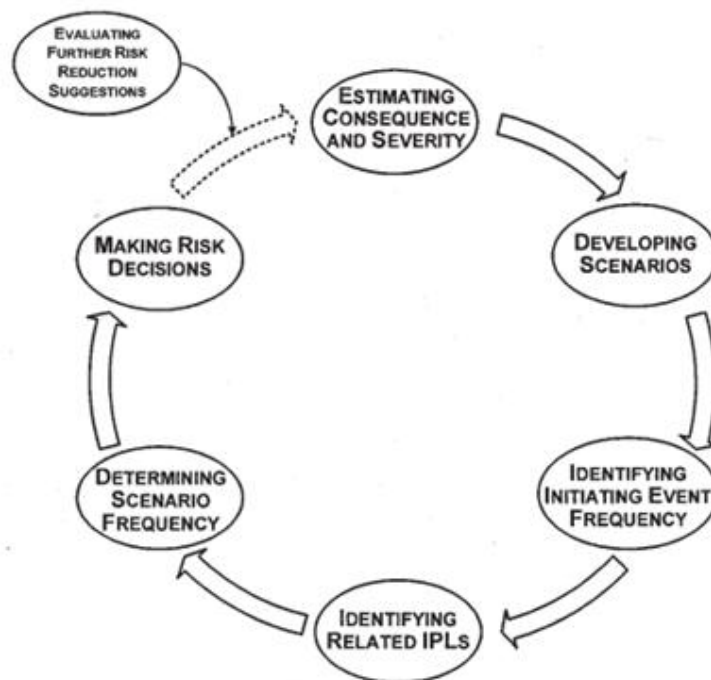


Figura 2 – Etapas da Análise LOPA. Fonte: CCPS (2001)

2.2.4.1 Estabelecendo a consequência

O conceito de consequência na metodologia LOPA é definido como a saída indesejável de qualquer cenário. Além disso, tais consequências são estimadas em uma ordem de magnitude de severidade, exigindo menos esforço que modelagem matemática proveniente de análises de riscos quantitativas (AQR). No entanto, definir o momento em que a avaliação da extensão da consequência é realizada varia de acordo com a organização. Exemplos no mercado indicam que a definição de consequência pode alternar entre “vazamento de produto” até a estimativa do impacto final em termos de danos ou prejuízos (CCPS, 2001).

Os dados referentes às indústrias químicas permitiram que o CCPS estabelecesse a categorização das formas de determinação de consequências através de três métodos:

a) Abordagem sem referência a lesões em pessoas

A classificação adotada neste método não se baseia na estimativa de lesões ou fatalidade em pessoas. Como alternativa, a equipe apoia-se em parâmetros que esta define ser um objeto de análise suficiente para mensurar o grau de severidade de um determinado cenário (CCPS, 2001).

Para a consolidação desse método, estabelece-se uma matriz capaz de relacionar a característica do cenário com algum parâmetro capaz de mensurar a consequência gerada a partir deste, como por exemplo, quantidade de substância química liberada, perda de produção ou prejuízo financeiro (SUMMERS et al., 2011). Dessa forma, é possível desenvolver categorias a partir deste parâmetro e avaliar a severidade das consequências do evento com bases nestas. A Tabela 8 apresenta um exemplo específico para a liberação de substância química.

b) Estimativa qualitativa com lesões em pessoas

Diferentemente do primeiro método, esta abordagem baseia-se no impacto final às pessoas como a consequência de interesse, no entanto, por meios estritamente qualitativos. O líder da equipe é responsável por atribuir consequências a pessoas a cada cenário, utilizando como recursos sua experiência prévia em análises de riscos ou tabelas matriciais existentes capazes de correlacioná-los (CCPS, 2001). A Tabela 9 apresenta um exemplo de tabelas matriciais utilizadas para associar uma determinada consequência a um nível de severidade.

Tabela 8 - Classificação da severidade da consequência sem referência a danos em pessoas.

Fonte: CCPS (2001)

Característica da liberação (TB corresponde a Temperatura de Ebulição)	Proporção da liberação					
	Liberação de 1 – 10 kg	Liberação de 10 – 100 kg	Liberação de 100 – 1000 kg	Liberação de 1000 – 10000 kg	Liberação de 10000 – 100000 kg	Acima de 100000 kg
Extremamente tóxico acima da TB	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5	Categoria 5	Categoria 5	Categoria 5
Extremamente tóxico abaixo da TB ou muito tóxico acima da TB	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5	Categoria 5	Categoria 5
Muito tóxico abaixo da TB ou inflamável acima da TB	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5	Categoria 5
Inflamável acima da TB	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
Líquido combustível	Categoria 1	Categoria 1	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 2	Categoria 3

Os principais diferenciais deste método em relação ao anterior consistem na facilidade de compreensão do impacto associado ao cenário quando relaciona sua consequência a danos em pessoas. Além disso, grande parte das organizações instituem internamente diretrizes corporativas que buscam alcançar metas de segurança em função de lesões e danos a humanos, permitindo uma interseção da metodologia com a indústria química (CCPS, 2001).

c) Estimativa qualitativa com lesões em pessoas com ajustes de probabilidade

Além de propor a classificação da severidade de acordo com o foco nos danos causados às pessoas, este método adota uma premissa quantitativa na qual corrige a classificação de acordo com a probabilidade que o evento associado à consequência tem de

ocorrer. Dentre estes, destacam-se: formação de nuvem tóxica ou inflamável, presença de um indivíduo na área acidental ou presença de fontes de ignição na área acidental (CCPS, 2001).

Tabela 9 - Modelos de classificação para consequências qualitativas com referência a danos em pessoas. Fonte: CCPS (2001)

Consequência Baixa	
Funcionários	Lesão leve ou sem lesão. Sem afastamento
Consequência Média	
Funcionários	Lesão moderada. Possibilidade de afastamento
Consequência Alta	
Funcionários	Uma ou mais lesões graves.
Consequência Muito Alta	
Funcionários	Uma ou mais fatalidades

Estes ajustes permitem que se alcance uma maior precisão durante a classificação da severidade, possibilitando uma análise de risco mais aprofundada nas etapas sucessoras do LOPA, conforme explicitado na seção 3.4.5.

2.2.4.2 Desenvolvendo cenários

A etapa de desenvolvimento de cenários é o momento de compreender a sequência de eventos que se origina a partir do evento iniciador até a consequência indesejada. De acordo com Myers (2013), cada cenário pode ser caracterizado por no mínimo dois elementos:

- a) Um evento iniciador que inicia a cadeia de eventos;
- b) Uma consequência a qual o sistema alcança caso a cadeia de eventos não seja interrompida.

Desse modo, cada cenário é identificado por um único par de evento iniciador e consequência. Caso um evento iniciador resulte em duas ou mais consequências, cenários distintos deverão ser analisados (CCPS, 2001).

Além destes, outros conceitos tornam-se fundamentais para garantir o grau de aprofundamento exigido pelo método LOPA na análise de um cenário, dentre eles, o evento

permissor e as camadas de proteção independentes (*Independent Protection Layers*, ou IPL). O evento permissor caracteriza-se como condições que devem estar presentes para que um evento iniciador possa atingir uma determinada consequência (BAYBUTT, 2014). Já as camadas de proteção independentes referem-se aos dispositivos, sistemas ou conjunto de ações capazes de impedir um cenário de prosseguir para sua consequência indesejada, independentemente da ação de qualquer outra camada de proteção implementada (BRIDGES; CLARK, 2010).

A eficiência do LOPA depende consideravelmente do detalhamento designado ao cenário, desse modo, é fundamental que os pares de evento iniciador e consequência estejam bem definidos. Neste contexto, a prática mais comum nas indústrias químicas é recorrer a análises de riscos qualitativas prévias, como por exemplo HAZOP, de modo a herdar tais informações para a análise LOPA. A partir disso, é possível utilizar as causas, consequências e salvaguardas levantadas previamente para a aplicação de estimativas propiciadas pelo LOPA (BAUM et al., 2009).

Portanto, ao organizar em uma cadeia de etapas subsequentes todo processo de desenvolvimento de um cenário, temos:

- a) Determinação do evento iniciador, obtido a partir da análise de riscos qualitativa, e de eventos permissores, em conjunto com a estimativa da frequência de ocorrência de ambos.
- b) Determinação da consequência obtida a partir da análise de riscos qualitativa e confirmação do alinhamento desta ao método adotado na etapa de definição da consequência;
- c) Identificação das salvaguardas implementadas no sistema e estimativa da frequência de falha das camadas de proteção independentes.

2.2.4.3 Determinando a frequência de eventos iniciadores

Eventos iniciadores são classificados como as causas que levam às consequências indesejadas e podem ser categorizados em três grupos: eventos externos, falhas em equipamentos e erros humanos (CCPS, 2001).

Os eventos externos contemplam fenômenos naturais tais como furacões, terremotos e até mesmo explosões ou incêndios em instalações fabris vizinhas. Falhas em equipamentos abrangem inúmeras possibilidades, destacando-se sumariamente corrosão em tubulações, rompimento de vasos de pressão e falha em componentes de sistemas básicos controladores de processo. Finalmente, erros humanos estão associados a omissões ou erros em procedimentos previamente estabelecidos (CCPS, 2001).

Portanto, baseado nas classificações apresentadas e tendo em vista a importância destes na mensuração do risco, é preciso atestar que todos os eventos iniciadores foram contemplados pela equipe. Vale frisar que os diferentes modos de operação da planta (normal, pré-partida ou parada) devem ser considerados durante a avaliação dos eventos iniciadores, dado aos impactos que estes podem exercer sobre as condições do processo (BRIDGES; CLARK, 2010).

Uma vez que eventos iniciadores de acidentes costumam ser comuns em diversas organizações, foi possível desenvolver, ao longo do tempo, estudos capazes de associar um evento iniciador à sua frequência de ocorrência. Além disso, fabricantes de materiais, peças e equipamentos industriais também disponibilizam, em seus manuais, as taxas de falha de cada um destes. Isto permite que empresas possam utilizar informações oficiais para a determinação de frequência de eventos iniciadores, garantindo uma maior confiabilidade à análise LOPA (CCPS, 2001). Neste cenário, os dados provenientes das fontes mencionadas, por sua vez, permitiram que o CCPS catalogasse faixas de valores de frequências para cada tipo de evento iniciador comum na indústria, conforme exemplificado na Tabela 10.

Tabela 10 - Frequência pré-estabelecida para alguns eventos iniciadores. Fonte: CCPS (2001)

Evento Iniciador	Estimativa de Frequência pela Literatura (por ano)
Falha de pressão residual no vaso	10^{-5} a 10^{-7}
Rompimento de tubulação (100 m)	10^{-5} a 10^{-6}
Vazamento de tubulação (100 m)	10^{-3} a 10^{-4}
Vazamento pela gaxeta	10^{-2} a 10^{-6}
Abertura da válvula de segurança *	10^{-2} a 10^{-4}
Falha no resfriamento de água	1 a 10^{-2}

*A abertura de uma válvula de segurança só pode ser considerada um evento iniciador caso não seja um requisito do projeto.

Conforme é possível observar na Tabela 10, ao verificar a frequência de eventos iniciadores, estabelece-se como referência uma avaliação de ocorrência destes eventos em um período de um ano. No entanto, existem eventos iniciadores cuja frequência é mensurada de acordo com o número de vezes que a atividade associada ao evento é realizada. Isto implica na correção matemática através da multiplicação da frequência disponível pelo número de vezes que se efetua tal tarefa no ano (BRIDGES; CLARK, 2010). Vale frisar que a mesma retificação deve ser aplicada para processos não contínuos cuja frequência esteja estabelecida em anos, corrigindo o valor baseado no tempo que o evento iniciador ocorra durante este período (JIN et al., 2016).

Essas correções são fundamentais para garantir que a mensuração da frequência dos eventos iniciadores esteja coerente com as devidas referências. Vale frisar que para eventos que envolvem probabilidades e considerações complexas para atingir-se um valor de frequência coerente, é necessário recorrer a outras técnicas mais rigorosas, como por exemplo, técnicas de análise de riscos quantitativas.

2.2.4.4 Identificando camadas de proteção independentes

Uma camada de proteção independente (IPL) é um dispositivo, sistema ou ação capaz de evitar que um cenário alcance a consequência indesejada independentemente do evento iniciador ou do funcionamento de quaisquer outras camadas de proteção (SUMMERS, 2003). De acordo com o CCPS (2001), uma IPL é uma categoria específica de salvaguarda, diferenciando-se das demais a partir de três características.

Inicialmente, para ser considerada uma IPL, a camada deve ser efetiva na prevenção da consequência indesejada. Para avaliar se a salvaguarda em questão cumpre esta necessidade, é preciso verificar se esta camada de proteção é capaz de detectar as condições do processo que direcionam à consequência indesejada e atuar a fim de impedir, em tempo hábil, sua conclusão (CCPS, 2001).

O segundo critério a qual uma IPL deve obedecer é ser independente do evento iniciador ou do evento permissor, configurando à salvaguarda a capacidade de atuar sem que seja comprometida por estes. Além disso, deve também ser independente de outras IPLs, de modo que a falha de uma camada não impacte no funcionamento da outra (CCPS, 2001).

Finalmente, uma IPL deve ser passível de ser auditada a fim de comprovar que sua eficiência é capaz de mitigar os riscos associados ao cenário avaliado. A capacidade de ser auditável é comprovada a partir de testes funcionais que são conduzidos a fim de verificar que os componentes da salvaguarda (sensores, sistemas lógicos, etc.) operam conforme o esperado e atendem aos requisitos pré-estabelecidos (CCPS, 2001).

Na análise LOPA, a eficiência da IPL é medida através de sua capacidade de redução da frequência da consequência indesejada, e pode ser quantificada através da Probabilidade de Falha sob Demanda (PFD) (BLANCO, 2014). A PFD avalia a probabilidade da IPL em questão falhar quando uma determinada condição demanda que esta opere conforme pretendido e, portanto, interrompa a cadeia de eventos que direciona à consequência indesejada. Como a análise LOPA consiste em uma avaliação semiquantitativa, a PFD de uma IPL é avaliada em termos de ordem de magnitude. Em suma, IPLs com menores PFDs apresentam as melhores eficiências quando comparados à IPLs de maiores PFDs.

A compreensão a respeito das diferenças de uma IPL de uma salvaguarda genérica (PL ou camada de proteção) é fundamental para entender as relações destas na mitigação de riscos de processo. No entanto, a categorização se ramifica dentro do próprio conceito de camada de proteção independente, sendo possível separar IPLs em duas classes: passiva e ativa (SUMMERS, 2003).

Camadas de proteção independentes passivas são aquelas que não demandam nenhuma ação, uma vez que sua utilização no processo é suficientemente capaz, considerando instalação, manutenção e calibração adequadas, de reduzir o risco associado ao cenário (CCPS, 2001). Na Tabela 11 encontram-se exemplos de IPLs passivas e suas PFD, de acordo com a literatura.

Tabela 11 - IPLs passivas e PFDs correspondentes. Fonte: CCPS (2001)

Camadas de Proteção Independentes Passivas	Probabilidade de Falha sob Demanda
Dique	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
Sistema de Dreno Subterrâneo	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
Instalações à Prova de Fogo	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
Parede contra Explosões	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
Vent Aberto (Sem válvula)	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$

IPLs ativas, por outro lado, respondem à variação de um parâmetro crítico do processo que possa estar relacionado à ocorrência de uma consequência indesejável (SUMMERS, 2003). Usualmente, uma IPL ativa abrange três fases: a detecção da condição, o processo de decisão a partir da interpretação dos parâmetros e a ação para atuar como resposta e impedir o encadeamento que possa resultar na consequência (CCPS, 2001). Na Tabela 12 encontram-se exemplos de IPLs ativas e suas PFDs, de acordo com a literatura.

Além da categorização apresentada, as IPLs também devem ser compreendidas pela equipe avaliadora sobre de que forma estas contribuem para a redução do risco associado ao cenário avaliado. As camadas de proteção independentes que agem de forma a evitar que o cenário ocorra, sem que o evento iniciador tenha sido ocasionado, são classificadas como IPLs preventivas. Já aquelas que atuam após a ocorrência do evento iniciador visando a redução da severidade de uma determinada consequência podem ser classificadas como IPLs mitigadoras (MARKOWSKI; MANNAN, 2010).

Tabela 12 - IPLs ativas e PFDs correspondentes. Fonte: CCPS (2001)

Camadas de Proteção Independentes Ativas	Probabilidade de Falha sob Demanda
Válvula de alívio	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$
Disco de ruptura	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$
Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS)	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$
Sistema Instrumentado de Segurança (SIS)	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-4}$
Sistemas de combate a incêndio	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-3}$
Ação humana *	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$

* A ação humana só é considerada IPL caso atenda aos seguintes requisitos (CCPS, 2001):

- a) O operador estiver treinado
- b) Um alarme indicar a necessidade da ação
- c) Procedimento bem documentado sobre a ação que deve ser tomada.
- d) O tempo disponível para que o operador efetue a ação deve ser suficiente.

Portanto, infere-se que entender a classificação de uma IPL e sua contribuição na mitigação de um risco torna-se um fator fundamental para aplicá-la em um processo. Desse modo, uma vez avaliadas as IPLs, e suas respectivas PFDs, é possível prosseguir para a etapa final da análise LOPA: a determinação da frequência do cenário.

2.2.4.5 Determinação da frequência do cenário

Esta etapa permite o cálculo da frequência de um determinado cenário a partir dos dados determinados nas etapas anteriores. O cálculo utilizado tradicionalmente, de acordo com CCPS (2001), para alcançar o valor da frequência do cenário combina a frequência de ocorrência do evento iniciador i com a probabilidade de falha sob demanda das j IPLs em vigor no processo avaliado. Assim, obtém-se a Equação 1:

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^I \text{PFD}_{ij} \quad \text{Equação 1}$$

Onde f_i^I é a frequência do evento iniciador i , f_i^C é a frequência da consequência gerada pelo evento iniciador i e PFD_{ij} é a probabilidade de falha sob demanda da j -ésima IPL empregada para impedir ou mitigar a consequência do evento iniciador i .

