

PAULO EDUARDO VICENTE DIAS

Análise preliminar de risco de uma planta piloto de fabricação e purificação de hexafluoreto de enxofre.

SÃO PAULO
2016

PAULO EDUARDO VICENTE DIAS

Análise preliminar de risco de uma planta piloto de fabricação e purificação de hexafluoreto de enxofre.

.

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho

SÃO PAULO
2016

Aos meus pais Clóvis e Anélita.

À Marli, Fernanda e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores do PECE pelos ensinamentos, orientação e incentivo dedicados ao meu aperfeiçoamento profissional.

À Direção do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e da Amazônia Azul Tecnologias de Defesa SA, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À CPFL, em especial aos amigos, Enéas e Nathana pela parceria, incentivo e apoio.

Aos amigos do Departamento de Operação da USEXA do CTMSP, Vinícius, Márcio Zorzetto, Gustavo e Gabriel pela amizade, auxílio, solicitude e compartilhamento das ideias.

À ANEEL por abrigar o projeto de desenvolvimento do processo de fabricação e purificação de SF₆, no Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O SF₆ é utilizado em equipamentos elétricos de chaveamento, manobra e proteção de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de média, alta, extra alta e ultra alta tensão, cumprindo as funções principais de isolamento e meio extintor do arco voltaico. Quando purificado é um material inerte e sua condição perigosa diz respeito ao deslocamento do oxigênio e possíveis subprodutos de sua degradação. Porém, quando se trata de sua fabricação, que se dá pela reação do enxofre fundido e o flúor gasoso, a utilização destes produtos perigosos e condições de processo impõe cenários acidentais extremamente significativos. Neste contexto, este trabalho apresenta a análise preliminar de risco de uma planta piloto de fabricação e purificação de hexafluoreto de enxofre, em fase de projeto conceitual, e sugestões de medidas preventivas ou de proteção decorrentes da análise. É importante ressaltar que a tecnologia de fabricação e purificação foi desenvolvida pelo CTMSP, com apoio do grupo CPFL, no âmbito de projetos de inovação da ANEEL, onde se produziu e purificou o SF₆, em escala de bancada.

Palavras-chave: Hexafluoreto de enxofre. Fabricação. Purificação. Análise de risco.

ABSTRACT

SF₆ is used in electrical switching equipment, operation and generation system protection, transmission and distribution of electric energy of medium, high, extra high and ultra high voltage, fulfilling the main functions of isolation and extinguishing arc. When purified is an inert material and hazardous is the displacement of oxygen and contact products of degradation. However, when it comes to manufacture, that is by reaction of the molten sulfur and fluorine gas, the use of hazardous materials and process conditions impose significant accident scenarios. In this context, this work presents the preliminary risk analysis of a manufacturing pilot plant and purification of sulfur hexafluoride in conceptual design phase, and suggestions for preventive measures or protection resulting from the analysis. Importantly, the manufacturing and purification technology was developed by CTMSP, supported by the CPFL group, in the context of innovation projects by ANEEL, which was produced and purified SF₆, bench scale.

Keywords: Sulfur hexafluoride. Manufacturing. Purification. Risk analysis.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	5
1. INTRODUÇÃO	7
1.1.OBJETIVO	8
1.2.JUSTIFICATIVA.....	9
2. REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1.HEXAFLUORETO DE ENXOFRE – SF ₆	11
2.1.1. Propriedades físico-químicas do SF₆.....	14
2.2.TÉCNICAS PARA O PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE RISCOS	16
2.2.1. Técnicas de avaliação de risco – fase projeto conceitual.....	21
2.2.1.1. Listas de verificação de perigos (<i>Checklist</i>)	21
2.2.1.2. Classificação relativa (<i>Relative ranking</i>).....	23
2.2.1.3. Análise preliminar de risco (APR) ou de perigo (APP)	24
2.2.1.4. E – Se? (<i>What-if</i>).....	27
2.3.DOCUMENTOS E EQUIPE NECESSÁRIOS PARA O PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE RISCOS - PROCESSO QUÍMICO	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4. RESULTADOS.....	35
4.1.CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA PILOTO	35
4.2.DEFINIÇÃO DA EQUIPE E FUNÇÕES	38
4.3.IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES PERIGOSAS	38
4.4.DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS ACIDENTAIS.	42

4.5. ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO - APR.	44
6. CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXO I – RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA E MANUSEIO DO ENXOFRE	53
APÊNDICE A – PLANILHAS APR DA PLANTA DE SF6 – PROJETO CONCEITUAL.....	55

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, seja por imposição legal do processo de licenciamento, relações trabalhistas ou por pressão de clientes, acionistas ou da sociedade, é inimaginável que as organizações não procurem identificar, medir, analisar e tratar os riscos de suas instalações ou de seus produtos, ao longo de todo o ciclo de vida¹. Pois, se trata de uma das boas práticas de sustentabilidade e fator contribuinte para a sobrevivência do negócio.

Para tal, o apoio de um sistema de gestão de riscos como a NBR ISO 3100 (2009) é fundamental. Assim, o processo de avaliação de riscos (identificar, medir e analisar os riscos), eixo central da gestão de riscos (USP, 2015), fornece as informações e dados necessários para a tomada de decisão da organização quanto: conveniência de realizar uma atividade; maximizar as oportunidades de melhoria; escolher entre opções de processo aquele de menor risco; priorizar e definir as estratégias de tratamento dos riscos.

As ações para o tratamento dos riscos estão associadas às medidas de prevenção e de mitigação. Uma vez que o risco pode ser definido como uma função da probabilidade do evento acontecer e de sua consequência, as medidas de prevenção agem no sentido de reduzir a chance (probabilidade) do evento acontecer. A segunda medida representa as ações necessárias para diminuição das consequências do evento, ditas ações de proteção (USP, 2015).

Diante desta realidade, e fazendo um recorte das práticas sustentáveis adotadas no âmbito da Engenharia de Segurança, destaca-se a elaboração de projetos dos meios de produção mais ou intrinsecamente seguros. Por contribuir significativamente a sustentabilidade da organização já que a detecção precoce das condições perigosas e avaliação dos riscos permite alterar ou adequar o projeto, a fim de implantar solu-

¹ Tempo considerado desde a geração da ideia do projeto até a sua entrada em operação e por fim seu descomissionamento.

ções de segurança de maior efetividade e a um custo menor, quando comparado a outras fases do empreendimento (Manuele, 2013).

A etapa de identificação do risco (indicação da condição perigosa) é talvez a mais importante, porque um perigo não identificado não será considerado no processo de tomada de decisão sobre o empreendimento. Daí a importância da utilização de técnicas estruturadas e consagradas, como as relacionadas pela ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012.

É nesse ambiente que este estudo de caso se desenvolve, especificamente na aplicação do processo de avaliação de risco de uma fábrica piloto de produção e purificação do hexafluoreto de enxofre – SF_6 , em fase de projeto conceitual. Cujas base tecnológica foi desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSP e Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL, no âmbito de projetos de inovação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

1.1.OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver a análise de risco de uma planta piloto de fabricação e purificação de SF_6 , cujo projeto está na fase conceitual. A fim de que sejam estabelecidos critérios: para tomada de decisão sobre a aceitabilidade dos riscos e direcionadores para a continuidade do projeto, sob o ponto de vista da segurança.

Para o alcance do objetivo principal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e selecionar com base na literatura, as técnicas adequadas para a realização da análise de risco, de um empreendimento na fase de projeto conceitual.
- Em função das técnicas selecionadas, determinar e prover o conjunto de necessidades e informações aplicadas a análise de risco propriamente dita.

- Propor e avaliar ações preventivas e de proteção, visando à redução ou controle dos riscos a níveis aceitáveis as instituições.

1.2.JUSTIFICATIVA

O gás de SF₆ é um composto químico de grande relevância para o setor elétrico sem substitutos para determinadas aplicações, cuja demanda nacional é atendida por importação. Esse caráter estratégico motivou o desenvolvimento de sua fabricação e purificação em escala de bancada, como já mencionado anteriormente. Agora, já com a tecnologia desenvolvida, é intenção das instituições projetar e construir uma unidade piloto, obedecendo as seguintes premissas básicas:

a- deverá atender a demanda do grupo CPFL, tanto na fabricação de SF₆ novo, como na repurificação de gás degradado.

b- deverá ser construída no *site* do CTMSP, especificamente, na Unidade de Piloto de Hexafluoreto de Urânio – USEXA, a fim da utilização da infraestrutura existente, principalmente, do flúor gasoso que é a principal matéria-prima da fabricação do SF₆.

Sendo o processo de fabricação e purificação do SF₆ compreendido por sucessivas etapas de operações físico-químicas, onde se utilizam produtos químicos de periculosidade acentuada e condições cíclicas de pressão e temperaturas significativas, associado ao acréscimo de inventários, se faz necessário responder as seguintes perguntas (ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012) quanto ao seu risco:

- O que pode acontecer de errado e por quê?
- Quais seriam as consequências?
- Qual seria a probabilidade de sua ocorrência?

- Existem fatores que mitigam a consequência do risco ou que reduzam a sua probabilidade?
- O nível de risco é tolerável ou aceitável e requer tratamento adicional?

Assim, espera-se que os resultados da análise de risco do presente estudo de caso conduzam a tomada de decisão para o incremento da segurança da futura planta piloto, contribuindo para a sustentabilidade do empreendimento.

Adicionalmente, este trabalho também se justifica, pela possibilidade dos resultados obtidos serem utilizados como ponto de partida para a elaboração dos documentos de licenciamento², desta nova unidade industrial.

² O processo de licenciamento desta unidade é regido pelo IBAMA e CNEN, uma vez que haverá compartilhamento de estruturas fabris entre a unidade do SF₆ e outra (já instalada) pertencente ao ciclo do combustível nuclear.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. HEXAFLUORETO DE ENXOFRE – SF₆

O hexafluoreto de enxofre - SF₆ é um gás sintético que cumpri as funções principais de isolante e meio extintor do arco voltaico em equipamentos de chaveamento, manobra e proteção de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de média, alta, extra alta e ultra alta tensão.

Adicionalmente, independente da classe de tensão do sistema elétrico, o SF₆ viabiliza a construção e a operação de subestações blindadas compactas e/ou subterrâneas. Portanto, considerando as crescentes restrições na ocupação dos espaços disponíveis para as ampliações dos sistemas elétricos, em função do crescimento populacional e da competição pelo uso do solo nas atividades socioeconômicas, mormente em zonas urbanas, bem como pelo aumento na exigência de melhoria na continuidade e qualidade dos serviços de fornecimento de eletricidade, o SF₆ se revela como um componente estratégico para o setor elétrico (ABB, 2010).

Para ilustração do exposto anteriormente, as Figuras de 1 a 4 mostram algumas das aplicações do SF₆, no setor elétrico. Outro exemplo de sua relevância para o setor é o valor movimentado anualmente no mercado europeu superior a 3,5 bilhões de euros, com a venda de equipamentos a SF₆ (Olivier e Bakker, 2000). Por último, registra-se que a demanda nacional do gás é totalmente atendida por importação.