Alguns termos adicionais podem aprofundar a avaliação da equipe de modo a possibilitar a compreensão da influência de certos fatores na ocorrência de uma consequência. Caso a consequência estudada, por exemplo, seja um incêndio a partir de uma liberação não controlada de material inflamável, é válido considerar a probabilidade de ignição no ambiente onde o evento se desenrola, conforme demonstrado na Equação 2 (CCPS, 2001):

$$f_i^{\text{fire}} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^I \text{PFD}_{ij} \right) \times P^{\text{ignition}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde P^{ignition} representa a probabilidade de ignição. O mesmo se aplica caso a consequência seja avaliada a partir de uma abordagem de pessoas que sofreram lesões, conforme demonstrado na Equação 3 (CCPS, 2001).

$$f_i^{\text{fire injury}} = f_i^I \times \left(\prod_{j=1}^I \text{PFD}_{ij} \right) \times P^{\text{ignition}} \times P^{\text{person present}} \times P^{\text{injury}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde $P^{\text{person present}}$ e P^{injury} significam, respectivamente, a probabilidade de uma pessoa estar presente no local no momento do incêndio e a probabilidade desta sofrer algum dano.


A partir da Equação 3, é possível estabelecer uma abordagem a respeito do cálculo proporcionado pela análise LOPA. Considerando os seguintes fatores multiplicados, $f_i^I \times P^{\text{ignition}} \times P^{\text{person present}} \times P^{\text{injury}}$, isto é, a frequência do evento iniciador e as probabilidades de ocorrência das condições necessárias, temos que o resultado obtido a partir deste produto representa a frequência não mitigada da consequência. Este termo retrata a frequência da consequência caso nenhuma IPL esteja em vigor no processo para o cenário estudado. No entanto, ao considerar o produtório das PFDs das IPLs aplicáveis ao cenário e multiplicá-lo pela frequência da consequência não mitigada, as barreiras são contempladas nos cálculos, implicando na diminuição de f_i^C . Dessa forma, o resultado encontrado a partir da multiplicação de todos estes fatores representa a frequência da consequência mitigada e, portanto, o valor que buscamos ao analisar um cenário semiquantitativamente pelo LOPA.

É importante ressaltar que o cálculo da frequência da consequência pode demandar uma complexidade que ultrapassa a capacidade de análise proporcionada pelas estimativas da análise LOPA. Neste sentido, os eventos incapazes de serem avaliados satisfatoriamente pela análise de riscos LOPA devem ser avaliados por métodos que abordem tais complexidades, como por exemplo, análises de risco quantitativas (SUMMERS et al., 2011).

O cálculo da frequência do cenário através dos dados da frequência do evento iniciador e das PFDs dos IPLs fornece à equipe um resultado mais rigoroso quando comparado à avaliação de uma análise qualitativa de risco, usualmente conduzida antes do

LOPA. Isso permite que possamos reavaliar de forma mais precisa os resultados encontrados na etapa anterior, uma vez que o cálculo realizado no LOPA pode reclassificar, de acordo com o valor obtido, o evento em uma outra categoria de frequência. Dessa forma, a partir desta alteração, uma nova classificação é estabelecida para o evento estudado considerando a matriz de risco adotada na análise qualitativa.


Quando a reclassificação torna o evento menos frequente, significa que o cenário apresenta um risco menor que aquele definido inicialmente, e, portanto, caso tenha sido admitido em uma categoria aceitável, tem sua análise concluída. A Figura 3 representa o deslocamento na matriz de risco quando a frequência obtida no LOPA é menor que aquela obtida na análise qualitativa prévia.



		Matriz de Risco				
		Frequência				
		5 - Remota	4 - Improvável	3 - Ocasional	2 - Provável	1 - Frequente
Consequência	1- Catastrófica	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
	2 - Severa	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
	3 - Moderada	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
	4 - Desprezível	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
	5 - Negligenciável	Green	Green	Green	Green	Yellow

Figura 3 - Deslocamento na Matriz de Risco quando a frequência obtida no LOPA é menor

Para o caso onde a frequência do evento tenha sido superior ou igual ao que havia sido considerado na análise anterior, entende-se que o cenário apresenta risco maior que o havia sido definido inicialmente. A Figura 4 representa o deslocamento da matriz de risco quando a frequência obtida no LOPA é maior que aquela obtida na análise qualitativa prévia.



		Matriz de Risco				
		Frequência				
		5 - Remota	4 - Improvável	3 - Ocasional	2 - Provável	1 - Frequente
Consequência	1- Catastrófica	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
	2 - Severa	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
	3 - Moderada	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
	4 - Desprezível	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
	5 - Negligenciável	Green	Green	Green	Green	Yellow

Figura 4 - Deslocamento na Matriz de Risco quando a frequência obtida no LOPA é maior

Outra possibilidade de avaliar o risco a partir da frequência é multiplicá-la ao grau de severidade atribuído a consequência do evento no início da análise LOPA. A Equação 4 exemplifica o cálculo do risco de um cenário a partir da frequência e da severidade.

$$R_k^C = f_k^C \times C_k \quad \text{Equação 4}$$

O termo f_k^C é a frequência calculada da consequência. C_k corresponde a severidade da consequência, podendo ser avaliada em lesões, fatalidades, prejuízo financeiro ou outros parâmetros, conforme discutido primeira etapa da análise LOPA. E, finalmente, R_k^C é o risco associado a consequência K expresso na magnitude da consequência por unidade de tempo. O valor calculado do risco deve ser comparado ao critério de aceitação de risco definido internamente, ou até mesmo legalmente, para o processo estudado (CCPS, 2001).

Dessa forma, seja pelo método de matriz de risco ou pelo cálculo do risco a partir dos valores absolutos de frequência e severidade, é possível prosseguir das seguintes formas caso obtenha-se um risco superior ao critério de aceitação pela metodologia LOPA: Gerenciar o risco residual de modo a reduzir a severidade ou reduzir o risco a partir da implementação de IPLs capazes de reduzir a frequência da consequência. No entanto, também pode ser necessário conduzir uma análise quantitativa de risco a fim de verificar com maior rigor a severidade e frequência do evento. Muitas vezes observa-se a redução do risco quando aplicada à AQR. Isto ocorre pois as estimativas de severidade das metodologias qualitativas usualmente são superestimadas, o que possibilita a minimização da severidade quando o mesmo evento é avaliado por métodos mais rigorosos encontrados na AQR.

2.2.5 Vantagens

Quando comparado a demais métodos de análise de risco, o LOPA proporciona inúmeros benefícios que justificam o investimento da alta direção de uma empresa na sua implementação. Dentre estes, destaca-se o fato desta metodologia demandar um período de tempo menor quando comparado à uma análise quantitativa. Notoriamente, tal vantagem é evidenciada, sobretudo, em cenários que são complexos demais para análises qualitativas e por isso precisam ser avaliados por uma metodologia adicional (CCPS, 2001).

Vale frisar também que o LOPA desenvolve uma estrutura consistente e simplificada para estimar o risco de um cenário e fornece uma linguagem comum para discutir os riscos. Desse modo, o LOPA proporciona uma melhor base de decisão de risco quando comparado a avaliações sustentadas por argumentos subjetivos ou de caráter qualitativo. Esse efeito positivo é evidenciado em organizações que vem buscando aplicar cada vez mais análises semiquantitativas na avaliação de risco de seus processos (BAYBUTT, 2015).

Além disso, o LOPA também permite avaliar se as salvaguardas empregadas para um cenário são suficientes para atender ao critério de risco estabelecido. Este benefício possui uma grande relevância para cenários cujo resultado da análise prévia diverge do resultado do LOPA, pois permite que novas salvaguardas sejam implementadas a fim de que o risco do cenário atenda ao critério definido.

Dessa forma, ao fornecer agilidade, ser uma metodologia semiquantitativa e contribuir para a implementação de um número suficientes de salvaguardas, o LOPA vem ganhando notoriedade na indústria. Isto permitiu que esta análise se tornasse um dos principais métodos utilizados na verificação do atendimento do risco de um cenário a um critério de aceitação já definido (CCPS, 2001).

2.2.6 Limitações

Apesar da metodologia LOPA necessitar dos perigos envolvidos na operação para prosseguir com a avaliação dos riscos, esta ferramenta não é, e nem deve ser utilizada, para a determinação destes perigos. Assim, inevitavelmente, o método LOPA exige que uma análise prévia seja conduzida a fim de obter as informações necessárias (DOWELL; WILLIAMS, 2005).

Além disso, as considerações utilizadas e o modo que estas impactam a estimativa do risco envolvido variam de acordo com os padrões adotados pela equipe da análise de risco. Tal subjetividade resulta na discrepância de riscos de um determinado cenário entre duas possíveis organizações diferentes.

Estas limitações, embora inerentes a metodologia, não afetam a capacidade do método em avaliar cenários de processos químicos com o grau de sofisticação esperado para um método semiquantitativo (CCPS, 2001).

2.3 SISTEMAS GERADORES DE VAPOR

2.3.1 Definição e componentes

As primeiras máquinas empregadas para a geração vapor surgiram no início do século XVIII com o objetivo de solucionar os inconvenientes apresentados pela queima direta do carvão fóssil. A introdução desta tecnologia nos processos revolucionou a forma de se fabricar determinados materiais, dando origem à primeira Revolução Industrial. O conceito deste sistema baseava-se na geração de energia a partir da queima de um combustível, de modo a converter a energia térmica em energia mecânica por meio da vaporização de um determinado fluido, no caso, a água. Por sua vez, o vapor gerado era direcionado para diferentes sistemas acionados por pistões de modo a realizar trabalho, permitindo o funcionamento do processo (BAZZO, 1995).

O dinamismo da indústria e o surgimento de novas tecnologias permitiram que o processo de geração de vapor fosse difundido mundialmente e se tornasse amplamente empregado até os dias atuais para diversas funcionalidades. Vale frisar que, além da conversão em energia mecânica para a realização de trabalho, tais máquinas também podem ser empregadas para a geração de energia elétrica. O equipamento responsável pela geração de vapor tornou-se popularmente conhecido como caldeira, a qual encontra-se sobretudo instalada em indústrias com alta demanda de vapor, entre elas os segmentos de alimentos, bebidas e têxteis (BAZZO, 1995).

Independentemente do objetivo desejado ao produzir-se vapor, uma caldeira simples consiste de dois sistemas separados, conforme ilustrado na Figura 5. O primeiro é o sistema de vapor de água, também conhecido como o lado da água da caldeira. Neste sistema é introduzida a água que, ao receber o calor transferido através de uma barreira metálica sólida, é aquecida e convertida em vapor, deixando o sistema. O segundo sistema trata-se do sistema de combustível – ar – gás de combustão, também conhecido como lado de combustão da cal-

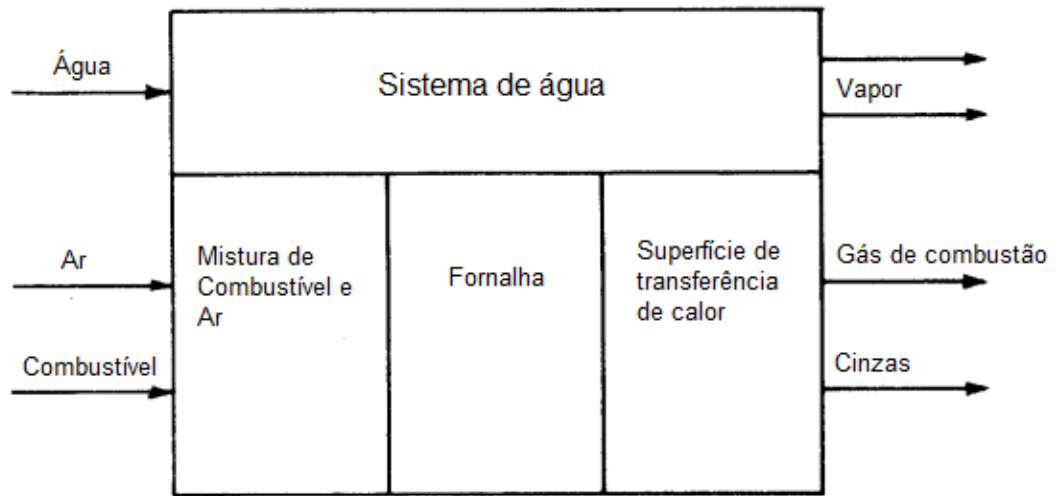


Figura 5 - Sistemas de uma caldeira simples. Fonte: adaptado de Dukelow (1991).

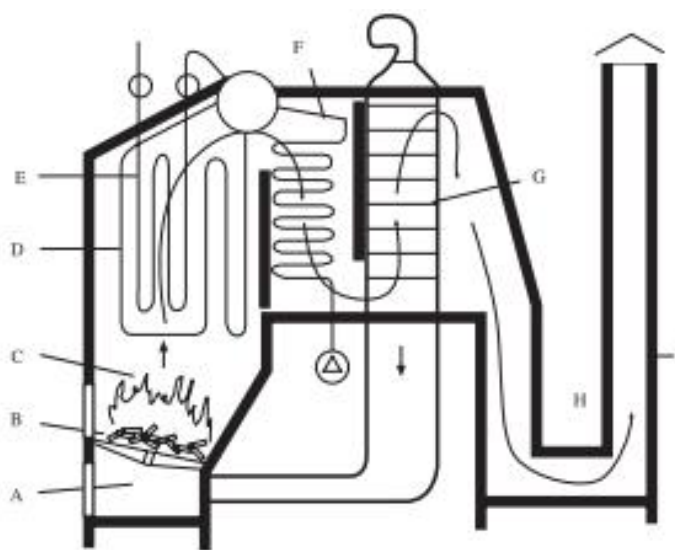
-deira. É neste sistema que ar e combustível são queimados em uma fornalha para produzir o calor que será transferido para a água, gerando vapor (DUKELOW, 1991). Embora as caldeiras apresentem estes dois sistemas, diferentes conformações podem ser adotadas por estas, sendo as mais empregadas na indústria as caldeiras flamotubulares e aquatubulares, conforme será explicado em maiores detalhes nos itens 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente.

As caldeiras de grande porte e de maior complexidade apresentam como componentes clássicos o cinzeiro, a fornalha, a câmara de combustão, os tubos evaporadores, o superaquecedor, o economizador, o pré-aquecedor de ar, os canais de gases e a chaminé (NOGUEIRA et al, 2005). Na Tabela 13, estão apresentadas as respectivas funções de cada um dos componentes no processo de geração de vapor em uma caldeira de alto grau de complexidade.

Na Figura 6, encontram-se indicadas em um exemplo ilustrativo de caldeira cada um dos componentes, de acordo com cada letra identificada, abordados na Tabela 13.

Tabela 13 - Componentes de uma caldeira de grande porte. Fonte: Nogueira, *et al.*, (2005).

Cinzeiro (A)	Lugar onde se depositam cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.
Fornalha (B)	Local onde se inicia o processo de queima de combustíveis.
Câmara de combustão (C)	Volume onde se deve consumir todo o combustível antes dos produtos de combustão atingirem e penetrarem no feixe de tubos. Por vezes, confunde-se com a própria fornalha, dela fazendo parte; outras vezes, separa-se completamente.
Tubos evaporadores (D)	Correspondem ao vaso fechado e pressurizado com tubos contendo água no seu interior, a qual, ao receber calor, transforma-se em vapor.
Superaquecedor (E)	Responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira.
Economizador (F)	Componente onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
Pré-aquecedor de ar (G)	Componente cuja função é aquecer o ar de combustão para introduzi-lo na fornalha, aproveitando o calor sensível dos gases da combustão.
Canais de Gases (H)	São trechos intermediários ou finais de circulação dos gases de combustão até a chaminé. Podem ser de alvenaria ou de chapas de aço, conforme a temperatura dos gases que neles circulam.
Chaminé (I)	É a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promove a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo chamado efeito de tiragem.

**Figura 6** - Componentes de uma caldeira de grande porte. Fonte: Pêra (1990).

2.3.2 Caldeiras Flamotubulares

As caldeiras flamotubulares estão presentes majoritariamente em plantas industriais de pequeno e médio porte, sendo caracterizada como uma ótima opção para processos que não demandam uma grande produção de vapor (VANDAGRIFF, 2001). O funcionamento de uma caldeira flamotubular consiste no fluxo dos gases de combustão por tubos longitudinais que passam pela parte da caldeira onde encontra-se a água a ser vaporizada. Desse modo, uma vez ocorrida a combustão na fornalha, o vapor é gerado através da transferência de calor entre os gases de combustão, as paredes dos tubos e a água ao redor. Naturalmente, os gases de combustão que fluem por estes tubos também são resfriados antes de serem liberados pela chaminé (DUKELOW, 1991).

A primeira caldeira flamotubular apresentava uma conformação horizontal, e consistia de apenas um cilindro externo cheio com água e um cilindro interno onde a queima do combustível ocorria, gerando calor para a formação de vapor. Apesar de ainda ser possível encontrar tal conformação, o desenvolvimento de estudos na otimização de transferência de calor visando aumentar a superfície de contato resultou na instalação de tubos longitudinais que passam pela água a ser vaporizada, aumentando a eficiência da geração de vapor nos novos projetos de caldeira (NOGUEIRA, 2005). Na Figura 7, demonstra-se uma caldeira flamotubular horizontal com uma fornalha interna e o gases da combustão originados nela fluindo pelos tubos longitudinais, causando a vaporização da água.

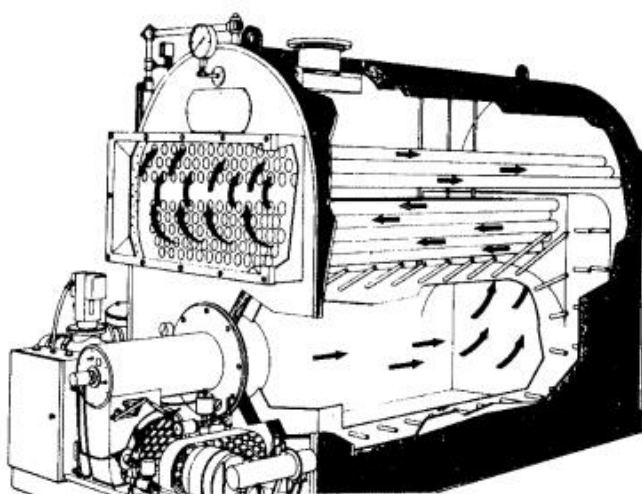


Figura 7 - Sistema de caldeira flamotubular horizontal. Fonte: Dukelow (1991)

Além de sistemas horizontais em caldeiras flamotubulares, também é possível projetá-la no sentido vertical, quando a necessidade de vapor é ainda menor e o espaço disponível é reduzido. Nesta conformação, a fornalha interna encontra-se na parte mais baixa da caldeira, enquanto os tubos longitudinais percorrem verticalmente o vaso de pressão onde encontra-se a água que será vaporizada (BAZZO, 1995). Na Figura 8, encontra-se um exemplo que ilustra uma caldeira flamotubular vertical com fornalha interna.

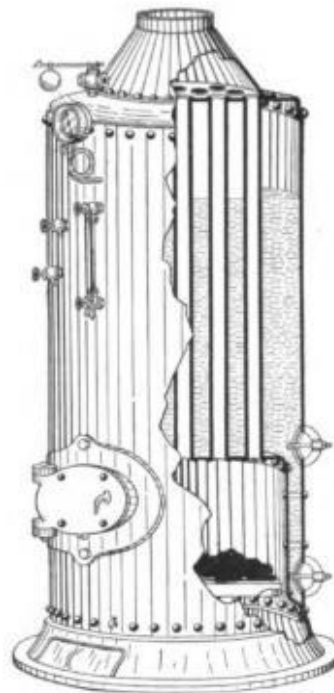


Figura 8- Caldeira flamotubular vertical. Fonte: Gilman (2005).

Os exemplos de caldeiras flamotubulares abordados até o presente momento apresentaram fornalhas internas, no entanto, determinados sistemas apresentam uma configuração cuja fornalha localiza-se do lado de fora da caldeira. Apesar de sistemas com fornalha interna garantirem uma maior produção de vapor por unidade de superfície de aquecimento, somente fornalhas externas permitem o uso de combustíveis sólidos para a geração de vapor, configurando um grande diferencial para determinados processos (BAZZO, 1995).

2.3.3 Caldeiras Aquatubulares

As caldeiras aquatubulares são caldeiras cuja produção do vapor ocorre no interior dos tubos e os gases da combustão fluem por fora destes, possuindo normalmente dois tubulões cilíndricos, conhecidos como tubulão inferior e tubulão superior (BAZZO, 1995).

O tubulão inferior localiza-se no ponto baixo da caldeira e é responsável pela circulação de água no equipamento e pela sedimentação da lama formada, a qual acumula-se no fundo deste para sua posterior remoção. Por outro lado, o tubulão superior é o local onde o vapor saturado ou superaquecido, resultado do aquecimento da água circulante, abandona o sistema. As tubulações que unem estes sistemas podem apresentar conformação reta ou curva, onde sistemas retos facilitam a limpeza enquanto tubos curvados otimizam a superfície de contato com os gases quentes da combustão (LEITE; MILITÃO, 2008). Na Figura 9, encontra-se a demonstração do sistema de tubulação que interliga o tubulão superior com o tubulão inferior.

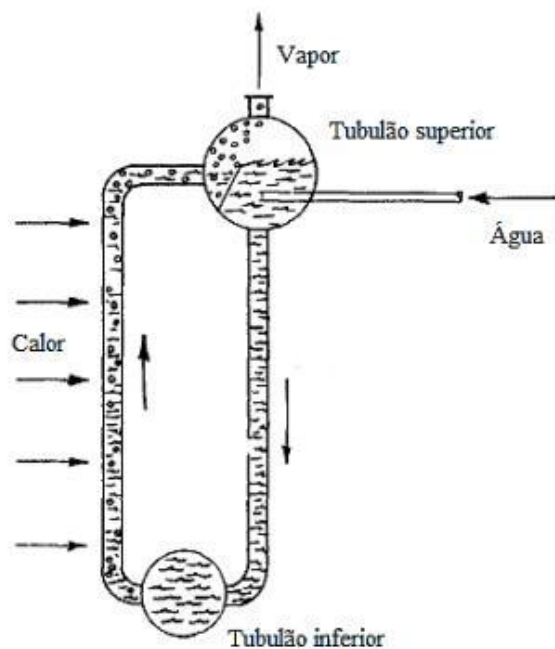


Figura 9 - Sistema de tubulão inferior e tubulão superior em uma caldeira aquatubular. Fonte: adaptado de Dukelow (1991)

Comparadas às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares tem um rendimento maior, com maior quantidade de vapor produzida, sendo comumente utilizadas em indústrias de grande porte que possuem processos que exigem alta demanda de vapor e atuam sob pressões elevadas. Tal fato é justificado pelo aumento substancial da superfície de aquecimento, devido ao uso de tubos que transportam a água pela caldeira, possibilitando uma maior produção de vapor (VANDAGRIFF, 2001). Além disso, as caldeiras aquatubulares podem ser utilizadas com os mais diversos tipos de combustível, incluindo aqueles que queimam com dificuldade, como por exemplo biomassas de baixo poder calorífico, permitindo o reaproveitamento de subprodutos para a geração de energia em determinados processos (DUKELOW, 1991). Esta característica permite que caldeiras aquatubulares sejam projetadas utilizando combustíveis que impossibilitariam a viabilidade do processo caso se tratasse de uma caldeira flamotubular, tornando-a um diferencial para o emprego de sub-produtos como combustíveis.

Na Figura 10, encontra-se uma representação ilustrativa do processo de geração de vapor, juntamente com a identificação dos principais componentes, de uma caldeira aquatubular.

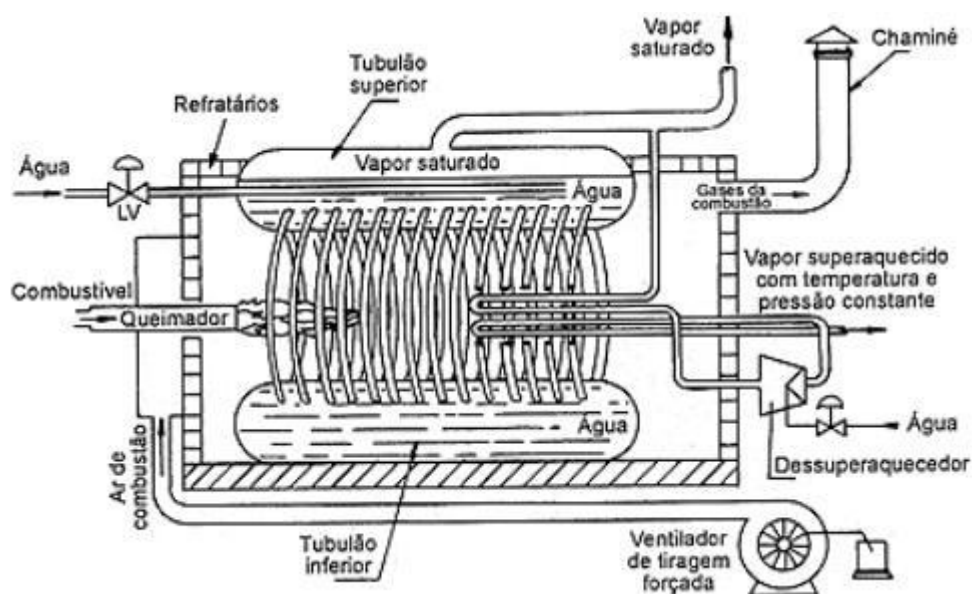


Figura 10 - Sistema tradicional de uma caldeira aquatubular. Fonte: Bega (2003)

2.3.4 Segurança e acidentes com caldeiras

Anualmente, o número de fatalidades, acidentes incapacitantes e lesões relacionado a acidentes no ambiente de trabalho é expressivo e representa uma grande questão a ser solucionada na indústria química. Historicamente, registros de fatalidades envolvendo geradores de vapor são consideravelmente elevados quando comparados aos demais equipamentos, demonstrando a relevância de operação de caldeiras nas estatísticas de acidentes de trabalho. Tal fato é atribuído aos riscos que a operação deste equipamento oferece aos trabalhadores, pois quaisquer não conformidades podem resultar em eventos com potencial de fatalidade (ICHEME, 2005).

Frente a ocorrência de inúmeros acidentes no início do século XX, em 1915 foi publicada a primeira edição do Boiler & Pressure Vessel Code (Código de Caldeiras ASME - Regras para a Construção de Caldeiras Estacionárias e para Pressões de Trabalho Admissíveis) desenvolvida pela American Society of Mechanical Engineers (ASME). O desenvolvimento deste Código foi impulsionado, sobretudo, pelas manifestações públicas realizadas após explosões de caldeiras que ocorreram no Estado de Michigan, nos Estados Unidos, deixando dezenas de mortos (LING, 2000). À medida que inovações eram aplicadas na indústria, adequações nos requisitos definidos no Código foram realizadas, possibilitando uma melhoria contínua e, conseqüentemente, transformando-o numa referência mundial para o projeto de caldeiras seguras.

No Brasil, a preocupação envolvendo acidentes de trabalho com caldeiras também demandou esforços para sua minimização. Em 1978, o Ministério do Trabalho instituiu a norma regulamentadora sobre Caldeiras e Vasos de Pressão, a NR-13, que definiu medidas de segurança e orientações mínimas para a operação de caldeiras, passando por algumas revisões desde sua publicação. Com o objetivo de ampliar o escopo e contemplar tecnologias emergentes a nível nacional em sistemas de geradores de vapor, em maio de 2014 a NR-13 sofreu sua revisão mais recente e foi renomeada para “Norma Regulamentadora N° 13 - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações” (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2014). Além disso, o engajamento de outras entidades, como INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e ABIQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química), na redução de eventos com caldeiras foi visível através de estudos, cursos, pesquisas e debates

sobre os aspectos de segurança em caldeiras oferecidos por estas instituições (ALTAFINI, 2002). Abaixo, encontram-se alguns dos dispositivos de segurança obrigatórios que uma caldeira deve apresentar segundo a última revisão da NR-13.

- a) válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a pressão máxima de trabalho (PMTA), considerados os requisitos do código de projeto relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de calibração;
- b) instrumento que indique a pressão do vapor acumulado;
- c) injetor ou sistema de alimentação de água independente do principal que evite o superaquecimento por alimentação deficiente, acima das temperaturas de projeto, de caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão;
- d) sistema dedicado de drenagem rápida de água em caldeiras de recuperação de álcalis, com ações automáticas após acionamento pelo operador;
- e) sistema automático de controle do nível de água com intertravamento que evite o superaquecimento por alimentação deficiente

O envolvimento ativo de organizações e os esforços direcionados para a elaboração de normas e manuais oficiais sobre segurança em caldeiras demonstram a preocupação constante a respeito dos riscos envolvidos no processo. Para Bazzo (1995), os maiores riscos durante a operação de uma caldeira são: a elevação da pressão de trabalho acima da pressão máxima de trabalho permitida, o superaquecimento excessivo e/ou modificação da estrutura do material, corrosão do material e a ignição espontânea, a partir de névoas ou gases inflamáveis remanescentes no interior da câmara de combustão.

Apesar dos esforços direcionados para a prevenção de acidentes com caldeiras, ainda hoje ocorrem eventos que deixam vítimas fatais por todo o mundo. Um dos casos mais conhecidos trata-se da explosão de uma caldeira da Exxon Mobil em Singapura, em 2000, ocasionado pela mudança de combustível utilizado, GLP, para o diesel (MEIRA, 2013). O evento ocorreu devido a tentativa de inicialmente acender o queimador com o diesel. Ao não se obter sucesso para acender a chama, os operadores realizaram uma nova tentativa,

utilizando GLP. Neste momento, houve uma forte explosão no interior da caldeira, destruindo-a por completo e ocasionando a morte de dois funcionários, além dos demais feridos (MEIRA, 2013).

No Brasil, uma caldeira localizada em uma cervejaria de Jacareí, SP também explodiu enquanto uma manutenção estava sendo conduzida na mesma, resultando na morte de quatro funcionários e deixando um ferido (G1, 2016). Após oito meses da explosão, as causas do acidente foram apresentadas pela Comissão de Investigação Interna da companhia. De acordo com a empresa, a Comissão identificou que a caldeira operava com um nível de água abaixo do mínimo permitido, o que causou o sobreaquecimento do aquecimento e posteriormente a explosão do equipamento. Outros fatores também foram identificados como causas prováveis, como a falha da malha de controle de segurança da caldeira, a qual inclui os sensores de nível d'água responsáveis pelo acionamento das bombas de alimentação de água e pelo desarme da caldeira em caso de nível extra baixo de água; e a operação da caldeira em regime de teste com a válvula da linha de alimentação de água fechada (G1, 2016).

Tais acidentes demonstram os danos potenciais de um acidente envolvendo uma caldeira e evidencia que até mesmo indústrias de referência em programas de segurança estão sujeitas a eventos como estes. Este cenário reforça o compromisso que as organizações devem assumir para que suas operações sejam conduzidas de forma segura para seus funcionários, contratados e de terceiros.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Caldeira

O processo que foi submetido a análise de risco baseia-se nos dados de uma caldeira flamotubular vertical de pequeno porte. As especificações técnicas da caldeira foram herdadas da dissertação de mestrado “Sistema de automação para monitoramento online de gases residuais e diagnóstico de uma caldeira operada com misturas diesel/biodiesel”, elaborada pela Professora Andrea Valdman do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química em 2010. A Tabela 14 apresenta as especificações da caldeira, conforme determinado por Valdman (2010).

Tabela 14- Especificações da caldeira flamotubular. Fonte: Valdman (2010)

Variável	Valor
Capacidade de Produção de Vapor, com água a 20°C	500 kg/h
Potência térmica nominal	0,3 MW
Característica do Vapor	Saturado
Pressão máxima de trabalho	8,00 kgf/cm ²
Categoria segundo NR-13	B
Combustível principal	Óleo diesel
Combustível auxiliar	Não possui
Tiragem	Forçada por insuflação
Superfície de aquecimento	22,80 m ²
Número de passes	01 (um)
Câmara de combustão	01 (uma)
Tubos de 1 ½’’ de diâmetro com 1,938 m	94 (noventa e quatro)
Volume médio de água durante o uso normal	0,6 m ³
Vaporização específica por m ³ de superfície de aquecimento	25 kg/h
Dimensão	300mm de diâmetro
Área média	900cm ²

O processo de geração de vapor através da caldeira flamotubular conta com um tanque de armazenamento de óleo diesel que alimenta a fornalha, um tanque de armazenamento de água que alimenta a caldeira e uma linha de vapor saturado. Além da linha de vapor saturado, há uma linha adicional que, através de uma válvula manual, permite que a demanda seja mantida constante através da liberação do excedente de vapor para a atmosfera. As vazões definidas para cada uma das correntes encontram-se estabelecidas na Tabela 15.

Tabela 15 - Vazões esperadas na geração de vapor. Fonte: Valdman (2010)

Variável	Valor
Vazão de combustível	26 kg/h
Vazão de oxigênio	~30% excesso de ar
Vazão de vapor saturado	~500 kg/h

Para o sistema avaliado, foi considerado que a caldeira flamotubular opera em regime contínuo para o abastecimento de uma outra unidade cujo principal insumo é o vapor. A partida do processo ocorre quando o queimador da caldeira recebe o combustível, bombeado do tanque de alimentação, e o ar, bombeado através de um soprador, em uma proporção ótima para queima. Os gases resultantes da combustão são direcionados a um analisador equipado com três medidores de temperatura e seis células de medição, capazes de avaliar a concentração de oxigênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, monóxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre (VALDMAN, 2010).

As vazões de entrada de ambos na fornalha são controladas manualmente pelo operador pela válvula reguladora de vazão presente em ambas linhas. O ignitor é responsável por dar a partida na queima e a água, retida dentro da caldeira, é aquecida até a produção de vapor saturado. A água da caldeira é controlada por um sistema liga-desliga automático em função do seu nível, ativando ou desativando a bomba de alimentação ao atingir-se o nível baixo ou nível alto de água, respectivamente. Além disso, o sistema conta com uma malha de controle acoplada à caldeira, responsável pela lógica de intertravamento de segurança que interrompe a alimentação de combustível a partir do controle de parâmetros críticos operacionais do processo. Esse intertravamento é disparado em função das variáveis discretas disponíveis na instrumentação da caldeira que indicam quando a pressão excedeu o limite de

segurança; quando ocorre o apagamento da chama durante o período de queima; ou quando o nível de água da caldeira é mínimo. Sempre que o a alimentação de combustível é interrompida, os gases residuais presentes na fornalha são eliminados pela purga automática associada ao controle de intertravamento.

Vale frisar que outros indicadores, transmissores e alarmes estão instalados de modo a prover um acompanhamento contínuo de demais parâmetros operacionais durante a geração de vapor. Além disso, de acordo com Valdman (2010), a caldeira em questão possui os dispositivos de segurança exigidos pela NR-13, com exceção do injetor de água independente para combustíveis sólidos e sistema de drenagem, por não serem aplicáveis ao sistema. Os equipamentos, indicadores, transmissores, alarmes e demais dispositivos estão evidenciados na Figura 11, a qual representa o diagrama de instrumentação do processo de geração de vapor estudado.

3.2 Análises de Risco

A metodologia foi baseada na integração das análises de risco qualitativa (HAZOP) e semiquantitativa (LOPA) a fim de possibilitar um gerenciamento de riscos eficiente ao reunir os diferenciais de cada método. Assim, foi estabelecida uma estratégia de modo que as vantagens oferecidas por cada uma das metodologias sejam fortalecidas e suas limitações suprimidas. Portanto, os conceitos apresentados pelo HAZOP e LOPA foram unidos e relacionados a fim de possibilitar uma gestão de riscos integrada, conforme demonstra a Figura 12.

A primeira etapa da integração consistiu na aplicação do método HAZOP. Sua aplicação teve como principal objetivo avaliar qualitativamente os cenários obtidos a partir dos nós, os quais estão explicitados na Tabela 16 e demonstrados na Figura 13 através das seções delimitadas pelas seções em vermelho. Posteriormente, definiu-se os desvios com a finalidade de que estes proporcionassem um entendimento satisfatório sobre os cenários acidentais. Dessa forma, a partir de CCPS (2008) e das particularidades da caldeira, foi selecionado um conjunto de desvios para serem aplicados no HAZOP, conforme estabelecido na Tabela 17, a qual define os desvios para cada nó escolhido.