Figura 1-Subestação Blindada a SF₆



Fonte: Catálogo técnico Mitsubishi Electric

Figura 2- Comparação da área ocupada da subestação Itaim - Eletropaulo da cidade de São Paulo - antiga (área amarela) e a SF₆ (área vermelha)



Fonte: PCH Rio Branco (Grupo Cassol Energia, 2015)

Figura 3- Manobra de chaveamento na subestação a SF₆; Grajaú - RJ (primeira instalação do Brasil).



Fonte: Furnas (2005)

Figura 4- Estação de comutação da Usina de Itaipu, com mais de 100 toneladas de SF₆.



Fonte: ABB, 2010

O SF₆ também encontra espaço em outros segmentos industriais, desde aplicações pouco convencionais, tais como propelente para torpedos e equipamentos de comunicação de mergulhadores. Como também nos segmentos de alta tecnologia, sendo exemplos.

- Metalurgia: Utilizado como atmosfera protetora em fornos de fusão de ligas de magnésio, a fim de prevenir a vaporização, ignição e oxidação do metal. Também é utilizado na desgaseificação das ligas de alumínio fundido, a fim de retirar o hidrogênio.
- Semicondutores: O gás é utilizado na forma de plasma tanto para gravação dos “wafers” de silício como na limpeza das câmeras de deposição do tipo CVD (*Chemical Vapour Deposition*). Também é aplicado na preparação de células fotovoltaicas de alto desempenho.
- Painéis LCD: Utilizado na limpeza de substâncias depositadas na superfície do LCD (Liquid Crystal Display), durante o processo de litografia.
- Medicina: Na medicina é utilizado como composto para aumento de contraste em ultra-sons, cirurgias oftalmológicas e tratamento de perda da audição por infecção no ouvido médio.
- Gás traçador: O SF₆, por ser facilmente detectável por equipamentos simples (detectores de halogênios), é utilizado na determinação de vazamentos de equipamentos e tubulações, assim como na determinação do tempo de residência em reatores químicos e estudos meteorológicos.
- Outros equipamentos de alta tensão: O SF₆ é utilizado como gás isolante de geradores de alta tensão, aplicados em aceleradores de partículas. Também é utilizado nos estabilizadores de tensão de microscópios eletrônicos; equipamentos de raios-x; fabricação de radares (AWACS); transformadores e capacitores especiais.

2.1.1. Propriedades físico-químicas do SF₆

Suas vantagens de utilização, em relação aos outros meios tecnológicos, dizem respeito à combinação de suas propriedades físico-químicas e dielétricas, apresentadas resumidamente na figura 5.

Figura 5 - Propriedades físicas do SF₆

Temperatura de sublimação	°C	-63,9
Calor de sublimação	kJ/mol	23,59
Ponto triplo	°C	50,52
Pressão no ponto triplo	kPa	225,31
Temperatura crítica	°C	45,55
Pressão crítica	kPa	3,759
Densidade crítica	g/cm ³	0,737
Densidade (líquido)	g/cm ³	2,863
Densidade (gás)	g/cm ³	6,09.10 ⁻³
Pressão de vapor saturado	MPa	2,36
Calor de formação	kJ/mol	-1221,66
Calor de vaporização	kJ/mol	9,6419

Fonte: SOLVAY Special Chemicals

Do ponto de vista biológico e químico, o SF₆ quando novo (purificado) não é considerado tóxico, corrosivo ou inflamável. Além disso, apresenta elevada constante dielétrica, estabilidade térmica (até 500°C), coeficiente de transferência de calor elevado e a propriedade de se autoregenerar, quando exposto a um arco elétrico.

Entretanto, inerente ao seu uso uma parcela do gás pode se decompor³, gerando subprodutos sólidos (reação com os metais do interno do equipamento) e gasosos (reação com umidade, oxigênio, hidrocarbonetos e outros contaminantes do sistema), que são extremamente tóxicos e corrosivos.

³ A decomposição e quantidade de subprodutos é função da intensidade e tempo de duração do arco elétrico e presença de contaminantes.

Para ilustração, a figura 6 apresenta os subprodutos formados, a concentração típica encontrada em gases degradados, determinados por experimentos realizados por Dervos e Vassiliou (2000). Na mesma figura também são apresentados os limites de tolerância ocupacional (*TLVs*), sugeridos pela ACGIH (2013).

Figura 6 - Subprodutos, concentração típica e limites de tolerância ocupacionais dos subprodutos da degradação do SF₆

Subproduto	Concentração Típica (ppm)	Limite de tolerância ocupacional (ppm)
Fluoreto de hidrogênio (7664-39-3)	1,0	0,5 (TWA) 2 (STEL)
Tetrafluoreto de enxofre (7783-60-0)	0,5	0,01 (STEL)
Pentafluoreto de enxofre (5714-22-7)	0,025	0,01 (STEL)
Fluoreto de sulfurila (2699-79-8)	0,006	5 (TWA) 10 (STEL)
Dióxido de enxofre (7446-09-5)	0,002	0,25 (STEL)
Fluoretos metálicos	-----	2,5 g/cm3
Fluoreto de cobre	-----	1,0 g/cm3

Fonte: Adaptação da EPA (2002)

Outra questão determinante de seu manuseio seguro é que ele é um dos gases de efeito estufa, tendo um potencial de aquecimento global de 23.900 vezes ao dióxido de carbono.

Diante este fato, muitos países e empresas estabeleceram programas de reciclagem e controle do gás. A reciclagem do gás degradado envolve processos de repurificação que podem ser extremamente simples ou mais elaborados, dependendo do grau de contaminação do gás.

Os processos simples são realizados *in loco*, em equipamentos portáteis compostos por um filtro para retenção de sólidos, leitos de alumina ou peneiras moleculares para retenção de umidade e alguns produtos de degradação de caráter ácido, bomba de vácuo, compressor e reservatório para acúmulo do gás repurificado. Na realida-

de, estes sistemas são mais utilizados como “sistema de recolhimento do gás”, quando das atividades de manutenção do que, realmente, como sistema de repurificação.

Para níveis de impurezas mais elevados, a repurificação só é realizada pelos fabricantes do gás ou em empresas especializadas, pois a infraestrutura de repurificação é compatível ou é a mesma utilizada na produção de gás novo. A literatura (Damsky, 2000) indica que o custo de um gás recuperado representa de 35 a 65% do valor do gás novo, dependendo do grau de impurezas do gás a ser recuperado.

No Brasil é comum o emprego dos sistemas portáteis pelos usuários ou prestadores de serviço, como descrito anteriormente. Essa limitação faz com que as empresas mantenham armazenados inventários significativos de gás contaminado, sem a perspectiva de reciclagem ou destinação final.

A destinação final ou disposição segura do SF_6 é realizada pelas empresas produtoras do gás. Neste caso, o gás é injetado concomitantemente com hidrogênio, em fornos a temperaturas próximas de 1200°C . Os produtos obtidos na destruição são o dióxido de enxofre (SO_2) e fluoreto de hidrogênio (HF), que são abatidos em coluna de lavagem de gases, com uma solução de hidróxido de cálcio - CaOH (Bessede, L etc. al., 2015).

É interessante ressaltar que as ações de boas práticas da manipulação e recolhimento do SF_6 foram impulsionadas a partir do Protocolo de Quioto, devido à questão ambiental. Pois, até então, a prática era esvaziar os equipamentos direto para atmosfera.

2.2. TÉCNICAS PARA O PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE RISCOS

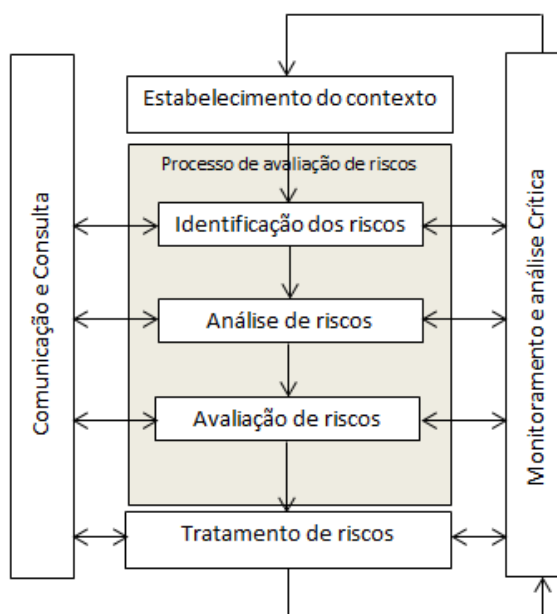
Os termos empregados neste trabalho seguem as definições da norma brasileira ISO Guia 73 (2009). Entretanto, é importante ressaltar que USP (2014) e Lapa e Goes (2011) esclarecem que alguns destes termos, por deficiência na tradução,

causam confusão e duplicidade de entendimento. Assim neste trabalho, onde se lê “determinação de riscos ou perigo” deve-se entender “determinação de condição perigosa”.

De forma geral, o processo de avaliação de riscos consiste no exame sistemático realizado em qualquer fase do ciclo de vida de um empreendimento, ou atividade ou sistema, com a finalidade de identificar (condições perigosas), hierarquizar e controlar os riscos, sendo este o eixo central da gestão de riscos (USP, 2015), conforme diretrizes apresentadas pela NBR ISO 3100 (2009) – vide figura 7.

Seu objetivo primordial é fornecer dados para a tomada de decisão da organização quanto: conveniência de realizar uma atividade; maximizar as oportunidades de melhoria; escolher opções com diferentes riscos; priorizar e definir as estratégias para tratamento de riscos.

Figura 7 - Processo de gestão de riscos



Fonte: NBR ISO 3100 (2009)

A etapa de identificação de riscos (condições perigosas) é o processo da busca, reconhecimento e descrição de riscos. Envolve a identificação das fontes de risco, dos eventos iniciadores, das causas e consequências potenciais.

O resultado desta etapa é uma lista ampla e detalhada dos riscos, que recebe diferentes nomes conforme a área ou ferramenta, tais como lista, registro, planilha cadastro, inventário, mapa de riscos, dentre outras (USP, 2015).

Na fase de análise de riscos procura-se compreender a natureza e a determinação do nível de risco, considerando-se os controles existentes, suas falhas e eficácia dos mesmos. O nível de risco é o produto da probabilidade ou frequência de um dado evento acontecer multiplicado pela sua gravidade ou consequência. De forma mais ampla, Eston, Iramina e Martins (2015) afirmam que o risco é uma função da probabilidade, da consequência, do cenário do evento e do intervalo de tempo considerado.

Em síntese, na análise de riscos deve-se responder às seguintes questões (USP, 2015).

- o que pode acontecer de errado?
- quais as chances disso ocorrer?
- quais as consequências e sua gravidade?

Ainda segundo ABNT NBR ISO 31000 (2009), a análise de riscos pode ser simples ou complexa, dependendo do valor do risco, da finalidade, das informações e recursos disponíveis. E que as análises podem ser qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas, ou uma combinação destas.