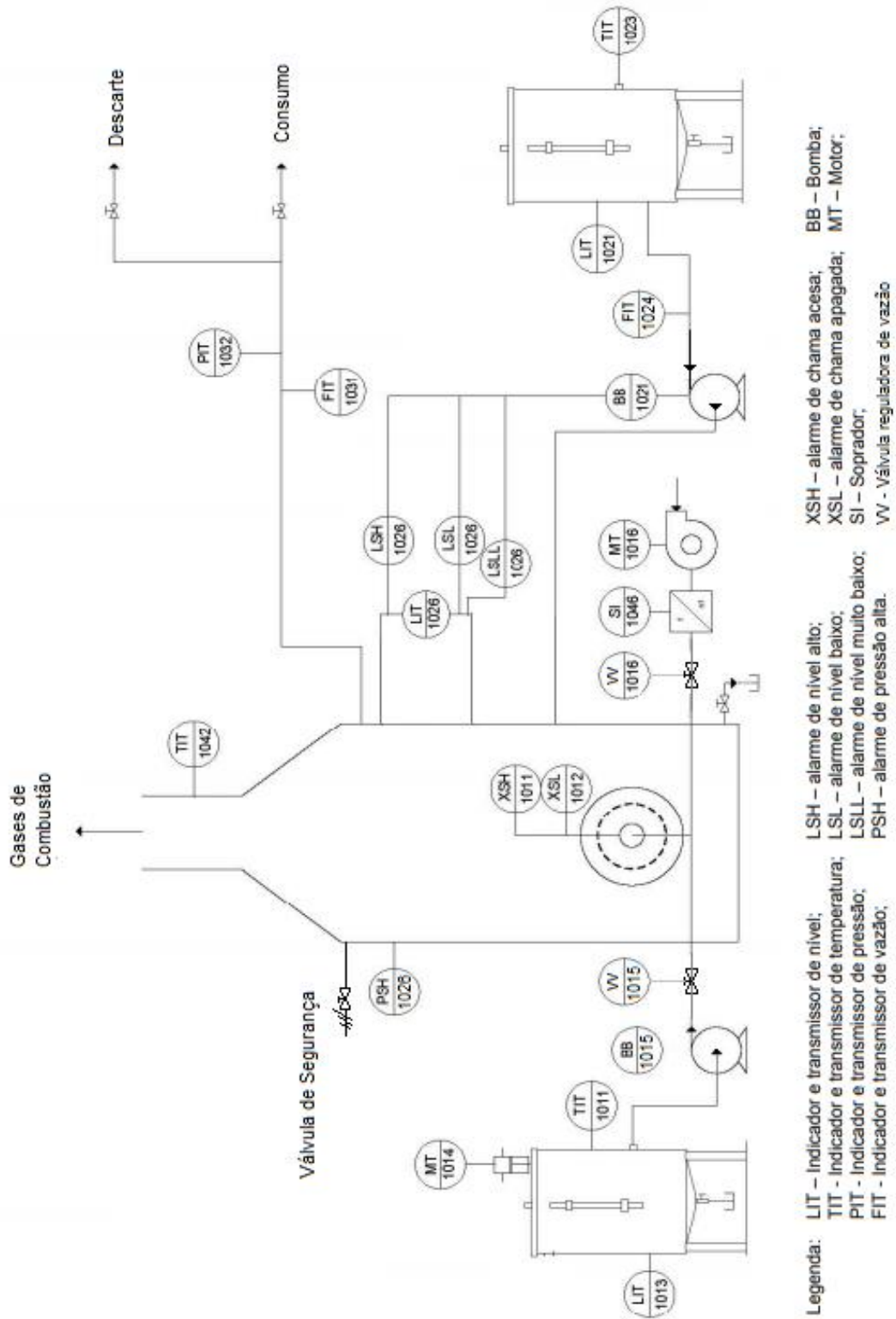


Figura 11 - Diagrama P&ID da caldeira. Fonte: Adaptado de Valdman (2010)

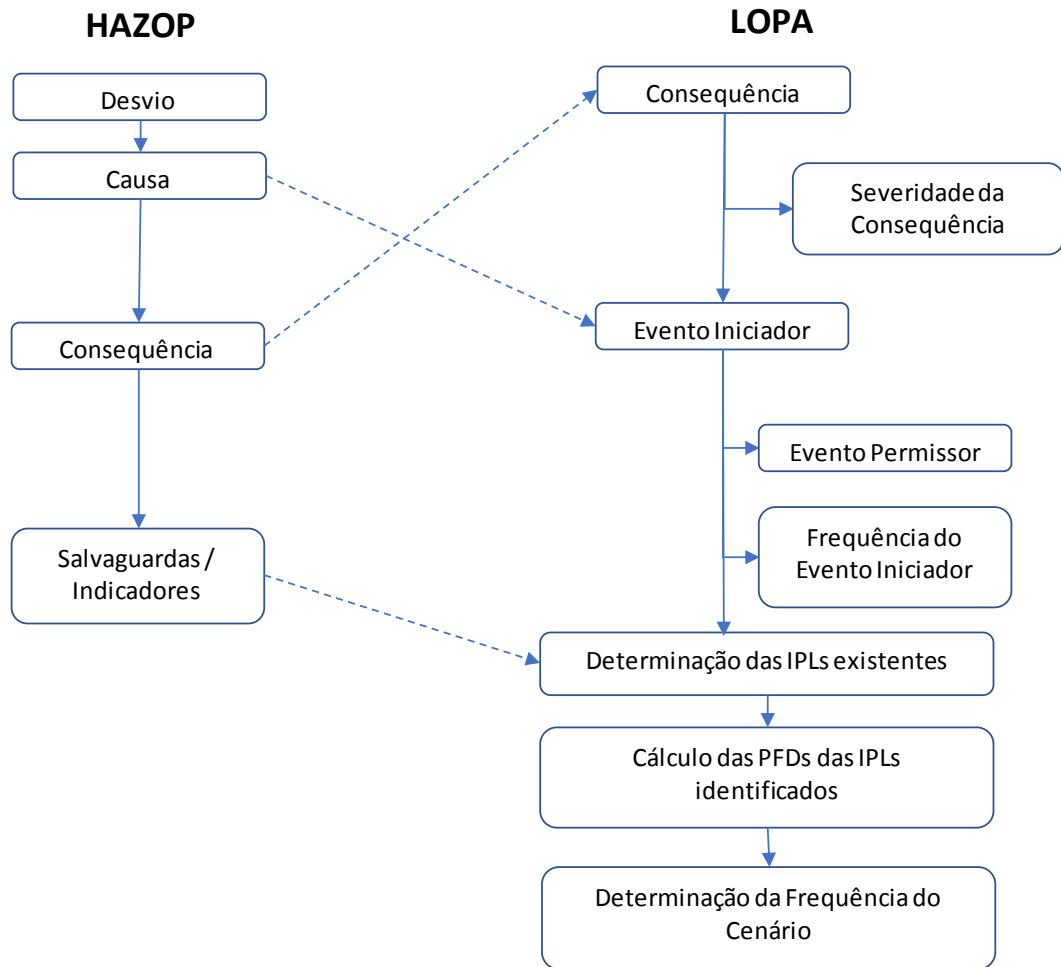


Figura 12 - Integração das metodologias HAZOP e LOPA

Tabela 16 - Nós de estudo no HAZOP

Nó	Descrição
Nó 1	Alimentação de combustível na fornalha
Nó 2	Alimentação de água na caldeira
Nó 3	Alimentação de ar na fornalha
Nó 4	Geração de vapor na caldeira
Nó 5	Saída de vapor da caldeira

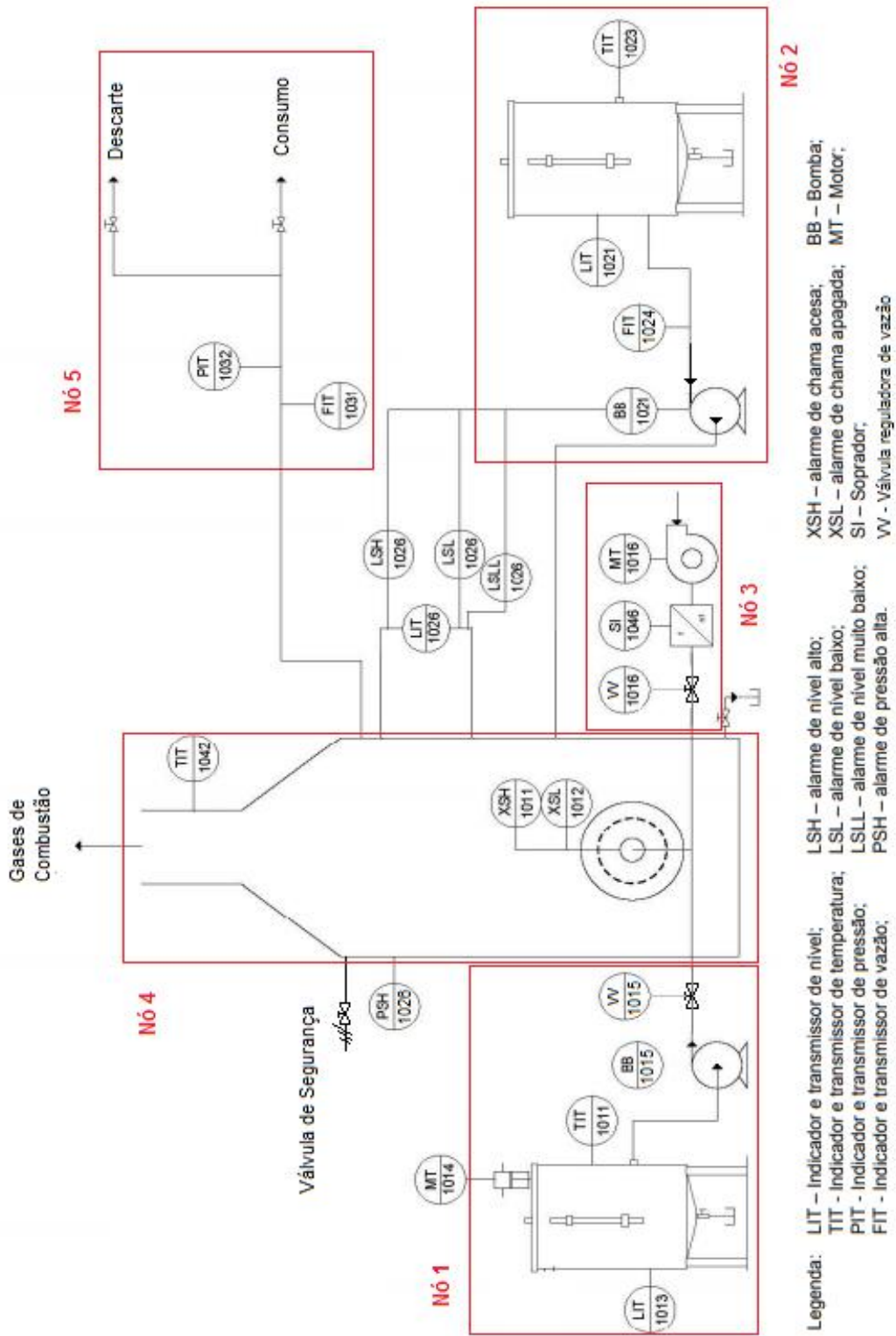


Figura 13 - Nós definidos para a análise HAZOP. Fonte: Adaptado de Valdman (2010)

Tabela 17 - Relação de desvios para cada nó definido. Fonte: Adaptado de CCPS (2008)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5
Desvios	Vazão Nula	Vazão Nula	Vazão Nula	Pressão Baixa	Pressão Alta
	Vazão Baixa	Vazão Baixa	Vazão Baixa	Pressão Alta	Pressão Baixa
	Vazão Alta	Vazão Alta	Vazão Alta	Nível Baixo	Vazão Alta
	Composição Diferente	Dureza Alta	-	Nível Alto	Vazão Baixa
	-	Dureza Baixa	-	Temperatura Alta	Vazão Nula
	-	-	-	Temperatura Baixa	-

Após esta etapa, com base nos pares de causa e consequência levantados a partir dos desvios, os cenários foram caracterizados. Em seguida, identificou-se, para cada um dos cenários, as salvaguardas empregadas no processo que prevenissem ou mitigassem o risco associado a estes. É válido ressaltar que embora indicadores de parâmetros químicos e físicos não sejam considerados salvaguardas, estes foram organizados junto a estes elementos devido às suas capacidades de permitir o monitoramento seguro dos parâmetros críticos do processo. Além disso, apesar de haver um entendimento que treinamentos e manutenções devem ser algo inerente ao processo, tais elementos também foram explicitados durante a análise como salvaguardas. Tais considerações foram realizadas com o objetivo de reforçar todos os fatores presentes no processo que contribuem na minimização do risco do cenário, sejam eles de caráter preventivo ou mitigador.

A especificação das causas, consequências, indicadores e salvaguardas possibilitou dar início à classificação da frequência, de maneira estimada, de cada cenário definido no HAZOP. Para isso, foi utilizada como referência a Tabela 18, a qual associa o número de vezes que tal evento pode ocorrer em um determinado período de tempo à uma categoria de frequência.

Além da avaliação da frequência do cenário, também foi adotado um critério de classificação a fim de avaliar qualitativamente a severidade oferecida por este ao processo. As categorias de

severidade foram descritas com base nos danos às pessoas caso a consequência do cenário se concretizasse e estão especificadas na Tabela 19.

Tabela 18 - Categorias de frequência adotadas na avaliação de cenários do HAZOP. Fonte: CCPS (2008)

Categorias de Frequência	
Categoria	Frequência de Ocorrência do Evento
1 - Frequente	1 vez em 1 ano (possível de ocorrer frequentemente)
2 - Provável	1 vez em 5 anos (possível de ocorrer sob circunstâncias normais)
3 - Ocasional	1 vez em 15 anos (possível de ocorrer sob circunstâncias não usuais)
4 - Improvável	1 vez em 30 anos (possível de ocorrer durante vida útil do equipamento)
5 - Remota	1 vez em 100 anos (improvável de ocorrer durante a vida útil da planta)

Tabela 19 - Categorias de severidade adotadas na avaliação de cenários do HAZOP. Fonte: CCPS (2008)

Categorias de Severidade	
Categoria	População Interna
1- Catastrófica	Uma ou mais fatalidades
2 - Severa	Lesão com afastamento
3 - Moderada	Pequenos ferimentos
4- Desprezível	Sem ferimentos, pequenos danos a propriedade/equipamentos
5 - Negligenciável	Problema operacional recuperável

Após a atribuição de uma categoria de frequência e severidade para cada cenário, determinou-se, em função destas, o risco associado. Para isso, utilizou-se uma matriz de risco que relaciona os valores das categorias de frequência e severidade a um grau de risco. O grau de risco é representado pelas cores vermelho, amarelo e verde para riscos altos, médios e baixos, respectivamente. A matriz de risco empregada para a avaliação qualitativa está definida na Tabela 20.

Tabela 20 - Matriz de risco para a avaliação de risco dos cenários do HAZOP Fonte:

Adaptado de CCPS (2008)

Matriz de Risco						
		Frequência				
		5 - Remota	4 - Improvável	3 - Ocasional	2 - Provável	1 - Frequente
Consequência	1- Catastrófica	Intermediário	Intermediário	Alto	Alto	Alto
	2 - Severa	Intermediário	Intermediário	Intermediário	Alto	Alto
	3 - Moderada	Baixo	Baixo	Intermediário	Intermediário	Alto
	4- Desprezível	Baixo	Baixo	Baixo	Intermediário	Intermediário
	5 - Negligenciável	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Intermediário

O formulário utilizado como padrão para conduzir o HAZOP de acordo com as etapas descritas anteriormente e com a finalidade de reunir as informações necessárias para análise do risco de cada um dos cenários identificados encontra-se na Figura 14.

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso								
Processo:							Risco	
Seção:							Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas	Frequência	

Figura 14- Formulário utilizado para a análise HAZOP. Fonte: Adaptado de CCPS (2008)

O uso deste sistema de classificação permitiu selecionar os eventos de acordo com o risco oferecido por cada um destes. Eventos que apresentaram coloração verde possuem nível de risco aceitável, e, portanto, não exigiram análises posteriores. Eventos com risco intermediário, isto é, amarelo, necessitaram satisfazer determinadas condições a fim de

comprovar que tais riscos poderiam ser assumidos dado às salvaguardas em vigor. Tais condições dependem das salvaguardas empregadas no cenário e encontram-se estabelecidas na discussão dos resultados. Já eventos de alto risco foram encaminhados para a segunda etapa da análise de riscos, onde aplicou-se a metodologia LOPA. Nesta etapa, uma avaliação mais rigorosa da frequência do cenário foi conduzida de modo a verificar se tal evento se enquadraria de fato na classificação de risco obtida no HAZOP.

A fim de garantir uma análise semiquantitativa eficiente proporcionada pelo LOPA, foram avaliadas a frequência do evento iniciador e as probabilidades de ocorrência do evento permissor e dos fatores condicionantes que resultam na consequência do evento estudado. Tais informações permitem, através da multiplicação destes valores, avaliar quantitativamente a frequência da consequência não mitigada. Os valores numéricos adotados na frequência do evento iniciador foram obtidos a partir do livro CCPS - Layer of Protection Analysis (2001) e estão apresentadas na Tabela 21, enquanto a determinação das probabilidades dos demais elementos foram justificadas na análise individual de cada cenário.