Na etapa de avaliação de riscos, os resultados da etapa anterior - análise de riscos - são comparados com critérios de riscos estabelecidos anteriormente⁴. O resultado desta avaliação pode: definir a aceitabilidade ou não do risco; auxiliar na decisão e

⁴ Os critérios de riscos são definidos, conforme o contexto da análise. Normalmente, os critérios são baseados em especificações técnicas, informações setoriais, requisitos legais, capacidade de assumir riscos, dentre outras fontes.

priorização dos riscos a serem tratados, ou mesmo, justificar a realização de uma análise de risco mais detalhada.

Como mencionado anteriormente, o processo de avaliação de riscos é uma ação sistemática, conseqüentemente depreende-se a utilização de técnicas e ferramentas estruturadas. Segundo USP (2014), muitas das técnicas e ferramentas surgiram da necessidade da indústria bélica, aeroespacial e nuclear, em reduzir preventivamente a ocorrência de acidentes catastróficos.

Essa abordagem e o emprego das técnicas configuraram, ao longo tempo, a disciplina Engenharia de Segurança de Sistemas. São exemplos deste movimento: a APR (Análise Preliminar de Riscos) desenvolvida e tornada obrigatória, após os acidentes com o sistema dos mísseis *Atlas* e as árvores de falhas pelos riscos de lançamento não autorizado dos mísseis *Minuteman*.

Outras técnicas ou ferramentas foram desenvolvidas na indústria de processo químicos e petroquímicas ou como respostas a acidentes significativos, tais como os acidentes de Flixborough, Seveso e Bhopal. São exemplos das técnicas desenvolvidas: o HAZOP (Estudo de riscos e operabilidade) e o What If (Técnica e Se?).

Apenas para ilustração da quantidade de técnicas de determinação de perigos, análise e avaliação de riscos existentes, TIXIE (2002) lista sessenta e duas (62) ferramentas ou técnicas. Destas, trinta e uma (31) técnicas ou ferramentas também são mencionadas pela ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012, as quais foram obtidas por consenso de especialistas.

Outra importante referência é a *American Institute of Chemical Engineers* – AICHE (1992), que detalha e exemplifica aplicação das técnicas de avaliação de riscos na indústria química, em função da fase do ciclo de vida ou atividade - vide resumo na figura 8.

Em todas as literaturas supracitadas são apresentados guias de como selecioná-las adequadamente, em função do contexto da gestão de riscos, do seu objetivo, da disponibilidade de informações, dos requisitos regulatórios, tempo esperado de execução da análise, fase do ciclo de vida, dentre outros parâmetros.

Quanto à qualidade dos resultados da aplicação das técnicas, USP (2015) afirma ser dependente fundamentalmente de quatro fatores:

- a) Precisão dos documentos e dados utilizados como base para o estudo;
- b) Competências e conhecimento da equipe;
- c) Capacidade da equipe em utilizar a técnica; e
- d) Capacidade da equipe em manter um senso de proporção, particularmente na avaliação da seriedade dos perigos identificados.

Figura 8 – Técnicas de avaliação de risco em função da fase ou atividade do processo

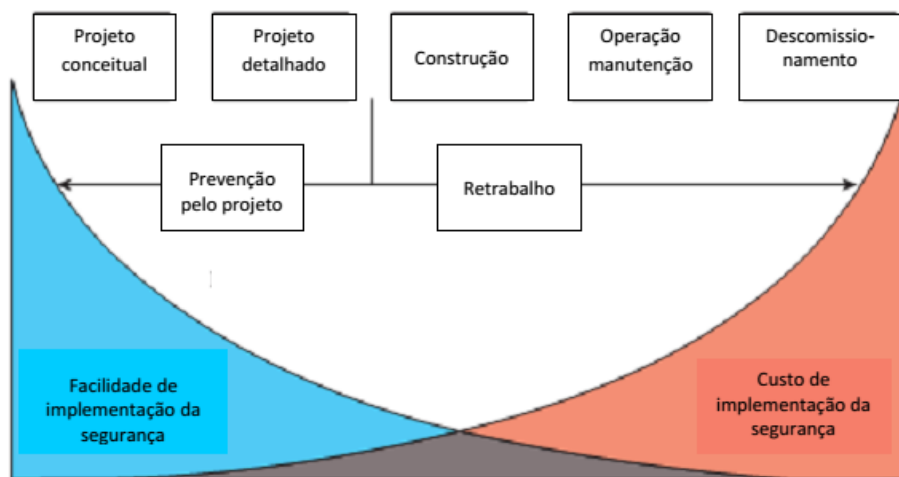
Fase/Atividade \ Ferramenta	RS	LV	CR	APR	E-SE	E/SE LV	Hazop	FMEA	AAF	AAE	ACC	ACH
P&D			X	X	X							
Projeto Conceitual		X	X	X	X	X						
Planta piloto		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Projeto detalhado		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Construção/partida	X	X			X	X						X
Operação	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Expansão e Modificações	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Investigação de incidentes/falhas					X		X	X	X	X	X	X
Descomissionamento	X	X			X	X						

Fonte: Autor (adaptado de AICHE, 1992)

Legenda: RS- Revisão de segurança; LV- Lista de Verificação; CR – Classificação Relativa; APR ou APP- Análise Preliminar de Risco (Perigo); E-SE – What –If; E-SE/LV – What-If com Lista de verificação; Hazop - Estudo de Perigos e Operabilidade; FMEA – Análise de Modos de Falha e Efeitos; AAF - Análise de Árvore de Falhas; AAE - Análise de Árvore de Eventos; ACC- Análise de causa e consequência; ACH – Análise de confiabilidade Humana.

É importante ressaltar que realização da análise de risco desde o início do empreendimento, permite a detecção precoce das condições perigosas. Consequentemente, correções ou alterações do projeto, visando à segurança apresentam maior efetividade e menor custo. Este conceito é ilustrado na figura 9, adaptada de Manuele (2013).

Figura 9 – Custo e efetividade de implantação da segurança, em função do ciclo de vida



Fonte: Autor (adaptado de Manuele, 2013)

2.2.1. Técnicas de avaliação de risco – fase projeto conceitual

Considerando-se que o objeto deste estudo é uma planta química piloto, em fase de projeto conceitual. Portanto, na fase inicial de seu ciclo de vida, o próximo item descreve as técnicas de avaliação de risco, que segundo a AICHE (1992), são mais adequadas para essa fase do projeto.

2.2.1.1. Listas de verificação de perigos (*Checklist*)

As listas de verificação podem ser empregadas, em todo ciclo de vida de um empreendimento ou produto. Inclusive nas atividades de modificação de instalações ou equipamentos. Sua utilidade é de (re) lembrar os revisores ou operadores dos possíveis problemas de segurança a serem verificados, antes da execução de uma tarefa. AICHE (1992) recomenda, a fim de melhor resultado, que a elaboração da lista propriamente dita seja realizada por equipe de pessoas experientes, apoiadas em normas internas e externas, códigos e boas práticas de engenharia, legislação,

acordos comerciais, dentre outras referências oficiais. Para exemplificação, as figuras 10 e 11 apresentam uma lista de verificação aplicada ao levantamento de dados sobre o comportamento de substâncias químicas e outra aplicada na verificação de projetos intrinsecamente seguros, baseadas nas publicações de Crowl e Louvar (2002) e Kletz e Amyotte. P (2010).

Figura 10- Exemplo de lista de verificação do comportamento de substâncias químicas.

Questões	Sim	Não	N.A
Alguma substância é suscetível a decomposição			
Alguma substância é instável termicamente			
Alguma substância é explosiva			
Alguma substância é inflamável?			
Alguma substância é pirofórica?			
Alguma substância pode polimerizar?			
Alguma substância é oxidante?			
Alguma substância é redutora?			
Alguma substância é tóxica?			
Alguma substância reage com água?			

Fonte: Adaptado de Crowl e Louvar, 2002

Figura 11- Exemplo de lista de verificação para elaboração de projetos de planta químicas intrinsecamente seguras.

Questões	Sim	Não	N.A
Existem alternativas de substituição por materiais menos agressivos?			
Foi minimizado o armazenamento gases, líquidos e sólidos perigosos?			
É possível a entrega <i>just-in-time</i> destas substâncias?			
Os materiais perigosos são descartados, quando não mais necessários? Enquanto tempo?			
Pode-se eliminar ou reduzir os produtos intermediários do processo?			
Pode-se reduzir as temperaturas e pressões do processo?			
A localização da tancagem está em distância segura?			
As conexões das tubulações foram minimizadas?			

Fonte: Adaptado de Kletz e Amyotte, 2010

2.2.1.2. Classificação relativa (*Relative ranking*)

Nesta técnica, o analista ou equipe atribui notas a um conjunto de aspectos e características do empreendimento, de forma estruturada. A somatória dos pontos estabelece a classificação relativa entre áreas de processo, plantas ou alternativas de projeto, auxiliando na tomada de decisão.

Segundo AICHE (1992), normalmente, se utiliza os seguintes aspectos e características na elaboração do índice, a saber:

- ✓ As propriedades físico-químicas dos produtos químicos (por exemplo, estado físico, a pressão de vapor, densidade, viscosidade, toxicidade, limites de inflamabilidade, ponto de fulgor, de ignição e reatividade).
- ✓ As condições de processo (por exemplo, temperatura, pressão, quantidades de materiais, concentrações relativas dos materiais e ambiente do processo).
- ✓ As características de processo e sistemas de apoio (por exemplo, processo contínuo ou em bateladas, tipo de reação, operações de purga, ventilação, utilidades, refrigeração, aquecimento, armazenamento pressurizado).
- ✓ O projeto do sistema e construção da unidade ou sistema (por exemplo, construção a prova de fogo, à prova de explosão, *layout* de equipamentos e espaçamento entre eles, resistência à corrosão / erosão, aplicação de redundância).
- ✓ Atividades operacionais (por exemplo, treinamento e experiência de operadores, existência de procedimentos escritos, margem operacional, tipo de turno e políticas operacionais).

- ✓ Atividades de gestão de segurança de processos (por exemplo, intervalos de inspeção e ensaios, planos e políticas de manutenção, programas de avaliação de risco e gerenciamento de políticas de mudança).
- ✓ Possibilidades de exposição (por exemplo, o tempo de funcionamento e a periodicidade, número de atividades do operador, número de equipamentos).

Um bom exemplo da aplicação desta metodologia é a norma técnica Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB P4.261 (2011) em sua parte I, que contempla o roteiro para tomada de decisão quanto à necessidade de apresentação de Estudo de Análise de Risco (EAR) ou de Programa de Gerenciamento de Risco (PGR), embasado na periculosidade, quantidade da substância e na vulnerabilidade do entorno do empreendimento. Outros exemplos, desenvolvidos pela *Dow Chemical Company* são o *Fire and Explosion Index Guide* - F&EI e *Chemical Exposure Index Guide* - CEI (Chinaqui, 2012).

2.2.1.3. Análise preliminar de risco (APR) ou Análise preliminar de perigo (APP)

A APR ou APP é uma técnica estruturada, com origem nos programas de Segurança Militares do Departamento de Defesa dos EUA. Normalmente, a técnica é utilizada na fase inicial do projeto, embora bastante aplicada em unidades em operação, permitindo uma análise crítica dos sistemas de segurança existentes e a identificação das possíveis hipóteses de acidentes, segundo USP (2015).

Na APR se identificam os riscos (condições perigosas), as causas e efeitos ou consequências, seguido de classificação de severidade e recomendações de medidas de prevenção e/ou mitigação, a fim de redução das probabilidades e da consequência da ocorrência do evento.

Esse conjunto de informações é registrado em planilhas, como exemplificado na figura 12.

Figura 12- Modelo de planilha para elaboração e registro da APR

Sistema				Data	Rev.
Risco	Causa	Efeito	Severidade	Medidas preventivas/mitigadoras	Cenário

Fonte: CETESB, 2011

Quanto à classificação de severidade, por ser ela o instrumento de avaliação e tomada de decisão sobre a aceitabilidade ou não ou priorização de tratamento ou quais riscos necessitam de análise complementar. É recomendável que cada organização elabore a sua escala, considerando histórico de acidentes, normas, banco de dados, compromissos comerciais e outras fontes de informações, segundo CETESB (2011). Para exemplificação, a figura 13 mostra a classificação de severidade sugerida pela CETESB (2011).

Figura 13 - Tabela de severidade, utilizada na avaliação do risco

Categoria de severidade	Efeitos
I – Desprezível	Nenhum dano ou dano não mensurável.
II – Marginal	Danos irrelevantes ao meio ambiente e à comunidade externa.
III – Crítica	Possíveis danos ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação.
IV - Catastrófica	Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações. Provoca mortes ou lesões graves na população externa ou impactos ao meio ambiente com tempo de recuperação elevado.

Fonte: CETESB, 2011

É importante ressaltar que, conforme objetivo ou necessidade da organização pode-se adicionar colunas na planilha da APR completando as informações. Uma destas opções são as planilhas modificadas que consideram a probabilidade ou frequência do evento, além das informações básicas e de severidade.

Desta forma, alega USP (2015), a avaliação dos riscos fica menos subjetiva e mais uniforme, devido o estabelecimento de uma matriz de riscos. A matriz de riscos é o resultado da quantificação do risco – produto da probabilidade ou frequência multiplicado pelo valor da consequência ou efeito (severidade).

As figuras 14,15 e 16 exemplificam a planilha da APR modificadas, a planilha de probabilidades ou frequência e matriz de risco, respectivamente.

Figura 14 - Exemplo de planilha de APR modificada

Análise Preliminar de Riscos - APR										
Área analisada: <i>Abastecimento</i>			Atividade: <i>Abastecimento de Veículo</i>		Nº APRI: <i>01</i>		Folha: <i>1/1</i>		Áreas envolvidas :	
Responsabilidade: <i>Supervisor</i>			Data da elaboração: <i>1/8/06</i>		Revisado em:					
Equipe: <i>Supervisor, Téc. Segurança, Frentista (José Silva)</i>										
Sub-Atividade	Perigo	Dano	Causa do Perigo/ /Evento/Dano	emerg	g r a v	f r e q	r i s c o	Ação recomendada	Responsável	Prazo
Chegada do veículo	Trânsito de veículos	Pessoais e Materiais	Falta de atenção, excesso de velocidade.		2	2	4	Demarcação de área, sinalização de velocidade	Gerente	30/9/06

Fonte: USP, 2105

Figura 15 - Exemplo de planilha de frequência ou probabilidade.

A- PROVÁVEL - Frequência maior que $1,0 \text{ E-}02/\text{ano}$
B- IMPROVÁVEL - Frequência $< 1,0 \text{ E-}02/\text{ano}$ e $> 1,0 \text{ E-}04/\text{ano}$
C- REMOTA - Frequência $< 1,0 \text{ E-}04/\text{ano}$ e $> 1,0 \text{ E-}06/\text{ano}$
D- EXTREMAMENTE REMOTA - $< 1,0 \text{ E-}06/\text{ano}$

Fonte: CETESB, 2011

Figura 16- Exemplo de matriz de risco

MATRIZ RISCO		Severidade			
		I	II	III	IV
Frequência	E	3	4	5	5
	D	2	3	4	5
	C	1	2	3	4
	B	1	1	2	3
	A	1	1	1	2
Critério de frequência: A= Remota B= Pouco provável C=Ocasional D=Provável E=Frequente		Critério de severidade: I= Desprezível II=Marginal III=Crítica IV=Catastrófica		Critério de risco:	
				1=Desprezível	
				2=Menor	
				3=Moderado	
				4= Sério	
				5=Crítico	

Fonte: FEPAM , 2001

2.2.1.4. E – Se? (*What-if/*)

Neste método, a partir da aplicação do questionamento “o que aconteceria se...” são promovidas discussões sobre os desvios de operação ou condições de sistema, tendo por resultado a relação entre os desvios/condições e os meios previstos para prevenção e proteção. Sua aplicação é adequada para plantas existentes, durante o estágio de desenvolvimento do processo, no comissionamento e no exame de propostas de mudanças nessas plantas.

O procedimento se desenvolve por meios de reuniões específicas, primeiro para elaboração dos questionamentos. Uma segunda reunião dedicada apenas as respostas, que deverão ser completas explorando a totalidade das consequências a segurança e ao meio ambiente, inclusive a disponibilidade da unidade ou do processo analisado. A última reunião é dedicada a finalização do relatório (USP, 2015).

Os registros obtidos são lançados em planilhas - vide figura 17. Também, se for o objetivo, pode-se estimar o risco dos cenários determinados, semelhante à técnica da APR.

Segundo USP (2015), o resultado desta metodologia tem a vantagem de mostrar pontos de vistas novos e diferentes, devido à presença de pessoas com horizontes diversos. Entretanto, alerta que quanto mais experiente a equipe mais consistente serão os resultados.

Figura 17- Exemplo de planilha de registro da técnica “E –Se?”

E se?	Consequência/perigo	Recomendação	Responsável	Prazo para conclusão
A matéria-prima estiver na concentração errada?	Se a concentração de ácido dobrar a reação não poderá ser controlada e resultará em uma rápida liberação de calor.	a) instalar um sistema de bloqueio de emergência; b) analisar previamente a concentração da matéria-prima.		

Fonte CETESB, 2011

2.2.1.1. E – Se? (*What-if/*) com lista de verificação (*checklist*)

A utilização combinada destes dois métodos potencializa as características positivas (a criatividade do E-Se? e o rigor da lista de verificação) e, ao mesmo tempo compensa suas deficiências quando aplicados individualmente (AICHE, 1992).

A dinâmica da análise se inicia pelas reuniões do “E-Se?”, sendo as listas de verificação utilizadas para estimular o debate criativo e/ou para verificação se todos os tipos e fontes de riscos foram analisados.

2.3. DOCUMENTOS E EQUIPE NECESSÁRIOS PARA O PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE RISCOS - PROCESSO QUÍMICO

Os documentos necessários para a realização das etapas do processo de avaliação de riscos, considerando-se uma planta química, são basicamente os dados e informações de caracterização do local (dados demográficos, clima, geologia, topografia, estradas, hidrologia, dentre outros exemplos), das instalações (tipo de construção, materiais, rotas de fuga, *lay-out*, armazenamento, dos sistemas de proteção e emergência, ventilação, códigos e normas empregadas etc.), da tecnologia (diagrama de blocos, fluxogramas de processo e engenharia, balanço de massa e energia, especificações técnicas de equipamentos, tubulações, instrumentos, sistema de controle, manuais de operação, manutenção, etc.) e dos produtos químicos utilizados, intermediários e produzidos (propriedades físicas e químicas, limites de explosividade, toxicidade, estabilidade térmica, efeitos perigosos de mistura acidental, etc.).

Outros documentos ou fontes são as normas, regulamentos de licenciamento, análise histórica de acidentes, banco de dados de taxas de falhas, recomendações de associações de produtores, política e gestão de segurança da organização, segundo CETESB (2011) e USP (2015).

Apesar de intuitivo, não se pode deixar de citar que a disponibilidade e complexidade das informações vão amadurecendo, conforme a evolução das fases do ciclo de vida do empreendimento e da utilização de técnicas mais sofisticadas (AICHE,1992).

Quanto à equipe necessária, a AICHE (1992) afirma ser dependente de vários fatores, incluindo o tipo de processo ou operação analisada, da técnica selecionada, do contexto, objetivo da análise, dentre outros fatores. Da mesma forma, USP (2015) recomenda que para a maior efetividade e abrangência dos resultados da análise deve-se utilizar equipes multidisciplinares. E que a liderança da equipe seja exercida por pessoa com habilidades e conhecimento sobre a técnica, além de competência, autoridade, credibilidade e capacitação, para obtenção das informações necessárias.

AICHE (1992) identifica pelo menos três funções básicas na equipe, a do líder como já mencionado acima. A de um relator cuja função é de registrar e documentar formalmente as discussões e resultados das análises.

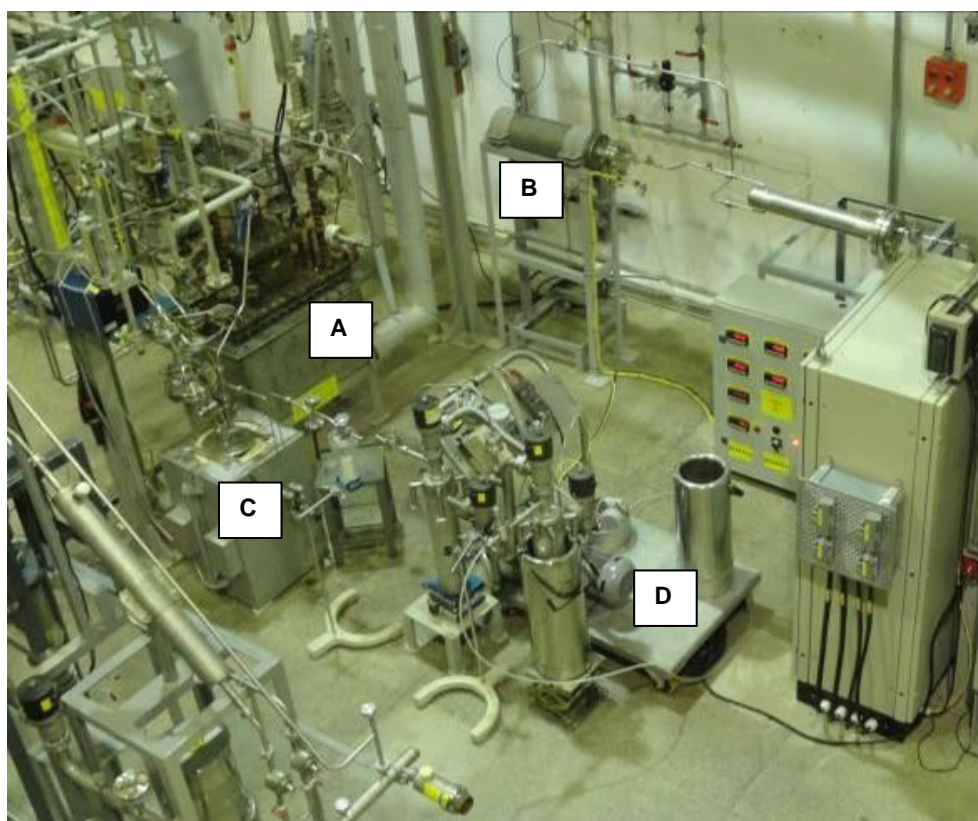
A terceira função é a de peritos, que são escolhidos pelo conhecimento específico sobre algum aspecto do processo em análise, como por exemplo: a química do processo (engenheiro químico), vasos de pressão (engenheiro mecânico), procedimentos operacionais (operadores), a estratégia de controle (engenheiro de automação e controle) ou as práticas de manutenção (manutendores).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como explicitado anteriormente, objetivo deste trabalho é realizar a análise de risco de uma planta química piloto de obtenção e purificação de SF_6 , cuja tecnologia foi desenvolvida em uma unidade experimental de bancada – vide figura 18.