Tabela 21 - Frequências de eventos iniciadores. Fonte: CCPS (2001)

Evento Iniciador	Frequência (por ano)
Rompimento do vaso de pressão	1×10^{-6}
Rompimento de tubulação por pressão residual (100 metros)	1×10^{-5}
Vazamento na tubulação (100 metros)	1×10^{-3}
Ruptura na conexão/junta	1×10^{-2}
Impacto externo (acidente com veículo, etc)	1×10^{-2}
Queda de carga do guindaste	1×10^{-4}
Descarga atmosférica	1×10^{-3}
Abertura da válvula de segurança	1×10^{-2}
Falha no resfriamento de água	1×10^{-2}
Falha na conexão da bomba	1×10^{-2}
Falha na mangueira de carregamento	1×10^{-2}
Falha no procedimento de bloqueio eletromecânico	1×10^{-3}
Falha do operador na execução de uma tarefa	1×10^{-1}

Uma vez determinada a frequência da consequência não mitigada, iniciou-se a análise das camadas de proteção independentes (IPL) em vigor e suas respectivas probabilidades de falha de modo a compreender os impactos destas na mitigação da frequência do cenário. Demais salvaguardas que não são classificadas como IPLs também foram indicadas durante a análise do cenário, no entanto, por não serem IPLs, suas contribuições na redução do risco não foram consideradas durante o cálculo. Deste modo, as PFDs das IPLs evidenciadas foram multiplicadas a fim de determinar a probabilidade de falha sob demanda total. Este resultado, ao ser multiplicado pela frequência da consequência não mitigada, dá origem a frequência da consequência mitigada. Os valores utilizados como as probabilidades de falha das camadas dispostas para os cenários estudados foram obtidos do livro CCPS - Layer of Protection Analysis (2001) e estão explicitados na Tabela 22.

Tabela 22 - IPLs e suas respectivas PFDs. Fonte: Adaptado de CCPS (2001)

IPL	Comentários	PFD
Sistema de Drenagem Subterrâneo	Reduz a frequência de transbordamento/ruptura de tanque	1×10^{-2}
Vent aberto	Previne sobrepressão	1×10^{-2}
Material a prova de fogo	Reduz a taxa de transferência de calor e fornece tempo para combate a extinção do fogo	1×10^{-2}
Parede à prova de explosão	Reduz a frequência de danos pelo confinamento da energia da explosão	1×10^{-3}
Válvula de alívio	Previne o sistema de ultrapassar a pressão especificada	1×10^{-2}
Disco de ruptura	Previne o sistema de ultrapassar a pressão especificada	1×10^{-2}
Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS)	Pode ser considerada um IPL somente se não estiver associada a falha do evento iniciador.	1×10^{-2}
Ação humana	Pode ser considerada um IPL se: <ul style="list-style-type: none"> a) O operador estiver treinado b) Um alarme indicar a necessidade da ação c) Procedimento bem documentado sobre a ação que deve ser tomada. d) O tempo disponível para a tomada de ação deve ser adequado. 	1×10^{-1}

Após o cálculo da frequência, o evento foi reclassificado considerando a Tabela 16, assumindo a nova categoria de frequência indicada pela análise LOPA. Para os cenários onde houve diferença quanto à classificação de risco entre os métodos, houve uma análise a fim de compreender os principais elementos e considerações que resultaram nesta reclassificação. Eventos que permaneceram classificados na faixa de risco alto foram separados e devem ser avaliados com maior rigor por uma análise quantitativa de riscos, o que ultrapassa o escopo deste trabalho. Por fim, para os eventos avaliados pelo LOPA nos quais não foram identificadas IPLs em vigor, foram recomendadas possíveis IPLs que poderiam contribuir para a minimização da frequência do cenário e conseqüentemente na mitigação do risco. O formulário utilizado como padrão para a análise dos cenários direcionados para a avaliação LOPA foi desenvolvido de modo a contemplar os principais elementos discutidos nos parágrafos anteriores, bem como os fatores determinantes para o cálculo da frequência. Este modelo encontra-se demonstrado na Figura 15.

	Identificação do Cenário:		Nó do Cenário:	
	Descrição	Probabilidade	Frequência	
Descrição da conseqüência/ Categoria				
Evento Iniciador				
Evento Permissor				
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição			
	Probabilidade de pessoa na área			
	Probabilidade de lesão fatal			
	Outros (especificar)			
Frequência da Conseqüência não mitigada				
Camadas de Proteção Independentes				
Salvaguardas que não são IPLs				
PFD Total para todos IPLs				
Frequência da Conseqüência Mitigada				
Comentários:				

Figura 15 - Modelo utilizado para avaliação dos cenários pela metodologia LOPA. Adaptado de CCPS (2001)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados HAZOP

Os resultados completos da análise HAZOP que contemplam a avaliação das causas, consequências, salvaguardas, classificações de risco e frequência, para cada um dos nós definidos, encontram-se no Anexo 1 deste trabalho. A partir destes elementos, a condução da análise HAZOP permitiu a categorização de cada um dos eventos quanto à classificação de risco estabelecida na Tabela 20. Diante disso, foi possível determinar a quantidade de cenários de cada nó referente a cada uma das três classes de risco definidas, possibilitando a compreensão dos nós mais críticos do processo. Na Tabela 23, encontra-se disposta a quantidade de cenários encontrados para cada nó e suas respectivas categorias de risco.

Tabela 23 - Quantidade de cenários de cada nó e suas respectivas categorias de risco

		Classificação de Risco – Quantidade		
		Risco Baixo	Risco Médio	Risco Alto
Nó	1. Alimentação de combustível na fornalha	8	3	3
	2. Alimentação de água na caldeira	3	5	0
	3. Alimentação de ar na fornalha	3	2	5
	4. Geração de Vapor na caldeira	7	5	0
	5. Saída de Vapor da caldeira	5	5	0

A partir da Tabela 23, é possível verificar que os nós que conferiram maior criticidade ao processo foram a alimentação de combustível na fornalha e a alimentação de ar na fornalha. Tal fato permite inferir que a combustão que ocorre dentro do forno apresenta a maior criticidade envolvida quando comparada às demais etapas do processo de geração de vapor. Além disso, é possível verificar que os demais nós, apesar de não apresentarem cenários do risco mais elevado, contém uma quantidade relativamente grande de cenários de risco médio. Isso indica que além da rigorosidade que deve ser empregada no gerenciamento do risco da combustão na fornalha, também é fundamental direcionar parte da atenção aos eventos de risco médio. Tal necessidade advém da possibilidade de uma reclassificação destes eventos para um risco mais alto, uma vez que tais eventos estão sujeitos a um aumento da frequência ou da severidade caso um gerenciamento eficiente das salvaguardas não esteja implementado.

Também foi possível estabelecer quais cenários, identificados pelos códigos que representam diferentes pares de causa e consequência, enquadram-se em cada uma das classes de risco, permitindo um entendimento pontual sobre cada um destes. A Tabela 24 apresenta qual a categoria de risco correspondente a cada cenário pontuado na análise, de acordo com os nós estabelecidos. O código de cada cenário, por exemplo, 1A, 1B, 2F, encontra-se definido no Anexo 1.

Tabela 24 – Cenários identificados e suas respectivas categorias de risco

Nós	Risco Baixo	Risco Médio	Risco Alto
1. Alimentação de combustível na fornalha	1A; 1B; 1C; 1D; 1F; 1H; 1J; 1N;	1E; 1G; 1L	1I; 1K; 1M
2. Alimentação de água na caldeira	2F; 2G; 2H;	2A; 2B; 2C; 2D; 2E	-
3. Alimentação de ar na fornalha	3D; 3H; 3J;	3F; 3G	3A; 3B; 3C; 3E; 3I
4. Geração de Vapor na caldeira	4A; 4B; 4G; 4H; 4I; 4J; 4K	4C; 4D; 4E; 4F; 4L	-
5. Saída de Vapor da caldeira	5B; 5C; 5D; 5E; 5J;	5A; 5F; 5G; 5H; 5I	-

De modo a entender as principais causas e consequências dos eventos mais críticos, torna-se fundamental explicitar a análise HAZOP dos eventos que apresentaram a maior categoria de risco. Esta avaliação encontra-se disponível na Tabela 25 a qual reúne os cenários de risco alto (vermelho) encontrados através do HAZOP. Todos os demais cenários avaliados no HAZOP estão no Anexo 1.

A partir da análise destes eventos que apresentaram a maior classificação de risco, foi possível verificar que todos apresentaram a mesma consequência; a formação de nuvem inflamável devido ao acúmulo de combustível na fornalha, podendo resultar em uma explosão. Notoriamente, a possibilidade de explosão resultou na classificação de severidade catastrófica, dado as chances de um operador sofrer uma fatalidade a partir destes eventos. Já na avaliação das causas destes cenários foi possível observar a presença de apenas duas possibilidades: falha do equipamento responsável (bomba ou soprador) ou falha do operador no controle manual da válvula de regulagem de vazão da alimentação de um dos insumos da fornalha.

Tabela 25 - Cenários encontrados na avaliação HAZOP que apresentaram o maior grau de risco

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso									
Processo: Caldeira Flamotubular								Risco	
Seção: -								Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas	Frequência		
1I	1	Vazão	Baixa	Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de combustível	Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015) 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	3	1	
1K	1	Vazão	Alta	Falha da Bomba (BB 1015) na alimentação do combustível	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Plano de manutenção da bomba BB1015	3	1	
1M	1	Vazão	Alta	Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de combustível	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015)	2	1	
3A	3	Vazão	Nula	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	3	1	

3B	3	Vazão	Nula	Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de ar	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016)	2	1	
3C	3	Vazão	Baixa	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	3	1	
3E	3	Vazão	Baixa	Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de ar	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016)	2	1	
3I	3	Vazão	Alta	Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de ar	Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016) 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	3	1	

Diante disso, para que a categoria da frequência destes eventos fosse definida inicialmente foi necessário ponderar sobre a natureza de ambas as causas. Como a primeira está relacionada à possíveis avarias ou danos em um equipamento e a segunda pelos erros provenientes de um operador, entendeu-se que uma classificação intermediária de frequência seria razoável para ambas causas. No entanto, é importante salientar que, com exceção do 1I e do 3I, as únicas salvaguardas presentes nestes cenários foram o plano de manutenção dos equipamentos correspondentes e o treinamento do operador, de acordo com a causa do evento. Tal fato implica numa maior possibilidade destes eventos atingirem sua respectiva consequência, visto que não há nenhuma barreira mitigatória capaz de impedir a concretização do cenário, aumentando sua frequência. Dessa forma, considerando os cenários de maior risco, esse conjunto de fatores resultou que fosse adotada uma classificação nível 3 para a frequência de cenários envolvendo falha no equipamento e uma classificação nível 2 para a frequência de cenários envolvendo falha do operador.

Portanto, a integração de uma alta severidade, proporcionada pela consequência, e uma frequência moderada (nível 3) e alta (nível 2), proveniente do tipo de causa e às poucas salvaguardas empregadas para mitigá-las, resultou na classificação de risco alto para estes oito eventos relacionados à operação conduzida na fornalha. Dessa forma, tais cenários foram encaminhados para a avaliação LOPA a fim de verificar qual seria o risco estimado a partir de uma abordagem semiquantitativa. Além disso, buscou-se também avaliar a contribuição das IPLs em vigor na minimização do risco de cada um destes, bem como a necessidade de implementação de novas camadas de proteção independentes.

A partir da Tabela 24 também foi possível constatar que o número de eventos classificados com risco intermediário pelo HAZOP foi relevante quando comparado ao número de cenários totais encontrados, representando um total de 39%. Vale frisar que, apesar de tais eventos apresentarem uma variedade de causas e consequências, foi possível inferir algumas observações a partir da análise destes. Primeiramente, observou-se que um dos principais fatores que possibilitou a diferenciação de uma classificação de alto risco para a de médio risco foram as causas estabelecidas para cada um destes cenários. Intuitivamente, as causas dos eventos de médio risco possuem frequências de ocorrência menores, contribuindo para uma redução na classificação de risco frente aos cenários que apresentam causas mais

recorrentes. Para demonstrar isto, na Tabela 26 encontra-se a causa e categoria de frequência de um cenário de médio risco qualquer de cada nó a fim de compará-los às causas dos eventos de alto risco.

Tabela 26 – Exemplos de causas dos cenários de risco médio e suas respectivas categorias frequências

Nó	Cenário	Causa	Frequência
1	1E	Vazamento na tubulação de alimentação do combustível	4
2	2A	Tanque de água vazio	5
3	3G	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	4
4	4C	Consumo de vapor abaixo do esperado	4
5	5I	Linha de saída de vapor obstruída	5

Ao avaliar tal tabela, é possível observar que as causas correspondentes aos cenários 1E, 2A, 4C e 5I foram consideradas com frequências menores que falhas em equipamentos e erros humanos durante a operação, conforme sugerido no parágrafo anterior. Esta demonstração evidencia a contribuição de uma causa específica na categorização da frequência, e conseqüentemente, na classificação do risco de um determinado evento.

No entanto, avaliar somente a causa para tentar compreender os principais motivos que contribuiriam para que eventos fossem classificados como risco alto ou risco médio torna-se insuficiente, dado aos demais elementos presentes na análise HAZOP. No cenário 3G, por exemplo, é possível visualizar que apesar de apresentar a mesma causa de cenários de alto risco, sua frequência foi classificada como categoria 4, divergindo da categoria 3 estabelecida nos cenários 3A e 3C. Tal fato pode ser justificado pois existem três salvaguardas empregadas no processo que contribuem para que o evento 3G tenha sua frequência reduzida, enquanto os cenários de alto risco que apresentaram a mesma causa possuem apenas uma.

É importante ressaltar que não se deve ignorar a influência de uma baixa severidade na redução do critério de risco de um determinado evento. No entanto, poucos foram os eventos

onde a severidade foi o fator decisivo na classe de risco dos cenários de médio risco. Diante disso, infere-se a relevância das causas e das salvaguardas como critérios fundamentais para diferenciar os eventos de risco intermediário e risco alto. Vale frisar que os eventos classificados como risco intermediário não foram direcionados para uma avaliação semiquantitativa, dado que foi adotada como estratégia que caso as salvaguardas do processo estejam em vigor e atuem da forma esperada, os riscos oferecidos por estes estarão bem gerenciados.

Dessa forma, a Tabela 27, apresenta as salvaguardas presentes no processo que atuam na minimização do risco de cada um dos cenários de risco médio e os cenários onde estas são aplicáveis. A partir destas, foram definidas - para cada uma das salvaguardas - ferramentas e medidas capazes de tornar a gestão destes elementos satisfatória, a fim de que o padrão desejado de segurança da operação seja alcançado.

Cada uma das ferramentas estabelecidas na Tabela 27 visa proporcionar um aumento na capacidade da salvaguarda de ser efetiva na minimização do risco associado. Conforme observado, as medidas mais recorrentes foram os planos de manutenção, calibração e qualificação de equipamentos e planos de treinamento de operadores. Estas ferramentas foram selecionadas pois, uma vez empregadas, tais planos possuem o potencial de estabelecer prazos de ações preventivas e corretivas, registrar atividades e avaliar o desempenho de forma contínua dos equipamentos utilizados ou de operadores contratados (CRAWLEY; TYLER, 2015). Caso bem implementadas, a confiabilidade e integridade destas salvaguardas assumem um nível suficientemente satisfatório para que estes eventos de risco médio permaneçam bem gerenciados, dispensando uma avaliação semiquantitativa.

Por fim, os cenários do HAZOP que apresentaram uma classificação de risco baixa não necessitaram de nenhuma medida adicional, dado às baixas frequências e severidades apresentadas por estes. É possível observar que o principal fator que contribuiu para esta classificação foi a baixa criticidade da consequência alcançada ao final do evento.

Tabela 27 - Gestão das salvaguardas presentes em cenários de risco médio

Salvaguardas	Cenários correspondentes	Gestão das salvaguardas
Plano de manutenção de um equipamento	1E; 1G; 2A; 2B; 2C; 2D; 2E; 3G; 4D; 4E; 4F; 4L; 5I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definição da periodicidade de manutenção preventiva dos equipamentos 2. Procedimento operacional escrito para execução da manutenção preventiva e corretiva 3. Definição de um plano de qualificação de instalação dos equipamentos
Malha de controle de intertravamento que interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada/nível muito baixo de água/pressão elevada	1E; 1G; 2A; 2B; 2C; 2D; 2E; 3G; 4C; 4D; 4E; 4F; 4L; 5F; 5G; 5H	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de calibração para os indicadores e transmissores que compõem a malha de controle; 2. Definição de um plano de qualificação de instalação dos elementos da malha de controle
Alarme de chama apagada	1E; 1G; 3G	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de calibração para os indicadores e transmissores que compõem o sistema de alarme; 2. Definição da periodicidade de testes que visem checar o funcionamento do alarme sonoro
Treinamento do operador na execução de atividades	1L; 3F; 4C; 4D; 4F; 4L; 5A; 5F; 5G; 5H; 5I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definir plano de treinamento que estabeleça as atividades e a periodicidade do treinamento para cada operador 2. Procedimentos operacionais escritos que definam a execução de controles manuais do processo 3. Definir um documento de registro para comprovação de que o operador foi treinado em determinada atividade
Malha de controle de fornecimento de água à caldeira	2A; 2D; 4E; 4F	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de calibração para os indicadores e transmissores que compõem a malha de controle 2. Definição de um plano de qualificação de instalação dos elementos da malha de controle
Indicadores de parâmetros operacionais	2A; 4C; 5A; 5F; 5G; 5H; 5I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definição de um plano de qualificação de instalação dos indicadores 2. Plano de calibração para os indicadores instalados
Válvula de segurança da caldeira	4C; 4D; 4L; 5F; 5G; 5H; 5I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de inspeção para a válvula de segurança 2. Execução de testes periódicos de desempenho para verificação do desempenho da válvula
Analisador de gases residuais da combustão	1L; 3F	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plano de manutenção e calibração do analisador 2. Definição de um plano de qualificação de instalação do analisador

Portanto, considerando os principais pontos abordados, a metodologia HAZOP permitiu:

- a) identificar os cenários de maior risco, médio risco e baixo risco;
- b) determinar os nós que contribuem para a criticidade do processo;
- c) compreender os efeitos das classificações de frequência e severidade no risco do cenário;
- d) reconhecer a relevância de causas, consequências e salvaguardas na minimização ou aumento da frequência de um evento;
- e) estabelecer ferramentas de gestão para a manutenção da integridade e confiabilidade de salvaguardas aplicáveis em cenários de risco médio;
- f) determinar os cenários que requerem uma avaliação semiquantitativa, proporcionada pela metodologia LOPA.

Assim, no tópico a seguir, encontram-se os resultados obtidos para os cenários de maior risco do HAZOP que foram então avaliados pela LOPA.