A metodologia selecionada para o cumprimento do objetivo foi a de análise preliminar de risco – APR, por se tratar de uma planta em fase de projeto conceitual, como sugerido na literatura apresentada no capítulo anterior.

Figura 18 - Vista geral da bancada experimental utilizada no desenvolvimento do processo de fabricação e purificação de SF_6 .



Fonte: Arquivo do CTMSP.

Legenda: A- célula de produção de flúor; B- reator de síntese; C- Reator de pirólise e D- Skid do sistema de purificação e retirada de inertes.

Para tal, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

a- Caracterização do empreendimento – tecnologia e *modus operandi* da planta.

b- Definição de equipe multidisciplinar e das funções de cada membro.

c- Identificação das condições perigosas.

d- Determinação dos cenários acidentais.

e- Realização da análise preliminar de risco - APR.

É importante ressaltar que as categorias frequências, consequências e matriz de avaliação ou classificação de risco adotadas neste trabalho são as sugeridas pela FEPAM (2001) - vide figuras 19, 20, 21, por representar os objetivos e experiência da organização proprietária da planta piloto de SF₆.

Figura 19 - Tabela de categorias de frequências.

Categoria	Denominação	Descrição
A	Muito Improvável	<ul style="list-style-type: none"> • Cenários que dependam de falhas múltiplas de sistemas de proteção ou ruptura por falha mecânica de vasos de pressão. Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação.
B	Improvável	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas múltiplas no sistema (humanas e/ou equipamentos) ou rupturas de equipamentos de grande porte. Não esperado de ocorrer durante a vida útil da instalação. Sem registro de ocorrência prévia na instalação.
C	Ocasional	<ul style="list-style-type: none"> • A ocorrência do cenário depende de uma única falha (humana ou equipamento).
D	Provável	<ul style="list-style-type: none"> • Esperada uma ocorrência durante a vida útil do sistema.
E	Frequente	<ul style="list-style-type: none"> • Pelo menos uma ocorrência do cenário já registrada no próprio sistema. Esperando ocorrer várias vezes durante a vida útil da instalação.

Fonte: FAPAM (2001).

Figura 20 - Tabela de categorias de severidade

Categoria	Denominação	Descrição/Características
I	Desprezível	<ul style="list-style-type: none"> Incidentes operacionais que podem causar indisposição ou mal-estar ao pessoal e danos insignificantes ao meio ambiente e equipamentos (facilmente reparáveis e de baixo custo). Sem impactos ambientais.
II	Marginal	<ul style="list-style-type: none"> Com potencial para causar ferimentos ao pessoal, pequenos danos ao meio ambiente ou equipamentos/instrumentos. Redução significativa da produção. Impactos ambientais restritos ao local da instalação, controlável.
III	Crítica	<ul style="list-style-type: none"> Com potencial para causar uma ou algumas vítimas fatais ou grandes danos ao meio ambiente ou às instalações. Exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento em catástrofe.
IV	Catastrófica	<ul style="list-style-type: none"> Com potencial para causar várias vítimas fatais. Danos irreparáveis ou impossíveis (custo/ tempo) às instalações.

Fonte: FAPAM (2001).

Figura 21 – Matriz de avaliação de risco.

Matriz de Risco		Severidade			
		I	II	III	IV
Frequência	E	3	4	5	5
	D	2	3	4	5
	C	1	2	3	4
	B	1	1	2	3
	A	1	1	1	2
Critério de risco	Desprezível 1	Menor 2	Moderado 3	Sério 4	Crítico 5

Fonte: Adaptação de FAPAM (2001).

O valor obtido da matriz de avaliação é utilizado para aceitação ou não do risco e na tomada de decisão e priorização dos riscos a serem tratados. No caso deste trabalho, os riscos classificados como desprezíveis e menores são considerados aceitáveis e devem ser monitorados e acompanhados para manutenção. Porém, o último (riscos menores) são sujeitos a ações de melhoria de implantação oportuna e conforme recursos disponíveis.

A pontuação 3, ou seja, risco moderado também é aceitável, mas demanda atenção especial de controle, monitoração e na implantação de melhorias, a fim de reduzir sua classificação para níveis inferiores.

Já os dois últimos critérios de riscos – sério e crítico, são os riscos inaceitáveis. Aqueles que paralisam a operação ou processo até que as ações e correções estabelecidas demonstrem, por nova análise risco, que o risco foi controlado e reduzido para o campo do aceitável. Portanto, são os primeiros riscos a serem tratados.

Quanto ao modelo de planilha APR para registro dos resultados adotou-se o modelo de planilha modificada como sugerido por USP (2015) – vide figura 22. Nesta planilha, as primeiras linhas do cabeçalho são dedicadas aos campos de indexação e rastreabilidade do trabalho executado: indicam o propósito do estudo, o elaborador e aprovador, a data, o número da revisão e etc.

Figura 22 - Modelo da planilha adotada para APR

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO – APR										Pág	
Área: Fábrica piloto de SF ₆					Atividade: Projeto conceitual					Nº Rev	
										Data	
Equipe		Desenvolvimento de processos								Prox. rev	
										Aprovação	
E	Nº	Evento	Causas	Detecção	Danos	F	S	CR	Recomendações		

Fonte: Autor

Na coluna “E” é registrada a condição perigosa associada a um tipo de energia, resultando no melhor entendimento do problema e comunicação entre os participantes da análise. A coluna “Nº” indica o número do evento em análise, o que facilita a referência a outras planilhas ou trocas de informações.

A coluna “Evento” descreve o evento acidental de forma clara e concisa, ou seja, descreve o que pode acontecer de errado.

Na coluna “Causas” são relacionadas os fatos geradores dos eventos descritos, que geralmente estão associados à ocorrência de falhas, sejam de projeto, de equipamentos ou com a execução de procedimentos errados ou inadequados (falhas ope-

racionais ou humanas) ou eventos naturais (P.x. condições climáticas extremas). A coluna “Detecção” descreve os meios pelos quais os eventos são percebidos.

A coluna “Danos” descreve as possíveis consequências ou efeitos decorrentes do evento acidental analisado.

As colunas “F” e “S” estimam a frequência ou probabilidade do evento acidental ocorrer e a graduação qualitativa dos danos ou efeitos observados (severidade), respectivamente.

A coluna “CR” estabelece o índice ou valor de classificação do risco, permitindo a tomada de decisão e priorização das ações do que fazer com o risco avaliado, se aceita, trata ou controla e etc.

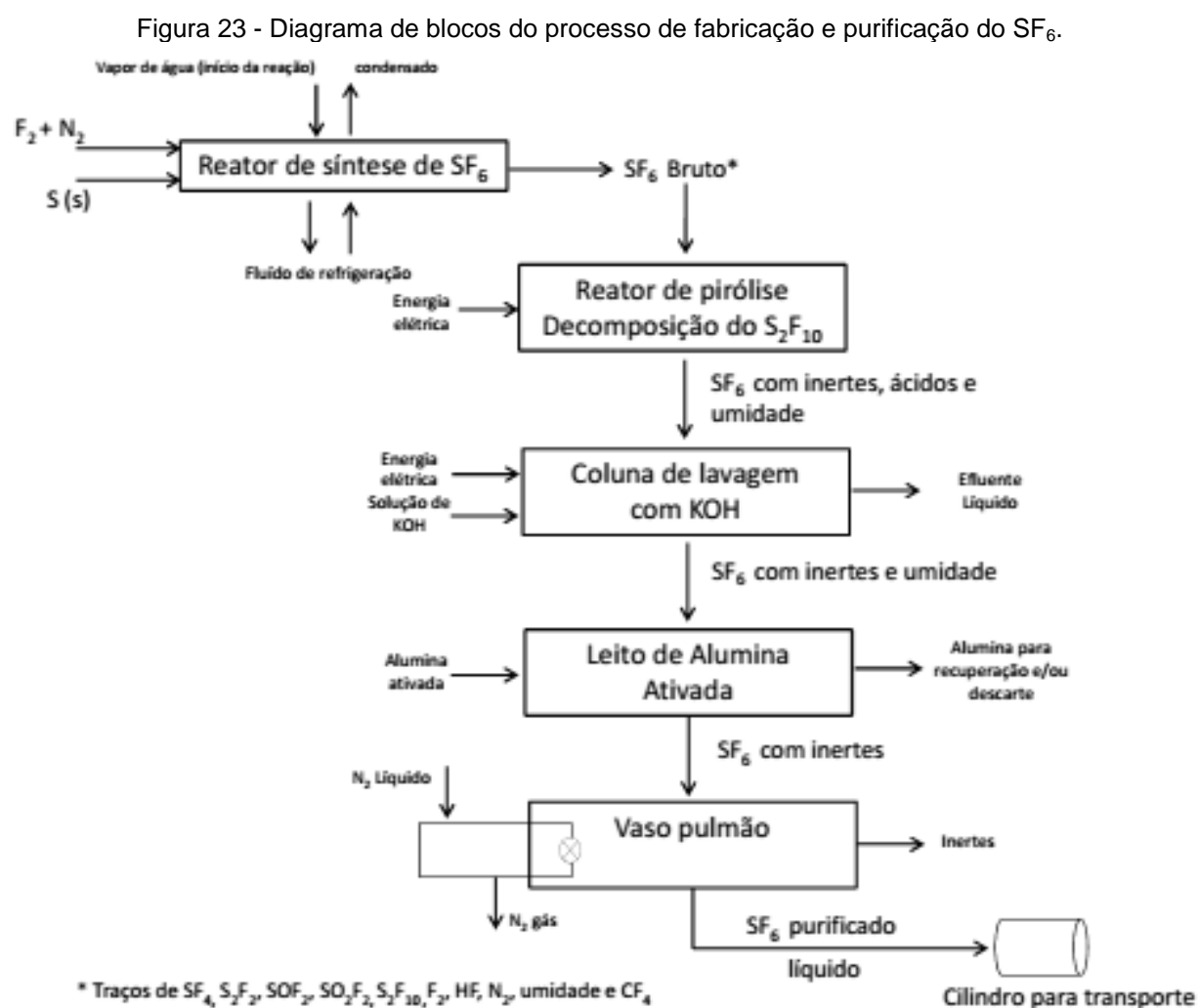
A coluna de “Recomendações” relaciona as ações preventivas e controles necessários à redução dos riscos analisados e direcionadores para execução das demais fases do projeto.