4.2 Resultado LOPA

Os resultados encontrados para cada um dos oito cenários de alto risco estão disponibilizados na análise individual de cada um dos oito cenários nos itens 4.2.2 ao 4.2.7. Evidentemente, para cada um dos eventos avaliados semiquantitativamente, considerações foram feitas para justificar a atribuição de determinados valores utilizados no cálculo da frequência da consequência mitigada. Assim, primeiramente, serão discutidas as premissas adotadas para todos os eventos, e, uma vez apresentadas, será discutido individualmente cada um dos cenários estudados e suas respectivas considerações.

4.2.1 Considerações Gerais

Primeiramente, é necessário salientar que a frequência atribuída para os eventos iniciadores e para as probabilidades de falha sob demanda das IPLs identificadas foram herdadas das Tabelas 21 e 22, respectivamente. Além disso, foi possível observar que todos os eventos avaliados pela metodologia LOPA apresentavam como consequência uma

possibilidade de fatalidade decorrente de uma explosão da fornalha. Assim, para que o evento iniciador resulte na consequência esperada, é preciso que três condições estejam presentes: a ignição, a presença do operador na área e a ocorrência de uma lesão fatal. Dessa forma, as probabilidades de ocorrência destas três condições deverão ser contempladas no cálculo da frequência não mitigada.

A probabilidade de ignição foi considerada 100%, uma vez que o acionamento da chama é inerente ao processo. A probabilidade de um operador estar na área no momento da ignição também foi considerada 100%, dado às atividades de controles manuais que este deverá executar durante o processo. Por fim, tendo em vista que a probabilidade de lesão fatal depende da energia liberada pela explosão e esta só é obtida por avaliações sofisticadas proporcionadas por análises quantitativas, assumiu-se uma postura conservadora e considerou-se uma probabilidade de 100% de lesão fatal caso a explosão ocorra.

Diante disso, uma vez apresentadas as premissas aplicáveis a todos eventos durante a avaliação proporcionada pelo LOPA, torna-se fundamental discutir as considerações feitas e resultados obtidos para cada um dos oito cenários.

4.2.2 Análise LOPA – Cenário 1I

Desvio: Vazão Baixa	Identificação do Cenário: 1I	Nó do Cenário: Alimentação de Combustível na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão		
Evento Iniciador	Falha do operador no controle manual de entrada do combustível		1,00E-01
Evento Permissor	-		NA
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição		1
	Probabilidade de pessoa na área		1
	Probabilidade de lesão fatal		1
	Outros (especificar)		-
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-01
Camadas de Proteção Independentes	Controle de intertravamento que interrompe fornecimento de combustível ao identificar chama apagada e purga dos gases inflamáveis		1,00E-02
	Ação humana para interromper alimentação de combustível e purga dos gases inflamáveis		1,00E-01
Salvaguardas que não são IPLs	Treinamento do operador quanto ao controle manual de entrada de combustível		
PFD Total para todos IPLs			1,00E-03
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-04
Comentários:	a) Foi considerado que o PFD do controle de intertravamento seja igual a de um BPCS (Sistema Básico de Controle de Processo) b) Foi considerado que a ação humana como IPL cumpre os requisitos necessários dado ao alarme (XSL 1012) disparado. c) Treinamento do operador foi considerado uma salvaguarda preventiva e não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. d) Avaliação quantitativa não necessária após a condução deste estudo.		

Dentre as salvaguardas apresentadas na avaliação HAZOP, somente duas satisfizeram as condições para serem consideradas IPLs na avaliação LOPA – o controle de intertravamento da alimentação de combustível e a intervenção humana. O controle de intertravamento tem sua eficácia verificada a partir do momento que interrompe a alimentação de combustível, é independente do evento iniciador e pode ser auditável, sendo configurada como uma IPL deste cenário. Já a interrupção da alimentação de combustível via ação humana, além de cumprir tais requisitos, precisa atender também aos quatro seguintes critérios: operador deve estar treinado, procedimento sobre a ação tomada deve estar escrito, o tempo de ação deve ser suficiente e alarme deve indicar necessidade da ação. Assumindo que elementos estejam empregados de modo que as três primeiras condições estejam sendo satisfeitas e sabendo que o alarme XSL 1012 sinaliza a necessidade da ação, tal salvaguarda também pode ser considerada uma IPL.

No entanto, a terceira salvaguarda – treinamento do operador no controle manual de entrada de combustível – não pode ser considerada um IPL uma vez que não atende ao critério de ser eficiente, isto é, de detectar e agir no impedimento da consequência. Além disso, o treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de combustível não impede que o cenário ocorra, visto que sua aplicação consiste em apenas minimizar a ocorrência da causa. Dessa forma, tal salvaguarda foi avaliada como apenas uma camada de proteção (PL) preventiva na análise LOPA.

Uma vez definidas as IPLs presentes no cenário, seus respectivos valores das PFDs foram atribuídos com base na Tabela 22. Para a ação humana foi adotada uma frequência de 10^{-1} ao ano. Para o controle de intertravamento, adotou-se a PFD correspondente a um Sistema Básico de Controle de Processo, isto é 10^{-2} ao ano. Apesar de haver malhas de controle com Funções Instrumentadas de Segurança (SIF) que apresentam PFDs menores, isto é, mais seguros, optou-se por selecionar aquela de maior frequência a fim de adotar-se uma avaliação conservadora do cenário.

A partir destes valores, a frequência da consequência mitigada foi igual a 10^{-4} ao ano. Considerando a matriz de classificação de frequência utilizada no HAZOP, temos que a nova frequência calculada do cenário corresponde a categoria 5. Isto significa dizer que a

frequência, classificada como 3 no HAZOP, foi superestimada na análise qualitativa. Além disso, é possível observar que as IPLs presentes exerceram uma influência considerável na minimização da frequência deste evento ao avaliá-lo através da metodologia LOPA.

Dessa forma, temos que, levando em consideração a matriz de risco, o risco do cenário 1I, considerado risco alto na análise HAZOP, passou a ser considerado risco médio após a avaliação da metodologia LOPA. Portanto, o cenário 1I dispensa uma avaliação quantitativa, desde que uma gestão eficiente de suas salvaguardas, pautada a partir dos itens aplicáveis da Tabela 27, esteja em vigor.

4.2.3 Análise LOPA – Cenário 1K

Desvio: Vazão Alta	Identificação do Cenário: 1K	Nó do Cenário: Alimentação de Combustível na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.		
Evento Iniciador	Falha da Bomba (BB 1015) na alimentação do combustível		1,00E-02
Evento Permissor	-	-	
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição	1	
	Probabilidade de pessoa na área	1	
	Probabilidade de lesão fatal	1	
	Outros (especificar)	-	
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-02
Camadas de Proteção Independentes	Não foram identificadas IPLs neste cenário	-	
Salvaguardas que não são IPLs	Plano de manutenção da bomba BB1015		
PFD Total para todos IPLs		-	
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-02
Comentários:	a) Não foram identificadas salvaguardas que satisfizessem os requisitos para serem consideradas uma IPL. b) Plano de manutenção da bomba BB1015 não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. c) Após a avaliação, foram sugeridas como IPL: uma malha de controle capaz de interromper o fornecimento de combustível e disparar um alarme sonoro caso a razão de combustível e de ar ultrapasse um valor pré-estabelecido. d) Avaliação quantitativa não necessária após a condução deste estudo.		

As descrições das causas e consequências foram obtidas a partir da avaliação HAZOP, e os valores obtidos a partir das premissas adotadas foram discutidos na Seção 4.2.1. Vale frisar que a única salvaguarda indicada na avaliação HAZOP não satisfaz as condições para ser considerada uma IPL. Tal salvaguarda corresponde ao plano de manutenção da bomba, que, apesar de contribuir para a minimização da frequência da causa do evento, não atende ao critério de ser eficiente, isto é, de detectar a falha e tomar medidas de correção.

A ausência de IPL implica na igualdade entre frequência não mitigada e frequência mitigada, fazendo com que esta atinja um valor consideravelmente alto: 10^{-2} ao ano. Apesar de tal resultado fornecer uma categoria 5 à frequência, reduzindo o seu risco de alto para médio, seria interessante um cenário com um potencial de fatalidade apresentar IPL.

Desse modo, a fim de incluir IPLs neste cenário, as seguintes salvaguardas foram propostas: uma malha de controle capaz de interromper o fornecimento de combustível, disparar um alarme sonoro caso a razão de combustível e ar ultrapasse um valor pré-estabelecido. Tal sistema permitiria que duas IPLs fossem incluídas na avaliação LOPA: a ação humana para a interrupção do fornecimento de combustível para fornalha por meio do alarme e o controle de intertravamento em função da razão entre combustível e ar. Uma vez interrompido o fornecimento de combustível, seja pela ação do operador ou do controlador, a purga da nuvem inflamável é acionada eliminando-a da fornalha.

Esse conjunto de ações permitiria que dois novos fatores entrassem no cálculo da frequência da consequência mitigada, a PFD da ação humana – 10^{-1} ao ano – e a PFD do controle de intertravamento - 10^{-2} ao ano. Tais fatores implicariam numa redução da frequência da consequência mitigada de 10^{-2} ao ano para 10^{-5} ao ano, tornando a operação muito mais segura.

Portanto, ao conduzir a análise LOPA para o cenário 1K, foi possível observar que a classificação da frequência do HAZOP (3), foi superestimada quando comparada a classificação da frequência obtida pelo LOPA (5). Esta redução da frequência resultou na reclassificação da categoria de risco do evento, indo de risco alto para risco médio. No entanto, devido à ausência de IPLs em um evento que apresenta a maior categoria de severidade possível, foram sugeridas duas salvaguardas que pudessem ser consideradas IPLs.

Uma vez implementadas, a contribuição dessas IPLs implicaria em uma frequência suficientemente baixa (10^{-5} ao ano) para o cenário estudado, tornando o processo mais seguro e dispensando uma análise quantitativa para este.

4.2.4 Análise LOPA – Cenário 1M

Desvio: Vazão Alta	Identificação do Cenário: 1M	Nó do Cenário: Alimentação de Combustível na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.		
Evento Iniciador	Falha do operador no controle manual de entrada do combustível		1,00E-01
Evento Permissor	-	-	
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição	1	
	Probabilidade de pessoa na área	1	
	Probabilidade de lesão fatal	1	
	Outros (especificar)	-	
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-01
Camadas de Proteção Independentes	Não foram identificadas IPLs neste cenário	-	
Salvaguardas que não são IPLs	Treinamento do operador quanto ao controle manual de entrada de combustível		
PFD Total para todos IPLs		-	
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-01
Comentários:	a) Não foram identificadas salvaguardas que satisfizessem os requisitos para serem consideradas uma IPL. b) Treinamento do operador foi considerado uma salvaguarda preventiva e não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. c) Após a avaliação, foram sugeridas como IPL: uma malha de controle capaz de interromper o fornecimento de combustível e disparar um alarme sonoro caso a razão de combustível e de ar ultrapasse um valor pré-estabelecido. d) Avaliação quantitativa necessária após a condução deste estudo.		

Para este cenário, de forma semelhante ao cenário 1K, a única salvaguarda indicada na avaliação HAZOP não satisfaz as condições para ser considerada uma IPL. Tal salvaguarda corresponde ao treinamento do operador no controle manual de combustível, que, apesar de contribuir para a minimização da frequência da causa do evento, não atende ao critério de ser eficiente, isto é, de detectar a falha e tomar medidas de correção.

Conforme discutido anteriormente, a ausência de quaisquer salvaguardas implica na igualdade entre frequência não mitigada e frequência mitigada. No caso do cenário 1M, a frequência da consequência mitigada encontrada foi muito alta, atingindo um valor de 10^{-1} ao ano. De acordo com a categorização de frequência, tal valor corresponde a categoria 2, o que significa dizer que não houve uma mudança de classificação ao comparar a frequência definida no HAZOP e a encontrada na análise LOPA. Portanto, a classificação de risco alto manteve-se após a análise semiquantitativa.

Esta equivalência de resultado confirma o grau de criticidade apresentado pelo cenário e, por isso, demanda que este seja avaliado de modo mais sofisticado por uma metodologia quantitativa. No entanto, com as informações obtidas pelo LOPA, é possível também seguir a mesma abordagem definida para o cenário 1K. Tendo em vista que se trata de um cenário sem nenhuma IPL e que apresenta a mesma causa do cenário anterior, as duas IPLs sugeridas para o evento 1K também poderiam ser sugeridas para o cenário 1M. Desse modo, teríamos a ação humana para a interrupção do fornecimento de combustível para fornalha por meio do alarme e o controle de intertravamento de alimentação de combustível. Analogamente, estes fatores, assumindo as mesmas PFDs descritas no cenário 1K, reduziriam a frequência da consequência mitigada para 10^{-4} ao ano.

Apesar da nova frequência permitir que aja uma reclassificação de risco alto para risco médio, é preciso frisar que o resultado obtido pelo LOPA, desconsiderando as propostas de IPLs, foi um cenário de risco alto. Dessa forma, a fim de manter uma abordagem conservadora, julga-se prudente a avaliação deste cenário por uma análise quantitativa de riscos.

4.2.5 Análise LOPA – Cenários 3A e 3C

Desvios: Vazão Nula e Vazão Baixa	Identificação do Cenário: 3A e 3C	Nó do Cenário: Alimentação de Ar na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.		
Evento Iniciador	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)		1,00E-02
Evento Permissor	-	-	
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição	1	
	Probabilidade de pessoa na área	1	
	Probabilidade de lesão fatal	1	
	Outros (especificar)	-	
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-02
Camadas de Proteção Independentes	Não foram identificadas IPLs neste cenário	-	
Salvaguardas que não são IPLs	Plano de manutenção no soprador e no motor de alimentação de ar		
PFD Total para todos IPLs		-	
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-02
Comentários:	a) Não foram identificadas salvaguardas que satisfizessem os requisitos para serem consideradas uma IPL. b) Plano de manutenção do conjunto soprador/motor não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. c) Após a avaliação, foram sugeridas como IPL: uma malha de controle capaz de interromper o fornecimento de combustível e disparar um alarme sonoro caso a razão de combustível e de ar ultrapasse um valor pré-estabelecido. d) Avaliação quantitativa não necessária após a condução deste estudo.		

Inicialmente, é preciso justificar que a avaliação destes cenários se deu de forma conjunta pois eles correspondem exatamente ao mesmo evento, visto que apresentam o mesmo par de causa e consequência, porém, alcançados através de desvios diferentes (vazão nula e vazão baixa).

Vale frisar que, de forma semelhante ao cenário 1K e 1M, só existe uma única salvaguarda, a qual não satisfaz as condições para ser considerada uma IPL. Tal salvaguarda corresponde ao plano de manutenção no soprador e no motor, que, apesar de contribuir para a minimização da frequência da causa do evento, não atende ao critério de ser eficiente, isto é, de detectar a falha e tomar medidas de correção.

Portanto, de forma análoga aos cenários 1K e 1M, a frequência da consequência não mitigada foi igual a frequência da consequência mitigada, apresentando um valor de 10^{-2} ao ano. De acordo com a categorização de frequência, tal valor corresponde a categoria 5, o que significa dizer que a avaliação LOPA indicou uma frequência de ocorrência menor que aquela apresentada no HAZOP. De acordo com a matriz de risco, esta reclassificação da frequência implica na diminuição da classificação de risco alto para risco médio. É possível perceber que os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados no cenário 1K, visto que a única diferença são os equipamentos que apresentam as falhas no evento iniciador, os quais resultam em uma proporção elevada de combustível na fornalha.

Diante disso, sabendo que tais cenários apresentam potencial de fatalidade e que as mesmas barreiras mitigadoras podem ser implementadas devido à semelhança dos cenários estudados, as IPLs sugeridas para o cenário 1K também foram propostas para os eventos 3A e 3C. Tais IPLs, conforme demonstrado na discussão do cenário 1K, implicariam numa redução da frequência da consequência mitigada de 10^{-2} ao ano para 10^{-5} ao ano, tornando a operação muito mais segura e dispensando uma análise de risco quantitativa. A redução de risco proporcionada pela LOPA alinhada à diminuição da frequência da consequência mitigada obtida a partir das IPLs propostas dispensam uma análise de risco quantitativa para os cenários 3A e 3C.

4.2.6 Análise LOPA – Cenários 3B e 3E

Desvios: Vazão Nula e Vazão Baixa	Identificação do Cenário: 3B e 3E	Nó do Cenário: Alimentação de Ar na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.		
Evento Iniciador	Falha do operador no controle manual de entrada de ar		1,00E-01
Evento Permissor	-	-	
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição	1	
	Probabilidade de pessoa na área	1	
	Probabilidade de lesão fatal	1	
	Outros (especificar)	-	
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-01
Camadas de Proteção Independentes	Não foram identificadas IPLs neste cenário	-	
Salvaguardas que não são IPLs	Treinamento do operador quanto ao controle manual de entrada de ar		
PFD Total para todos IPLs		-	
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-01
Comentários:	a) Não foram identificadas salvaguardas que satisfizessem os requisitos para serem consideradas IPLs. b) Treinamento do operador foi considerado uma salvaguarda preventiva e não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. c) Após a avaliação, foram sugeridas como IPL: uma malha de controle capaz de interromper o fornecimento de combustível e disparar um alarme sonoro caso a razão de combustível e de ar ultrapasse um valor pré-estabelecido. d) Avaliação quantitativa necessária após a condução deste estudo.		

Igualmente aos cenários 3A e 3C, o 3B e 3E foram representados através de uma única análise pois correspondem exatamente ao mesmo evento, visto que apresentam o mesmo par de causa e consequência, porém, alcançados através de desvios diferentes (vazão nula e vazão baixa).

Vale frisar que a única salvaguarda indicada na avaliação HAZOP não satisfaz as condições para ser considerada uma IPL. Tal salvaguarda corresponde ao treinamento do operador no controle manual de entrada de ar, que, apesar de contribuir para a minimização da frequência da causa do evento, não atende ao critério de ser eficiente, isto é, de detectar a falha e tomar medidas de correção.