Vale destacar que a fronteira para o desenvolvimento deste trabalho, até mesmo pela limitação de tempo e da fase do ciclo de vida do empreendimento, se restringe aos eventos de vazamento de produtos químicos perigosos, incêndios e explosões, por serem os cenários típicos de uma planta química e com maior potencial de dano. Também como limitante deste estudo não foi considerado as prováveis interações ou efeitos desta nova instalação nas atividades das instalações já em operação no mesmo *site*.

4. RESULTADOS

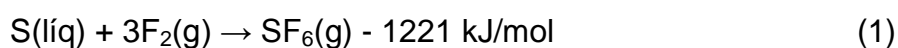
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA PILOTO

A figura 23 apresenta o diagrama de blocos da tecnologia e das etapas de processo da planta piloto.



Fonte: Autor.

A primeira etapa do processo é a obtenção do SF₆, pela reação do flúor (F₂) com o enxofre (S) líquido no reator de síntese, conforme apresentado na equação 1.



Por ser reação exotérmica, a retirada de calor em excesso é realizada pela recirculação de água de resfriamento pela camisa do reator, mantendo a temperatura da reação na região ótima de síntese. Assim, evita-se a evaporação acentuada do enxofre e/ou favorecimento de formação de produtos químicos secundários (Massone et al, 1977).

A evaporação do enxofre é indesejada, devido sua cristalização em regiões frias do sistema, que poderá causar obstruções ou entupimentos, consequentemente, a parada do processo ou situações de risco operacionais. Já a geração acentuada de produtos secundários sobrecarrega os sistemas de purificação, aumentando a geração de efluentes tóxicos e corrosivos.

Resumidamente, a sequência de operação deste sistema é a seguinte:

- a- O enxofre proveniente de um silo com capacidade de 50 kg, o qual é carregado manualmente de tempos em tempos, alimenta por gravidade a câmara de fusão do reator de síntese, a qual é aquecida com vapor de água. O enxofre líquido, próximo de 120 °C, escoar para a câmara de reação do reator aonde se injeta flúor sobre a superfície do enxofre fundido.
- b- O flúor é produzido pela eletrólise do ácido fluorídrico em células eletrolíticas⁵. Por ser um elemento extremamente reativo, o flúor produzido é direcionado diretamente ao processo, por sistema de tubulações, ou seja, o não se armazenará o flúor. O prédio de produção de flúor fica a aproximadamente 25 metros do local de instalação da fábrica piloto. Neste contexto, o inventário de flúor é baixo, correspondente, ao existente na tubulação de processo de ½ polegada.
- c- A corrente gasosa afluenta do reator de síntese, basicamente, formada por SF₆, subprodutos da reação (SF₄, S₂F₂, SOF₂, SO₂F₂ e S₂F₁₀) e reagentes do

⁵ Este sistema, já se encontra instalado e licenciado no Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, portanto, não faz parte do escopo deste estudo.

processo de obtenção de flúor (F_2 , HF, N_2 , e CF_4) arrastados seguem para as etapas de purificação.

A segunda etapa do processo é a purificação do SF_6 bruto, que se inicia pela decomposição térmica (pirólise) do S_2F_{10} , como indicado na equação 2.



A pirólise é realizada pela passagem do gás bruto num reator químico aquecido entre 250 a 450 °C.

O segundo processo de purificação é a retirada dos contaminantes de caráter ácido por absorção, em solução de hidróxido de potássio. Neste caso, utiliza-se um lavador de gases, onde o gás impuro em fluxo ascendente encontra em contracorrente um fluxo descendente de solução alcalina. A corrente do gás, livre das impurezas segue para secagem em leitos de alumina.

A última etapa da purificação é a retirada dos gases inertes, por criogenia⁶, onde o gás é resfriado abaixo de -63°C. Nesta temperatura, o SF_6 é cristalizado, enquanto os gases inertes são exauridos, por vácuo do sistema.

Por último, o SF_6 purificado é transferido para cilindros utilizando-se compressores, a fim de transporte e utilização.

As demais características da planta são dadas abaixo:

- ✓ A planta piloto será montada em *site* já licenciado, aproveitando a capacidade instalada de geração de flúor e demais facilidades existentes.

⁶ O agente criogênico mais utilizado é o nitrogênio líquido, devido à sua disponibilidade, inércia química, atoxicidade e ao fato de atingir temperatura de aproximadamente -196°C, o que lhe confere uma ampla gama de aplicações.

- ✓ Capacidade de produção 40 toneladas de SF₆ por ano, sendo sua operação em regime de turnos ininterruptos.
- ✓ O processo de fabricação e purificação será contínuo, a menos da retirada de inertes que será em bateladas.
- ✓ O sistema de purificação também será utilizado na recuperação de gás degradado, ora armazenado nas empresas do setor elétrico.

4.2. DEFINIÇÃO DA EQUIPE E FUNÇÕES

A seleção da equipe de analistas considerou a premissa da literatura consultada de formar uma equipe multidisciplinar, com conhecimento e experiência do sistema a ser estudado. Neste contexto, foram selecionados cinco (5) técnicos do CTMSP, que participaram efetivamente no projeto, construção, operação, manutenção e desenvolvimento do processo de fabricação e purificação do SF₆ em bancada, a saber:

- Um engenheiro de processo – analista.
- Um engenheiro de manutenção – analista.
- Dois supervisores de operação – analistas.
- Gerente de Desenvolvimento – Líder, acumulando a função de relator.

4.3. IDENTIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES PERIGOSAS

Por se tratar de uma planta em projeto de concepção, a identificação das condições perigosas foi baseada nas características físico-químicas, toxicológicas, recomendações de manuseio e cuidados especiais de todos os produtos químicos envolvidos, além das condições básicas de processo de pressão, temperatura e condições de contorno da operação da planta.

As fontes utilizadas no levantamento dos dados foram as fichas de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ, os limites de exposição ocupacional para substâncias químicas publicadas pela *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* - ACGIH (2013) e o *software* CAMEO para atendimento a emergências, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* – EPA e *National Oceanic and Atmospheric Administration*. O produto deste levantamento é apresentado na figura 24.

Figura 24 - Propriedades físico-químicas, inventário máximo, pressão e temperatura de armazenamento e/ou processo dos principais produtos da instalação.

Substância	CAS	Invent. (kg)	Propriedades						Cond. Oper	
			TLV – ACGIH (ppm)	CL 50 (ppm)	DL50 (mg/kg)	IDLH (ppm)	PF (°C)	PE (°C)	T (°C)	P (bar)
Enxofre sólido	7704-34-9	10.000	3mg/m ³ (a) 10 mg/m ³ (b)	NA	>5000	NA	207	446,6	Amb	Atm
Enxofre líquido		50		NA	NA	NA			120	0,9
Flúor	7782-41-4	5	1 ppm (TWA) 2 ppm (STEL)	185	NA	25	----	-188	25	0,9
Hexafluoreto de Enxofre Puro	2551-62-4	4000 a 5000	1000 ppm (TWA)	NA	NA	NA	----	-63 (Sublima)	-100 a 25	0,9 a 22
Hexafluoreto de Enxofre Impuro	-----	1000	0,5 ppm (TWA) 2 ppm (Stel) p/ HF ou 0,01 ppm (C) p/ S ₂ F ₁₀	1270 p/ HF ou 45 p/ S ₂ F ₁₀ (c)	25 p/ HF ou 5,7 p/ S ₂ F ₁₀ (d)	30 p/ HF ou 1 p/ S ₂ F ₁₀	----	-63 (Sublima)	-100 a 25	0,9 a 22
Hidróxido de potássio	1310-58-3	500	2mg/m ³ (Stel)	NA	273	NA	----	1320	Amb	Atm
Nitrogênio líquido	7727-37-9	5 m ³	Asfixiante simples	NA	NA	NA	----	-195,8	-195,8	10

(a) Fração respirável; (b) Fração inalável; (c) p/ 10 min; (d) coelho

NA – Não avaliado

Fonte: Autor

Em complemento, as informações da figura 24 para melhor entendimento dos inventários armazenados ou em processo, deve-se considerar as informações abaixo, a saber:

- a- O enxofre sólido será recebido em sacos de rafia com 25 Kg cada um. Portanto, serão armazenados, no máximo, 400 sacos.

- b- O inventário de enxofre líquido na realidade é menor. Entretanto, para simplificação e a favor da segurança se está considerando o enxofre sólido do silo de alimentação do reator de síntese como líquido.
- c- O inventário de flúor corresponde apenas ao existente na tubulação de processo, portanto, não é significativo.
- d- O inventário de hexafluoreto de enxofre puro considera de 8 a 10 cilindros de 500 kg armazenados.
- e- O inventário de hexafluoreto de enxofre impuro corresponde a capacidade de dois vasos pulmões, sendo sua toxicidade, apesar da existência de vários compostos, representada pelo HF e S_2F_{10} .
- f- O inventário de nitrogênio líquido corresponde a capacidade do tanque de armazenamento.

É importante ressaltar que os analistas utilizaram a técnica de lista de verificação como apoio no levantamento das condições perigosas. A primeira lista utilizada, apresentada no subitem 2.1.1.1, direciona a pesquisa e (re) lembra os analistas das propriedades dos compostos químicos que representam condições perigosas.

A segunda lista utilizada, apresentada na figura 25, correlaciona a “forma” de energia com as condições perigosas e exemplifica os cenários acidentais típicos de uma planta química. O uso desta lista cumpriu a função básica de estimular a discussão, facilitar a comunicação e entendimento dos analistas sobre o evento em análise, como sugerido por USP (2014 A) e DOE (2004).

Figura 25 – Lista de verificação associando a forma de energia com as condições perigosas e exemplos de eventos acidentais

Forma de Energia	Condição Perigosa	Exemplos Típicos de Eventos Acidentais
Química	Instabilidade térmica	Explosão do recipiente, devido aumento descontrolado da temperatura da reação (exotérmica) e liberação de vapores.
	Polimerização/Autopolimerização	
	Reatividade com água ou umidade	
	Sensibilidae ao choque mecânico	Detonação de sólidos ou líquidos explosivos
	Toxicidade	Vazamentos para atmosfera; inalação, contato com a pele.
	Material Inerte	Locais como deficiência de oxigênio
	Oxidante ou redutor	Contato com materiais orgânicos/reação de redução descontrolada
	pH ácido ou básico	Queimadura da pele; corrosão, contaminação do ambiente
	Pirofórico	Aumento da temperatura em conato com o ar (oxidação)
	Inflamáveis	Explosão por nuvem de vapor, incêndio em poça, etc
	Combustíveis	Incêndios, explosão de poeiras
Térmica	Temperatura elevada	Queimaduras por contato com superfícies quentes ou vazamentos; expansão explosiva do vapor - Blevé
	Temperatura baixa	Fratura frágil dos materiais, queimadura por frio e etc
Pressão	Fluidos compressíveis a alta pressão	Explosão de recipientes ou tubulações
	Sistema em vácuo	Colapso de recipientes
Cinética	Movimentação de material	Aquecimento de líquidos, com funcinamento de bombas centrifugas com a descarga fechada
Elétrica	Motores, baterias, fiação	Equipamentos e fiação sem proteção

Fonte: Adaptado de DOE (2004)

Neste contexto, as principais condições perigosas da planta piloto são:

- O enxofre (pó) é inflamável, podendo formar atmosferas explosiva. Sua queima gera SO_2 que é tóxico. Quando liquefeito se inflama em contato com o ar. Maiores detalhes sobre o manuseio seguro do enxofre se encontram no Anexo A.
- O flúor gasoso é extremamente tóxico, corrosivo e oxidante. Causa queimaduras severas à pele e olhos e dano ao trato respiratório se inalado. Pode causar ou intensificar a combustão em orgânicos ou mesmo em metais, dependendo da condição.
- O SF_6 purificado pode provocar o deslocamento do oxigênio e, por ter densidade elevada em relação ao ar, tende a se depositar ao nível do solo e ser de difícil dispersão, ainda mais em espaço confinado, porões e galerias. Na condição de impuro, inerente ao seu processo de fabricação ou ao seu uso, a presença de HF e S_2F_{10} dentre outros, também confere ao gás características

de elevada toxicidade, que em contato com o trabalhador poderá causar danos à saúde ou mesmo o óbito, dependendo da dose (EPA, 2002).

- Em partes do processo, o gás de SF_6 é liquefeito em vasos de pressão ou cilindros de aço carbono, com pressão interna aproximada de 22 bar a 25 °C. Assim, na eventualidade de exposição ao calor, choques mecânicos ou mesmo falha estrutural dos vasos ou cilindros, os mesmos poderão explodir provocando danos aos trabalhadores e/ou estruturas próximas. Adicionalmente, em caso de vazamento da fração líquida, a sua rápida evaporação e consequente resfriamento pode causar queimaduras ao trabalhador por frio.
- Outra condição perigosa do SF_6 , se não direta, mas que poderá afetar o ser humano é o seu potencial de aquecimento global, correspondente a 23.900 vezes ao dióxido de carbono.
- A solução de hidróxido de potássio é corrosiva, portanto, poderá causar queimaduras químicas no trabalhador. Também, causa dano ao trato respiratório se inalado.
- O nitrogênio é outro produto químico que causa o deslocamento do oxigênio, portanto, risco de morte aos trabalhadores por asfixia. Também causa queimaduras devido ao frio. Por último, seu armazenamento e utilização são em sistemas pressurizados, que poderão explodir por exposição ao calor, choques mecânicos, erro operacional ou mesmo falha estrutural, causando danos aos trabalhadores e/ou estruturas próximas.

4.4.DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS ACIDENTAIS.

Baseado nos dados do item anterior, os eventos acidentais, as causas, meios de detecção e danos esperados foram determinados para cada uma das etapas do processo, totalizando doze (12) cenários catalogados - vide figura 26.

Deste total, sete (7) são de vazamentos de produtos químicos, dois (2) de incêndio e três (3) de explosão. Assim sumarizados:

- a) Dois (02) eventos de vazamentos de gases em ambiente externo, devido à falha operacional ou de equipamentos com potencial de atingir um ou mais trabalhadores nas proximidades. Mas sem consequências ampliadas aos demais trabalhadores, devido o pequeno inventário (Flúor) ou por ser inerte (Nitrogênio⁷) e dispersão natural favorecida.
- b) Quatro (04) eventos de vazamentos de gases inertes (SF_6 purificado ou N_2) ou perigosos (Flúor ou SF_6 impuro) em ambiente fechado, devido à falha operacional ou de equipamentos. Por ser em ambiente fechado, apresenta maior probabilidade de exposição dos trabalhadores a espaços com deficiência de oxigênio ou a produtos tóxicos.
- c) Um (01) evento de vazamento de solução aquosa alcalina, com possibilidade de atingir os trabalhadores. Mas sem consequência para o meio ambiente, devido o pequeno volume de solução do lavador de gases e presença de bacia de contenção do equipamento.
- d) Dois (02) eventos de incêndio, devido o enxofre. O primeiro evento é o incêndio na área de armazenagem do enxofre sólido, portanto, com significativa carga de incêndio. O outro evento é o incêndio no reator de síntese, devido o contato de vapores de enxofre com oxigênio, no caso de falha de conexões do reator de síntese.
- e) Três (03) eventos de explosão. Dois (2) decorrentes da falha operacional ou de sistemas pressurizados com N_2 ou SF_6 e um (01) pela presença de poeira enxofre, em contato com uma fonte de ignição na área de armazenagem de enxofre.

⁷ Na realidade o cenário de vazamento é para o nitrogênio líquido, entretanto, sua evaporação é quase que instantânea.

Figura 26- Eventos catalogados

E	Nº	Evento	Causas	Deteção	Danos
Energia química – gás tóxico	01	Vazamento externo de F ₂ .	• Falha da tubulação por impacto; corrosão; conexões e válvulas e projeto.	• Odor, Visual e Ruído.	• Menores a instalação e ao Meio ambiente. • Potencialmente severo a saúde (inalação de F ₂).
	02	Vazamento interno de F ₂ .		• Odor, Visual e Ruído. • Alarme de F ₂ /HF	
	03	Vazamento interno de SF ₆ não purificado.			
	04	Vazamento interno de SF ₆ purificado com/sem inertes.	• Falha da tubulação ou vaso pulmão por impacto; corrosão; conexões; válvulas; fadiga térmica; projeto. • Falha humana (manobra de válvulas).	• Ruído. • Alarme de pressão diferencial do vaso.	• Menores a instalação e ao Meio ambiente. • Potencialmente severo a saúde (queimadura por frio e atmosfera deficiente em oxigênio)
Energia química – gás inerte /Energia Térmica- Frio	05	Vazamento externo de N ₂ líquido.	• Falha da tubulação, vasos ou trocadores de calos por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões e válvulas e projeto. • Falha humana (manobra de válvulas).	• Visual e ruído. • Alarme de queda de pressão do sistema.	• Menores a instalação e ao Meio ambiente. • Potencialmente severo a saúde (queimadura por frio e atmosfera deficiente em oxigênio)
	06	Vazamento interno de N ₂ líquido.			
Energia Química – pH	07	Vazamento da solução de hidróxido de potássio do lavador de gases.	• Falha da tubulação ou bomba de recirculação por impacto; corrosão; conexões e válvulas e projeto. • Falha humana (manobra de válvulas).	• Odor, Visual e Ruído. • Alarme de nível baixo do lavador.	• Menores a instalação e ao Meio ambiente • Potencialmente severo a saúde (queimadura química).
Energia física – alta pressão.	08	Explosão do vaso pulmão ou de cilindros de SF ₆ .	• Falha do vaso pulmão ou cilindros por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões; válvulas e projeto. • Falha humana na transferência ou manobra de válvulas.	• Visual e Ruído.	• Maiores a instalação. • Menores ao Meio ambiente. • Severo a saúde do trabalhador (impacto de mísseis e atmosfera deficiente em oxigênio).
	09	Explosão do vaso de armazenagem ou tubulação de N ₂ líquido.	• Falha do vaso por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões; válvulas e projeto. • Falha humana transferência ou manobra de válvulas.		
Energia química – Material combustivel	10	Explosão almoxarifado de enxofre.	• Presença de poeira e fonte de ignição	• Visual. • Alarme de incêndio.	• Maiores a instalação. • Menores ao Meio ambiente. • Potencialmente severo a saúde do trabalhador (exposição à HF, F ₂ , SO ₂).
	11	Incêndio na sala do reator de síntese.	• Falha da tubulação ou reator de síntese por corrosão; conexões e válvulas e projeto.		
	12	Incêndio no almoxarifado de enxofre.	• Contato do enxofre com fontes de calor.		

Fonte: autor

4.5. ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO - APR.

Como mencionado anteriormente, utilizou-se o modelo modificado de planilha de análise preliminar de risco – APR. Onde é necessário estimar os valores de frequência e severidade⁸ de cada cenário, sendo o resultado da multiplicação destes fatores o valor do risco do evento avaliado.

⁸ Neste trabalho, os valores de frequência e severidade são os valores sugeridos nas tabelas de categorias de frequência e severidade da FEPAM, apresentadas no capítulo 3.

Ainda para a finalização da planilha – APR foi estabelecido um conjunto de recomendações, independentemente do valor de risco, a serem seguidas e implantadas nas etapas subsequentes do projeto da planta piloto. As planilhas completas da APR são apresentadas no apêndice A.

Em resumo, as planilhas e para melhor entendimento dos resultados obtidos na APR, foi elaborada a matriz de risco da planta piloto com a pontuação dos cenários estudados e critérios de riscos, apresentada na figura 27.

Figura 27 – Matriz de risco com os cenários acidentais da planta piloto

Matriz de Risco		Severidade			
		I	II	III	IV
Frequência	E				
	D				
	C	5	1,2,3,4,6,7	8	
	B			12	11
	A			10	9

Critério de risco	Desprezível	Menor	Moderado	Sério	Crítico
-------------------	-------------	-------	----------	-------	---------

Fonte: autor

Como resultado imediato, pela análise da matriz de risco, verifica-se que a planta piloto não apresenta cenários classificados como sério ou crítico. Ou seja, considerando-se as informações disponíveis e contexto deste trabalho, pode-se concluir que a planta piloto não apresenta riscos inaceitáveis.

Os cenários de n^o 8 (incêndio no reator de síntese) e n^o 11 (explosão do vaso pulmão ou cilindros de hexafluoreto de enxofre) foram classificados como de risco moderado. Portanto, são riscos aceitáveis, mas que devem ser tratados oportunamente, a fim de redução de sua classificação para menor ou desprezível. Neste caso, a implantação das medidas preventivas e/ou corretivas será realizada ainda na fase de projeto da referida instalação, ou seja, praticamente sem custo e acreditasse com maior efetividade para redução do risco.

A lista de sugestões para o tratamento destes riscos é apresentada na figura 28. Em complemento, sugere-se nova análise de risco após a elaboração do projeto básico. Pois, com documentação mais detalhada e completa será possível o uso de ferramentas ou técnicas mais sofisticadas. Por exemplo, uma análise de modos de falha e efeitos – FMEA ou análise de árvore de falhas – AFF. E assim determinar se os objetivos de redução ou controle destes riscos foram satisfeitas.