Conforme discutido nos últimos cenários, a ausência de quaisquer salvaguardas implica na igualdade entre frequência não mitigada e frequência mitigada. No caso dos cenários 3B e 3E, a frequência da consequência mitigada encontrada foi muito alta, atingindo um valor de 10^{-1} ao ano. De acordo com a categorização de frequência, tal valor corresponde a categoria 2, o que significa dizer que não houve uma mudança de classificação ao comparar a frequência definida no HAZOP e a encontrada na análise LOPA. Portanto, a classificação de risco alto manteve-se após a análise semiquantitativa. É possível perceber que os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados no cenário 1M, visto que a única diferença é desproporção na alimentação de combustível ou ar.

Conforme discutido no cenário 1M, esta equivalência de resultado demanda que este cenário seja avaliado de modo mais rigoroso por uma metodologia quantitativa. No entanto, levando em consideração as semelhanças tais eventos, as IPLs sugeridas para o cenário 1M também foram propostas para os eventos 3B e 3E. Estas salvaguardas contribuiriam para a minimização dos riscos oferecidos por tais cenários e tornariam a ação humana por meio do alarme e o controle de intertravamento de alimentação de combustível como IPLs do processo.

Dessa forma, estes fatores, assumindo as mesmas PFDs descritas no cenário 1M, reduziriam a frequência da consequência mitigada para 10^{-4} ao ano. Apesar da nova frequência permitir que aja uma reclassificação de risco alto para risco médio, é preciso frisar que o resultado obtido pelo LOPA, desconsiderando as propostas de IPLs, foi um cenário de

risco alto. Dessa forma, a fim de manter uma abordagem conservadora, julga-se prudente a avaliação destes cenários por uma análise quantitativa de riscos.

4.2.7 Análise LOPA – Cenário 3I

Desvio: Vazão Alta	Identificação do Cenário: 3I	Nó do Cenário: Alimentação de Ar na Fornalha	
	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da consequência/ Categoria	Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão		
Evento Iniciador	Falha do operador no controle manual da entrada de ar		1,00E-01
Evento Permissor	-	-	
Condições (caso aplicável)	Probabilidade de Ignição	1	
	Probabilidade de pessoa na área	1	
	Probabilidade de lesão fatal	1	
	Outros (especificar)	-	
Frequência da Consequência não mitigada			1,00E-01
Camadas de Proteção Independentes	Controle de intertravamento que interrompe fornecimento de combustível ao identificar chama apagada e purga dos gases inflamáveis	1,00E-02	
	Ação humana para interromper alimentação de combustível e purga dos gases inflamáveis	1,00E-01	
Salvaguardas que não são IPLs	Treinamento do operador quanto ao controle manual de entrada de combustível		
PFD Total para todos IPLs		1,00E-03	
Frequência da Consequência Mitigada			1,00E-04
Comentários:	a) Foi considerado que o PFD do controle de intertravamento seja igual a de um BPCS (Sistema Básico de Controle de Processo) b) Foi considerado que a ação humana como IPL cumpre os requisitos necessários dado ao alarme (XSL 1012) disparado. c) Treinamento do operador foi considerado uma salvaguarda preventiva e não é configurado como IPL devido ao não atendimento dos critérios para ser considerado eficiente. d) Avaliação quantitativa não necessária após a condução deste estudo.		

O cenário 3I equivale ao cenário 1I, com a diferença que o apagamento da chama não é causado pela vazão baixa de combustível, mas sim pela vazão alta de ar na alimentação da fornalha. Diante disso, as mesmas considerações para as salvaguardas estabelecidas foram levadas em conta, implicando num total de duas IPLs e uma salvaguarda que não se encaixa como IPL.

Levando-se em consideração os PFDs das IPLs, a frequência da consequência mitigada foi igual a 10^{-4} ao ano. Considerando a matriz de classificação de frequência utilizada no HAZOP, temos que a nova frequência calculada do cenário corresponde a categoria 5. Isto significa dizer que a frequência, classificada como 3 no HAZOP, foi superestimada. Além disso, é possível observar que as IPLs presentes exerceram uma influência considerável na minimização da frequência deste evento ao avaliá-lo através da metodologia LOPA.

Dessa forma, levando em consideração a matriz de risco, o risco do cenário 3I, considerado alto na análise HAZOP, passou a ser considerado um cenário de risco médio após a avaliação da metodologia LOPA. Portanto, o cenário 3I dispensa uma avaliação quantitativa, desde que uma gestão eficiente de suas salvaguardas, pautada a partir dos itens aplicáveis da Tabela 27, esteja em vigor.

4.2.8 Considerações sobre o LOPA

A partir das premissas adotadas e da discussão levantada para cada um dos resultados obtidos através da análise LOPA, a Tabela 28 consolida as principais informações e dados relevantes proporcionados pela avaliação semiquantitativa, como por exemplo, a minimização de risco alcançada, a influência de novas IPLs no processo e os eventos que necessitam de uma avaliação quantitativa.

Diante disso, é possível inferir que dentre os oito cenários avaliados, somente três eventos apresentaram complexidade suficiente para demandar uma análise de risco quantitativa. Essa complexidade é demonstrada a partir da igualdade das classificações de risco encontradas na análise HAZOP e na análise LOPA. Para três dos cinco cenários remanescentes, nenhuma IPL encontrava-se em vigor, no entanto, apresentaram uma redução

de risco alto para risco médio, considerando os resultados do HAZOP e LOPA. Deste modo, devido à ausência de IPLs, foram definidas possíveis camadas de proteção que atuariam como barreiras mitigadoras. A redução do risco proporcionada pelo LOPA somada a implementação das IPLs dispensou uma análise quantitativa, considerando a aplicação das ferramentas de gestão de salvaguardas sugeridas. Por fim, houveram dois cenários que, por demonstrarem uma redução no risco a partir da análise LOPA e por possuírem IPLs capazes de reduzir a frequência da ocorrência, não necessitaram de nenhuma ação adicional.

Tabela 28 - Consolidação dos resultados obtidos no LOPA

Cenários	Classificação de risco - HAZOP	Classificação de risco - LOPA	IPLs propostas	Necessita de avaliação quantitativa?
1I	Risco Alto	Risco Médio	Não houve	Não
1K	Risco Alto	Risco Médio	1) Ação humana para interrupção da alimentação de combustível e purga dos gases 2) Controle de intertravamento de alimentação de combustível com base na razão das vazões combustível/ar e purga dos gases	Não
1M	Risco Alto	Risco Alto	1) Ação humana para interrupção da alimentação de combustível e purga dos gases 2) Controle de intertravamento de alimentação de combustível com base na razão das vazões combustível/ar e purga dos gases	Sim
3A e 3C	Risco Alto	Risco Médio	1) Ação humana para interrupção da alimentação de combustível e purga dos gases 2) Controle de intertravamento de alimentação de combustível com base na razão das vazões combustível/ar e purga dos gases	Não
3B e 3E	Risco Alto	Risco Alto	1) Ação humana para interrupção da alimentação de combustível e purga dos gases 2) Controle de intertravamento de alimentação de combustível com base na razão das vazões combustível/ar e purga dos gases	Sim
3I	Risco Alto	Risco Médio	Não houve	Não

Levando em consideração a Tabela 23, que faz a correspondência entre os eventos e as classificações obtidas a partir do HAZOP, e, partindo dos resultados e das reclassificações proporcionadas pela análise LOPA, a Tabela 29 apresenta o resultado final obtido a partir da integração das análises HAZOP e LOPA, onde:

- a) Cenários de baixo risco (Verde) não exigem medidas adicionais;
- b) Cenários de médio risco (Amarelo) necessitam que ferramentas de controle estejam em vigor a fim de gerenciar de forma efetiva o bom funcionamento das salvaguardas aplicáveis, conforme os exemplos explicitados para cada uma destas na Tabela 27;
- c) Cenários de alto risco (Vermelho) exigem uma análise quantitativa a fim de avaliar o cenário através de metodologias mais robustas.

Tabela 29 - Resultado final da integração do HAZOP e do LOPA

Nós	Risco Baixo	Risco Médio	Risco Alto
1. Alimentação de combustível na fornalha	1A; 1B; 1C; 1D; 1F; 1H; 1J; 1N;	1E; 1G; 1L; 1I; 1K	1M
2. Alimentação de água na caldeira	2F; 2G; 2H;	2A; 2B; 2C; 2D; 2E	-
3. Alimentação de ar na fornalha	3D; 3H; 3J;	3A; 3C; 3F; 3G; 3I	3B; 3E;
4. Geração de Vapor na caldeira	4A; 4B; 4G; 4H; 4I; 4J; 4K	4C; 4D; 4E; 4F; 4L	-
5. Saída de Vapor da caldeira	5B; 5C; 5D; 5E; 5J;	5A; 5F; 5G; 5H; 5I	-

Portanto, a análise LOPA permitiu, através de uma avaliação mais criteriosa dos cenários de alto risco, alcançar:

- a) a determinação das IPLs presentes em cada um dos cenários a partir das salvaguardas presentes nos mesmos;
- b) a compreensão da influência das IPLs, incluindo as sugeridas, na redução de risco dos cenários;
- c) o levantamento de novas IPLs para cenários que não possuem barreiras mitigadoras;

- d) o entendimento sobre a criticidade oferecida por cada tipo de evento iniciador estudado e sua influência na classificação do risco;
- e) a capacidade proteção de cada IPL e sua influência na classificação do risco;
- f) a identificação de eventos que necessitam de uma avaliação mais robusta proporcionada pela análise quantitativa.

5 CONCLUSÃO

Sabe-se que o desenvolvimento e a implementação de um gerenciamento de risco em um processo são fundamentais para que a segurança dos operadores e a integridade da operação sejam alcançados. Com a finalidade de atingir tal objetivo, é possível recorrer a diferentes metodologias de análise de risco, as quais pautam-se em abordagens diversas, tais como avaliações qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas.

Tal contexto permitiu que este trabalho buscasse compreender a integração entre a avaliação HAZOP, qualitativa, e a avaliação LOPA, semiquantitativa. Para isso, foi selecionado como estudo de caso uma operação que apresenta um histórico de fatalidades elevado na indústria química – a geração de vapor por uma caldeira.

Ao utilizar as ferramentas proporcionadas pela análise HAZOP, foi possível evidenciar as causas e consequências de um determinado cenário acidental, bem como as salvaguardas presentes capazes de agir na redução do risco oferecido por este. De acordo com critérios estabelecidos para a classificação de frequência e severidade, também foi possível definir a criticidade de cada um dos cenários identificados durante a avaliação. Esta classificação de eventos com base nos riscos oferecidos pelos mesmos permitiu que diferentes ações fossem tomadas para cada um destes.

Conforme esperado, cenários de risco baixo dispensaram quaisquer ações. No entanto, cenários de risco médio exigiram a recomendação de que, no mínimo, ferramentas capazes de manter a eficiência das salvaguardas presentes em cada um dos eventos estivessem em vigor. Portanto, por apresentarem uma classificação intermediária, somente foram necessárias ações ou atividades destinadas a este fim sem que houvesse a obrigatoriedade de avaliar quantitativamente tal cenário. Finalmente, eventos classificados na maior categoria de risco foram direcionados à uma avaliação semiquantitativa com a finalidade de evidenciar a criticidade oferecida pelo cenário através de métodos mais sofisticados.

A categorização oferecida pelo HAZOP foi fundamental para possibilitar a compreensão das etapas operacionais que se encontram suficientemente seguras, a forma que o risco se encontra distribuído pelo processo, as consequências que resultam nos maiores

índices de severidade e os cenários que apresentam uma quantidade reduzida de salvaguardas considerando sua severidade. Este conjunto de informações contribuiu, sobretudo, para uma identificação assertiva dos eventos cujas salvaguardas necessitam de ferramentas de gestão para que suas eficiências sejam mantidas e para a determinação dos cenários que demandam a rigorosidade proporcionada por uma análise semiquantitativa.

Na análise LOPA, a atribuição de ordens de grandeza para mensurar a capacidade de proteção de uma IPL e para avaliar a frequência de um evento iniciador foi fundamental para entender quais elementos exerciam uma maior influência na mitigação e na criticidade do processo, respectivamente. Além disso, a capacidade de apresentar uma metodologia que resulta em uma avaliação mais detalhada permitiu que 5 dos 8 eventos de risco alto fossem reclassificados para a categoria de risco médio. Tal resultado impacta diretamente no tempo utilizado por uma equipe de análise de risco, visto que uma menor quantidade de cenários será avaliada por uma metodologia quantitativa. Dessa forma, o tempo necessário para a condução da análise diminuiu sem que a segurança do processo seja negligenciada, visto que os cenários excluídos se encontram dentro dos padrões aceitáveis.

Outra vantagem obtida através do LOPA foi a possibilidade de verificar a ausência de quaisquer barreiras mitigadoras em eventos com potencial de fatalidade. Mesmo com uma mudança de categoria para risco médio, julgou-se prudente definir no mínimo uma IPL capaz de atuar na mitigação do risco apresentado por estes. Dessa forma, com base nessa identificação, foi possível apresentar novas IPLs capazes de aumentar ainda mais a segurança de cenários, sem que fosse necessário avaliar quantitativamente tais cenários.

Portanto, este conjunto de resultados encontrados, possibilitados pela integração entre o HAZOP e o LOPA, demonstra a complementaridade entre ambas metodologias. Cada uma das abordagens utilizadas possibilitou que estratégias com focos distintos fossem endereçadas a fim de otimizar o gerenciamento de risco sobre a geração de vapor da caldeira flamotubular. Em suma, este conjunto de ações possibilitou que as salvaguardas fossem gerenciadas de forma eficaz, permitiu a implementação de IPLs que contribuem para a diminuição da frequência de cenários relacionados a explosão na fornalha e reduziu significativamente o número de eventos direcionados à análise quantitativa. Tal resultado,

portanto, sumariza a eficácia da implementação de uma metodologia de risco integrada a partir do HAZOP e do LOPA no estudo de caso de geração de vapor a partir de uma caldeira flamatubular.

Como trabalho futuro, entende-se que a continuidade deve ser dada a partir da avaliação dos eventos classificados como risco alto, após o LOPA, através de uma metodologia qualitativa. Dessa forma, seria possível determinar com maior precisão a severidade para cada um dos cenários e, assim, ter a possibilidade de reduzir o risco oferecido por tais eventos a níveis aceitáveis.

Além disso, a aplicação da metodologia demonstrada neste trabalho também pode se estender a demais equipamentos que são responsáveis por um número acima da média de acidentes, tais como reatores. Tal desenvolvimento tem o potencial de comparar os resultados obtidos entre diferentes sistemas e, assim, definir a capacidade de redução do risco a níveis aceitáveis para cada um destes.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ALTAFINI, Carlos R. Curso de engenharia mecânica – disciplina de máquinas térmicas – apostila sobre caldeiras – Universidade de Caxias do Sul, 2002. Disponível em: <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeiras-apostila.pdf>>. Acesso em Novembro de 2019.

BAUM, D.; FAULK, N.; PEREZ, P. E. J.. Improved Integration of LOPA with HAZOP Analyses. **Process Safety Progress**, v. 28, n. 4, p. 308-311, 2009

BAYBUTT, Paul. A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 33, p. 52-58, 2015.

BAYBUTT, P. Addressing Enablers in Layers of Protection Analysis. **Process Safety Progress**, v. 00, n. 00, p. 1-6, 2014.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2. ed. aum. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 216 p.

BLANCO, R. F. Understanding Hazards, Consequences, LOPA, SILs, PFD, and RRFs as Related to Risk and Hazard Assessment. **Process Safety Progress**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 208-216, 12 set. 2014

BEGA, E. A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 179 p.

BRIDGES, W. B.; CLARK, T. Key Issues with Implementing LOPA. **Process Safety Progress**, v. 29, n. 2, p. 103-107, 2010.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (New York). **Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2016. 302 p.

CCPS. **Guidelines for hazard evaluation procedures**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons., Inc, 2008. 549 p. ISBN 978-0-471-97815-2.

CCPS (New York). **Layer of Protection Analysis: SIMPLIFIED PROCESS RISK ASSESSMENT**. 1. ed. New York: [s. n.], 2001. 280 p. ISBN 0-8169-0811-7.

CRAWLEY, Frank; TYLER, Bryan. **HAZOP: Guide to Best Practice**: Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries. 3. ed. [S. l.]: Elsevier, 2015. 164 p. ISBN 978-0-323-39460-4.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**. 3. ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2011. 723 p.

DOWELL, A. M.; WILLIAMS, T. R. **Layer of Protection Analysis: Generating Scenarios Automatically from HAZOP Data**. *Process Safety Progress*, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 38-44, 1 mar. 2005

DUKELOW, S. G. **The control of boilers**. 2. ed. [S. l.]: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1991. 414 p. ISBN 1-55617-330-X

ECKERMAN, Ingrid. The Bhopal gas leak: Analyses of causes and consequences by three different models. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Sweden, v. 18, p. 213-217, 7 jul. 2005. DOI 10.1016/j.jlp.2005.07.007

G1, **Falta d'água em caldeira causou explosão em cervejaria em Jacareí. G1, 2016.**

Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2016/11/falta-dagua-em-caldeira-causou-explosao-em-cervejaria-em-jacarei.html>>. Acesso em 17 de Novembro de 2019.

GILMAN, G. F. **Boiler Control Systems Engineering**. 1. ed. North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. 79 p. ISBN 1-55617-907-3.

ICHEME. **BP Process Safety Series: Safe Furnace and Boiler Firing**. 4. ed. [S. l.: s. n.], 2005. 86 p. ISBN 0 85295 472 7.

JIN, J.; SHUAI, B.; WANG, X.; ZHU, Z. Theoretical basis of quantification for layer of protection analysis (LOPA). **Annals of Nuclear Energy**, v. 87, p. 69-73, 2016.

KLETZ, T. A. **HAZOP - Past and Future**. Reliability Engineering and System Safety, Leicestershire, v. 55, p. 263-266, 1997.

KOTEK, L.; TABAS, M. HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions. **Procedia Engineering**, Czech Republic, v. 42, p. 879-886, 2012.

KUMAR, Sushil. Evolution of Process Safety Management. **Indian Chemical Engineer**, India, v. 56, n. 1, p. 61-70, 9 jan. 2014. DOI 10.1080/00194506.2013.851864.

LEITE, Nilson R.; MILITÃO, Renato de A. **Tipos e aplicações de caldeiras. Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor**. Escola Politécnica – Deptº de Engenharia Mecânica EPUSP-PROMIMP, 2008

LING, J. (2000): **The evolution of the ASME boiler and pressure vessel code**. Journal of Pressure Vessel Technology. Vol. 122, pp. 242-246.

MANNAN, M. S.; VALDEZ, O. R.; JAIN, P.; TAMIM, N; AHAMMAD, M. The Evolution of Process Safety: Current Status and Future Direction. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, [S. l.], v. 7, p. 135-162, 14 mar. 2016

MARKOWSKI, A. S.; MANNAN, M. S. ExSys-LOPA for the chemical process industry. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 23, p. 688-696, 2010.

MEIRA, G.. **Refinaria Landulpho Alves – RLAM. Acidente da Exxon Mobil**. Disponível em: < <http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2013/06/caso-023-explosaoda-caldeira-da-exxon.html>>. Acesso em: Novembro de 2019.

MUSHTAQ, F.; CHUNG, P. W. H. A systematic Hazop procedure for batch processes, and its application to pipeless plants. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Loughborough, v. 13, p. 41-48, 2000.

MYERS, P. M. Layer of Protection Analysis: Quantifying human performance in initiating events and independent protection layers. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 26, p. 534-546, 2013.

NOGUEIRA, L. A. H. *et al.* **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Norma Regulamentadora 13 do Ministério do Trabalho e Emprego**. Manual Técnico de Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação.

PERA, H. Geradores de vapores. Editora Fama: São Paulo, 1990.

SANDERS, R. E. **Chemical Process Safety: Learning from Case Histories**. 3. ed. Burlington: Elsevier Inc., 2005. 344 p.

SUMMERS, A. *et al.* Improving PHA/LOPA by consistent consequence severity estimation. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [S. l.], v. 24, p. 879-885, 2011.

SUMMERS, A. E. Introduction to layers of protection analysis. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 104, p. 163-168, 2003.

SWANN, C. D.; PRESTON, M. L. Twenty-five years of HAZOPs. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 8, n. 6, p. 349-353, 1995.

VALDMAN, A. **SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA MONITORAMENTO ONLINE DE GASES RESIDUAIS E DIAGNÓSTICO DE UMA CALDEIRA OPERADA COM MISTURAS DIESEL/BIODIESEL**. Orientador: MAURÍCIO BEZERRA DE SOUZA JR. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

VANDAGRIFF, R. L. **Practical Guide to Industrial Boiler Systems**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. ISBN 0-8247-0532-7.

VENKATASUBRAMANIAN, Venkat; VAIDHYANATHAN, Ramesh. A Knowledge-Based Framework for Automating HAZOP Analysis. **AIChE Journal**, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 496-505, 1994.

WONGTSCHOWSKI, Pedro. **INDUSTRIA QUIMICA: RISCOS E OPORTUNIDADES**. 2. ed. Brasil: Blucher, 2002. 320 p.


ANEXO 1

I) Formulário HAZOP do Nó de Estudo 1

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso									
Processo: Caldeira Flamotubular								Risco	
Seção: Alimentação de Combustível na Fornalha								Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas	Frequência		
1A	1	Vazão	Nula	Tanque de combustível vazio	Passagem de ar frio pelos tubos de aquecimento	1 - Plano de manutenção do tanque de combustível 2 - Indicador de nível de combustível no tanque (LIT 1013)	4	5	
1B	1			Falha da Bomba (BB 1015) na alimentação do combustível		1 - Plano de manutenção da bomba BB1015	3	5	
1C	1			Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de combustível		1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015) 2 - Analisador de gases residuais da combustão	2	5	
1D	1	Vazão	Baixa	Vazamento na tubulação de alimentação do combustível	1 - Diminuição da quantidade de vapor consumido	1 - Plano de manutenção da tubulação de alimentação de combustível 2 - Indicador de vazão da linha de vapor consumido (FIT 1031)	4	5	

1E	1			2 - Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Plano de manutenção da tubulação de alimentação de combustível 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	4	1	
1F	1		Falha da Bomba (BB 1015) na alimentação do combustível	1 - Diminuição da quantidade de vapor consumido	1 - Plano de manutenção da bomba BB1015 2 - Indicador de vazão da linha de vapor consumido (FIT 1031)	3	5	
1G	1			2 - Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Plano de manutenção da bomba BB1015 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	4	1	
1H	1		Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de combustível	1 - Diminuição da quantidade de vapor consumido	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015) 2 - Indicador de vazão da linha de vapor consumido (FIT 1031)	2	5	

1I	1				2 - Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015) 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	3	1	
1J	1	Vazão	Alta	Falha da Bomba (BB 1015) na alimentação do combustível	Combustão parcial com formação de CO, fumaça e materiais particulados: fonte de poluição atmosférica	1 - Plano de manutenção da bomba BB1015 2 - Analisador de gases residuais da combustão	3	4	
1K	1				2- Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Plano de manutenção da bomba BB1015	3	1	
1L	1			Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de combustível	1 - Combustão parcial com formação de CO, fumaça e materiais particulados: fonte de poluição atmosférica	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015) 2 - Analisador de gases residuais da combustão	2	4	
1M	1				2- Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1015)	2	1	
1N	1				Composição	Diferente	1 - Combustível fora da especificação	1 - É fornecido um certificado pelo fornecedor a respeito da composição do combustível	4

					causado por componentes indevidos	2 - Plano de manutenção da tubulação de alimentação e da caldeira				
--	--	--	--	--	-----------------------------------	---	--	--	--	---

Fim da avaliação do Nó 1

II) Formulário HAZOP do Nó de Estudo 2

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso							Risco	
Processo: Caldeira Flamotubular							Severidade	
Seção: Alimentação de Água na Caldeira							Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas	Frequência	
2A	2	Vazão	Nula	Tanque de água vazio	Diminuição do nível da água da caldeira, podendo haver sobreaquecimento e explosão da mesma	1 - Manutenção preventiva do tanque de armazenamento de água 2 - Indicador de nível de água do tanque de armazenamento (LIT 1021) 3 - Controlador acionado pelo alarme de nível baixo de água que liga a bomba de alimentação de água (LSL 1026) 4 - Controlador acionado pelo alarme de nível muito baixo de água que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha (LSLL 1026)	5	1
2B	2			Falha do sistema automático liga-desliga da água de alimentação		1- Manutenção preventiva do conjunto transmissor (LIT 1026) e alarmes de níveis alto e baixo de água na caldeira (LSH 1026 e LSL 1026) 2 -Controlador acionado pelo alarme de nível muito baixo de água que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha (LSLL 1026)	4	1

2C	2			Bomba de alimentação de água (BB 1021) com defeito		1- Manutenção preventiva da bomba de alimentação de água (BB1021) 2 -Controlador acionado pelo alarme de nível muito baixo de água que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha (LSLL 1026)	4	1	
2D	2	Vazão	Baixa	Vazamento na tubulação de alimentação de água	Diminuição do nível da água da caldeira, podendo haver sobreaquecimento e explosão da mesma	1- Manutenção preventiva da tubulação e inspeções periódicas para verificar suas condições físicas 2 - Controlador acionado pelo alarme de nível baixo de água que liga a bomba de alimentação de água (LSL 1026) 3 -Controlador acionado pelo alarme de nível muito baixo de água que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha (LSLL 1026)	5	1	
2E	2			Bomba de alimentação de água (BB 1021) com defeito		1- Manutenção preventiva da bomba de alimentação de água (BB1021) 2 -Controlador acionado pelo alarme de nível muito baixo de água que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha (LSLL 1026)	4	1	
2F	2	Vazão	Alta	Bomba de alimentação de água (BB 1021) com defeito	Aumento do nível de água na caldeira	1- Manutenção preventiva da bomba de alimentação de água (BB1021) 2 - Controlador acionado pelo alarme de nível alto de água que desliga a bomba de alimentação de água (LSH 1026)	3	4	

2G	2	Dureza	Alta	Água de alimentação utilizada com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio	Incrustação de sais nas tubulações e na caldeira, podendo criar pontos de sobreaquecimento.	1 - Análise periódica da água afim de verificar se a água de alimentação encontra-se dentro dos critérios aceitáveis 2 - Inspeções periódicas visando a identificação de sinais de corrosão nas tubulações e na caldeira	4	3	
2H	2	Dureza	Baixa	Água de alimentação utilizada com baixa quantidade de sais de cálcio e magnésio	Nenhum efeito ao sistema de geração de vapor	1 - Análise periódica da água afim de verificar se a água de alimentação se encontra dentro dos critérios aceitáveis	4	5	

Fim da avaliação do Nó 2

III) Formulário HAZOP do Nó de Estudo 3

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso								Risco	
Processo: Caldeira Flamotubular								Severidade	
Seção: Alimentação de Ar na Fornalha								Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra- guia	Causas	Consequências	Indicadores / Salvaguardas	Frequência		
3A	3	Vazão	Nula	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	3	1	
3B	3			Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de ar		1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016)	2	1	
3C	3	Vazão	Baixa	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	3	1	
3D	3					Combustão parcial com formação de CO, fumaça e materiais particulados: fonte de poluição atmosférica	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) 2 - Analisador de gases residuais da combustão	3	
3E	3			Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da	Risco de explosão devido ao acúmulo de combustível, formando nuvem inflamável, no interior da fornalha.	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016)	2	1	

3F	3			vazão de entrada de ar	Combustão parcial com formação de CO, fumaça e materiais particulados: fonte de poluição atmosférica	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016) 2 - Analisador de gases residuais da combustão	2	4	
3G	3	Vazão	Alta	Falha no conjunto soprador (SI 1046) e motor (MT 1016)	Apagamento da chama e acúmulo de combustível no forno sem combustão com risco de explosão.	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	4	1	
3H	3					Diminuição da quantidade de vapor consumido	1 - Manutenção preventiva no soprador (SI 1046) 2 - Indicador de vazão da linha de vapor consumido (FIT 1031)	2	5
3I	3			Falha do operador no ajuste manual da válvula reguladora da vazão de entrada de ar	Apagamento da chama e formação de nuvem inflamável com risco de explosão	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016) 2 - Controle de intertravamento interrompe fornecimento de combustível devido a chama apagada 3- Alarme de chama apagada (XSL 1012)	3	1	

3J	3			Diminuição da quantidade de vapor consumido	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste manual da válvula (VV 1016) 2 - Indicador de vazão da linha de vapor consumido (FIT 1031)	2	5	
----	---	--	--	---	---	---	---	--

Fim da avaliação do Nó 3

IV) Formulário HAZOP do Nó de Estudo 4

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso								
Processo: Caldeira Flamotubular							Risco	
Seção: Geração de Vapor na Caldeira							Severidade	
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas	Frequência	
4A	4	Pressão	Baixa	Consumo de vapor acima do esperado	Diminuição de vapor produzido na caldeira	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste de produção de vapor de acordo com a demanda 2 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031)	3	4
4B	4			Energia térmica gerada pela combustão e fornecida para vaporização da água abaixo da esperada	Diminuição de vapor produzido na caldeira	1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar e de combustível na fornalha 2 - Plano de manutenção preventiva dos equipamentos envolvidos no processo de alimentação de combustível e ar	4	4
4C	4	Pressão	Alta	Consumo de vapor abaixo do esperado	Explosão da caldeira	1 - Treinamento do operador quanto ao ajuste de produção de vapor de acordo com a demanda 2 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha e apaga a chama 3 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 4 - Válvula de segurança da caldeira	4	1

4D	4			Energia térmica gerada pela combustão e fornecida para vaporização da água acima da esperada	Explosão da caldeira	<p>1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar e de combustível na fornalha</p> <p>2 - Plano de manutenção preventiva dos equipamentos envolvidos no processo de alimentação de combustível e ar</p> <p>3 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha e apaga a chama</p> <p>4 - Válvula de segurança da caldeira</p>	4	1	
4E	4	Nível	Baixo	Alimentação de água abaixo da esperada	Sobreaquecimento da caldeira e possibilidade de explosão	<p>1 - Controlador acionado devido ao alarme de baixo nível de água (LSL 1026) ligando a bomba de alimentação</p> <p>2 - Controlador acionado devido ao alarme de nível muito baixo de água (LSLL 1026) desligando o fornecimento de combustível e apagando a chama</p> <p>3 - Plano de manutenção preventiva da bomba e dispositivos de controle envolvidos no processo de alimentação de água</p>	4	1	

4F	4			Energia térmica gerada pela combustão e fornecida para vaporização da água acima da esperada	Sobreaquecimento da caldeira e possibilidade de explosão	<p>1 - Controlador acionado devido ao alarme de baixo nível de água (LSL 1026) ligando a bomba de alimentação</p> <p>2 - Controlador acionado devido ao alarme de nível muito baixo de água (LSLL 1026) desligando o fornecimento de combustível e apagando a chama</p> <p>3 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar e de combustível na fornalha</p> <p>4 - Plano de manutenção preventiva dos equipamentos (bomba de alimentação de combustível, soprador e motor) envolvidos no processo de alimentação de combustível e ar</p>	4	1	
4G	4	Nível	Alto	Alimentação de água acima da esperada	Possibilidade de arraste de água líquida para a saída de vapor	1 - Plano de manutenção preventiva da bomba e dispositivos de controle envolvidos no processo de alimentação de água	3	4	
4H	4			Energia térmica gerada pela combustão e fornecida para vaporização da água abaixo da esperada	Possibilidade de arraste de água líquida para a saída de vapor	<p>1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar e de combustível na fornalha</p> <p>2 - Plano de manutenção preventiva dos equipamentos (bomba de alimentação de combustível, soprador e motor) envolvidos no processo de alimentação de combustível e ar</p>	3	4	

4I	4	Temperatura	Baixa	Baixa vazão de combustível na fornalha	Diminuição da quantidade de vapor produzido	1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de combustível na fornalha 2 - Plano de manutenção preventiva da bomba de alimentação de combustível	3	4	
4J	4			Baixa vazão de ar na fornalha	Diminuição da quantidade de vapor produzido	1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar na fornalha 2 - Plano de manutenção preventiva do soprador e do motor do processo de alimentação de ar	3	4	
4K	4			Apagamento da chama	Diminuição da quantidade de vapor produzido	1 - Alarme de chama apagada (XSL 1012)	3	4	
4L	4	Temperatura	Alta	Alta vazão de combustível e ar na fornalha	Aumento da pressão com risco de explosão devido a maior produção de vapor	1 - Treinamento do operador quanto ao controle manual da entrada de ar e de combustível na fornalha 2 - Plano de manutenção preventiva dos equipamentos (bomba de alimentação de combustível, soprador e motor) envolvidos no processo de alimentação de combustível e ar 3 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha 4 - Válvula de segurança da caldeira	4	1	

Fim da avaliação do Nó 4

V) Formulário HAZOP do Nó de Estudo 5

Nome do Projeto: Trabalho de Conclusão de Curso							Risco		
Processo: Caldeira Flamotubular							Severidade		
Seção: Saída de Vapor da Caldeira							Frequência		
Cenário	Nó	Parâmetro	Palavra-guia	Causas	Consequências	Indicadores/Salvaguardas			
5A	5	Pressão	Alta	Erro do operador no controle manual da válvula de consumo ou descarte	Rompimento da tubulação da saída de vapor	1- Indicador de pressão da linha de saída de vapor (PIT 1032) 2 - Treinamento do operador para abertura da válvula de consumo e descarte de excesso de vapor	3	3	
5B	5			Linha de saída do vapor obstruída	Rompimento da tubulação da saída de vapor	1- Indicador de pressão da linha de saída de vapor (PIT 1032) 2 - Plano de manutenção preventiva e inspeção na linha de saída de vapor	4	3	
5C	5	Pressão	Baixa	Linha de saída de vapor com vazamento	Perda de produto	1- Indicador de pressão da linha de saída de vapor (PIT 1032) 2 - Plano de manutenção preventiva e inspeção na linha de saída	4	3	
5D	5	Vazão	Alta	Consumo de vapor acima do esperado	Redução da quantidade de vapor na caldeira, diminuindo a pressão da mesma	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Treinamento do operador quanto ao ajuste de produção de vapor de acordo com a demanda	3	4	

5E	5			Erro do operador no controle manual da válvula de consumo ou descarte	Redução da quantidade de vapor na caldeira, diminuindo a pressão da mesma	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Treinamento do operador para abertura da válvula de consumo e descarte de excesso de vapor	3	4	
5F	5	Vazão	Baixa	Consumo de vapor abaixo do esperado	Aumento da quantidade de vapor na caldeira, aumentando a pressão da mesma e podendo causar explosão	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha e apaga a chama 3 - Treinamento do operador quanto ao ajuste de produção de vapor de acordo com a demanda 4 - Válvula de segurança da caldeira	5	1	
5G	5			Erro do operador no controle manual da válvula de consumo ou descarte	Aumento da quantidade de vapor na caldeira, aumentando a pressão da mesma e podendo causar explosão	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Treinamento do operador para abertura da válvula de consumo e descarte de excesso de vapor 3 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha e apaga a chama 4 - Válvula de segurança da caldeira	5	1	

5H	5	Vazão	Nula	Válvula de consumo e de descarte de vapor fechada	Aumento da quantidade de vapor na caldeira, aumentando a pressão da mesma e podendo causar explosão	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Treinamento do operador para abertura da válvula de consumo e descarte de excesso de vapor 3 - Controlador acionado pelo alarme de aumento de pressão (PSH 1026) que interrompe o fornecimento de combustível a fornalha e apaga a chama 4 - Válvula de segurança da caldeira	5	1	
5I	5			Linha de saída de vapor obstruída	Aumento da quantidade de vapor na caldeira, aumentando a pressão da mesma e podendo causar explosão	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031) 2 - Treinamento do operador para abertura da válvula de consumo e descarte de excesso de vapor 3 - Plano de manutenção preventiva e inspeção na linha de saída de vapor 4 - Válvula de segurança da caldeira	5	1	
5J	5			Não está sendo produzido vapor na caldeira	Sem passagem de vapor pelas linhas de consumo e descarte	1 - Indicador de vazão da linha de saída de vapor (FIT 1031)	3	4	

Fim da avaliação do Nó 5