Figura 28 – Lista de riscos de classificação moderada e sugestões de medidas preventivas e corretivas

Evento	Métodos de Detecção	Medidas preventivas e de proteção
Explosão do vaso pulmão ou de cilindros de SF ₆ .	<ul style="list-style-type: none"> - Falha do vaso pulmão ou cilindros por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões; válvulas e projeto. - Falha humana na transferência ou manobra de válvulas 	<ul style="list-style-type: none"> - Projetar o sistema utilizando-se o código ASME para equipamentos criogênicos e ciclo térmico, instalação de sistemas de alívio (disco de ruptura, válvula de segurança e etc); - Implantar o sistema considerando-se distância segura de outros sistemas, barreiras físicas contra projeção de mísseis e em área abrigada das intempéries, mas sem paredes. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), NR13 e de manutenção. - Estabelecer programa de inspeção e testes de cilindros e válvulas. - Minimizar e controlar a presença de operadores na área
Incêndio na sala do reator de síntese. (enxofre fundido ou vapores)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha da tubulação ou reator de síntese por corrosão; conexões e válvulas e projeto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Projetar tubulação considerando: tráfego de pessoas, equipamentos e materiais; minimizar quantidade de conexões e válvulas e código de projeto ASME para fluido letal. - Sistema de combate por extintores de CO₂. - Considerar no lay-out, o distanciamento do reator em relação a outros sistemas e possível confinamento do reator. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), de manutenção e NR13.

Fonte: autor

Outra constatação, pela análise da matriz de risco, é que todos cenários de vazamento de produtos perigosos foram classificados com a categoria de frequência C - ditas ocasionais, são aquelas que dependem de uma única falha, seja humana ou de equipamentos.

Tal fato pode ser justificado pela natureza dos sistemas, que demandam a participação de vários atores, desde o projeto até sua operação e manutenção, passando pelas equipes de aquisição, montagem, controle e inspeções de qualidade, comissionamento, dentre outras atividades. As quais deverão estar totalmente alinhadas e cientes de suas responsabilidades para o sucesso do empreendimento, pois um único parafuso adquirido errado ou falha de um procedimento de soldagem ou manobra

equivocada de uma válvula poderá causar um acidente. Essas características, associadas aos sistemas de controle, em sua maioria, administrativos, contribuem para a menor confiabilidade do sistema.

Por último, verifica-se que os eventos pontuados como de severidade catastrófica são relativos às explosões de vasos e cilindros pressurizados, os quais acumulam grande quantidade de energia. Como essa é uma situação inerente ao processo, sem possibilidade de redução das pressões envolvidas e demais condições de manuseio do gás, as ações e recomendações para o controle ou redução do risco são no sentido de isolar os possíveis efeitos da explosão. Como por exemplo, utilizar barreiras físicas resistentes (de valor monetário acentuado) ou o conceito de distância segura de estruturas importantes da planta e de pessoas (de menor valor monetário). É importante ressaltar que, apesar da consequência ser catastrófica, a frequência deste tipo de acidente é baixo, consequentemente, o índice de risco.

6. CONCLUSÃO

Tendo como agente motivador a construção de uma planta piloto de fabricação e purificação de hexafluoreto de enxofre (SF_6) realizou-se a análise de risco preliminar desta instalação, em sua fase de projeto conceitual.

Sobre o ponto de vista acadêmico e teórico, a literatura consultada contribuiu para organização e aprofundamento do conhecimento sobre os temas pertinentes, tais como ferramentas utilizadas no processo de análise de risco, condições para a determinação das condições perigosas, elaboração e registros necessários a análise de risco.

Decorrente da revisão bibliográfica selecionou-se as ferramentas para análise de risco da referida instalação: Análise Preliminar de Risco- APR, apoiada pela técnica de lista de verificação (*check list*), facilitando a comunicação e entendimento dos analistas, durante a elaboração da APR.

Considerando-se os resultados práticos, ou seja, o resultado da APR propriamente dita, cita-se a determinação de doze (12) eventos, associados às condições perigosas de vazamentos de produtos perigosos, incêndios e explosões.

A etapa subsequente foi a determinação das causas, meios de detecção/barreiras, frequências e severidade, caracterizando os eventos e respectivos índices de risco, de forma clara e objetiva.

Dos eventos analisados, cinco (5) foram classificados como desprezíveis outros cinco (5) como menores e dois como moderados. Para estes dois últimos acidentes – incêndio no reator de síntese e explosão do vaso pulmão ou cilindros de hexafluoreto de enxofre, os analistas sugeriram atenção especial na evolução do projeto conceitual para básico, onde com maiores informações e documentação detalhada será possível a execução de nova análise de risco, com o uso de técnicas mais avançadas, que auxiliem a tomada de decisão sobre a aceitação ou não destes riscos.

Outro resultado decorrente da APR foi a classificação de frequência como ocasionais da maioria dos eventos de vazamento de produtos perigosos, aquelas que dependem de uma única falha, seja humana ou de um equipamento. A justificativa para essa observação pode estar associada a natureza dos sistemas, com várias conexões, válvulas e necessidade de manobras pelos operadores, o que contribui para menor confiabilidade do sistema.

Adicionalmente, independente da classificação de risco dos eventos, foram recomendadas diversas medidas preventivas e de proteção, a serem observadas na evolução do projeto, contribuindo para redução do risco inerente ao processo de fabricação e purificação do SF₆.

Portanto, pelos resultados apresentados pode-se concluir que a metodologia adotada de análise preliminar de risco - APR, apoiada por listas de verificação mostrou-se eficiente para atingir o objetivo de identificar as condições perigosas e quantificar os riscos decorrentes, auxiliando a tomada de decisão sobre a aceitabilidade ou não dos mesmos. Assim como, de forma estruturada, elaborar propostas de medidas preventivas e de proteção, contribuindo para a sustentabilidade do empreendimento estudado.

REFERÊNCIAS

ABB. **ABB's Circuit Breaker Sentinel™ to drive maintenance of 30 year old power equipment**, Press releases ABB. 2010. Disponível em: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/2c2c1dac21f8c834c12577cf0040187d.aspx>. Acesso em: 10 de novembro de 2015.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS – ACGIH. **Limites de exposição ocupacional (TLVs) para substância químicas e agentes físicos & índices biológicos de exposição (BEIs)**. Tradução Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais – ABHO, São Paulo, 2013. 268 p.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS: **Guidelines for hazard evaluation procedures**. 2ª ed. AICHE. New York, 1992. 501 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO GUIA 73**: Gestão de riscos - Vocabulário – NBR, 2009. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: Gestão de riscos - princípios e diretrizes – NBR, 2009. 24 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 31010**: Gestão de riscos — Técnicas para o processo de avaliação de riscos - NBR, 2012. 96 p.

BESSEDE, J.L, HUET, I., MONTILLET, G, BARBIER, E, MICOZZI, J. **Implementation of treatment & recovery of the SF₆ gas containing a high amount of decomposition products due to high voltage electrical interruptions**. Disponível em: http://www3.epa.gov/highwp/electricpower-sf6/documents/conf04_montillet_barbier_paper.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2015.

CHINAQUI, E.F. **Análise e gerenciamento de riscos de processo na indústria química**, 2012. Dissertação – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia Química de Lorena, Lorena 2012. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2012/MEQ12017.pdf>. Acesso em: 16 de novembro de 2015.

CHU. F. Y.; **SF₆ Decomposition in Gas-Insulated Equipment**. IEEE -Transactions on Electrical Insulation. V.21, pp 693-725, Out. 1986.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma técnica P4.261: Risco de acidente de origem tecnológica - método para decisão e termos de referência** – CETESP, São Paulo, 2011. 140 p.

CROWL, D. A. E LOUVAR, J. F. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. 2ª ed. Prentice Hall PTR, New Jersey, 2002. 650 p.

DAMSKY, B. **SF₆ gas condition assessment and decontamination**. Technical Report Electric Power Research Institute – EPRI, 2000. 7p.

ESTON, S.M., IRAMINA, W.S. E MARTINS, A.I.S. **Avaliação completa**. Revista Proteção, p. 82 a 86, Maio 2015.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER - FEPAM. **Manual de Análise de Riscos Industriais** – Rio Grande do Sul, 2001. 45 p.

KLETZ, T E AMYOTTE. P. **Process plant: a handbook for inherently safer design**. 2ªed. CRC Press, New York, 2010. 386 p.

LAPA, R. P e Goes, M.L.S. **Investigação e análise de incidentes**. 1ª ed. Edicon. São Paulo, 2011. 368 p.

MANUELE. FRED. A. **On the practice of safety**. 4th ed. Great Britain: Jonh Wiley & Sons Ltd. 2013. Disponível em:
<https://books.google.com.br/books?id=vGmkGY044zEC&hl=pt-BR/Acesso em: 22 de dezembro de 2015>

MASSONE ET AL, INVENTOR. Kali-Chemie Aktiengesellschaft, assignee. **Process Preparing Sulphur Hexafluoride**. United Patent US 4039646. 1977.
OLIVER, G.J.; BAKKER, J. **Historical Global Emission Trends of the Kyoto Gases HFCs, PFCs and SF₆**. Emission Reduction Strategies Conference. San Diego, USA. Nov, 2000. 14 p.

REVISTA FURNAS ANO XXX Nº 324 SETEMBRO 2005. Disponível em:
http://www.furnas.com.br/arqtrab/ddppg/revistaonline/linhadireta/rf324_grajau.ppd.

SOLVAY SPECIAL CHEMICALS – **Information of Sulfur Hexafluorine**. Disponível em: <http://www.solvay.com/en/binaries/SF6-Sulphur-Hexafluoride-EN-254640.pdf>. Acesso em 10 outubro de 2015.

TIXIER J., DUSSERRE G., SALVI O., GASTON D. **Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, 2002, 15 (4), p.291-303

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: **Byproducts of Sulfur Hexafluoride (SF6) Use in the Electric Power Industry**. 2002. p 11. Disponível em: <http://www.epa.gov/highwp1/sf6/index.html>. Acesso em: 16 de dezembro de 2015.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Curso de Especialização de Segurança do Trabalho. **Disciplina: eST103 Higiene do trabalho – Parte A**, 2014. 166 p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Curso de Especialização de Segurança do Trabalho. **Disciplina: eST-101 Introdução à engenharia de segurança do trabalho Riscos..** 2014-A. 173 p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Curso de Especialização de Segurança do Trabalho. **Disciplina eST-701 Gerência de Riscos**. 2015. p 269.

Anexo I – Recomendações de segurança e manuseio do enxofre

Estado físico: Sólido na cor amarela; líquido na cor castanha claro a escuro.

Densidade: 1.92 - 2.07, dependendo de sua estrutura cristalina.

Pressão de vapor: <0.0001 m, Hg (20°C)

Ponto de fusão (Melting point): 110° - 121°C dependendo de sua estrutura cristalina.

Ponto de inflamação (Flash point): 168°-188°C.

O ponto de inflamação do enxofre líquido varia com o grau de pureza. Para o enxofre puro (188° C), que é superior as temperaturas normais de manuseio. Para enxofre impuro (?) seu ponto de inflamação é mais baixo (168° C).

Nas temperaturas usuais de manuseio do enxofre líquido (121°C a 154°C), a concentração de gases acima da superfície do líquido não é suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar. Porém, se o enxofre for contaminado com hidrocarbonetos, que reagem lentamente com o enxofre líquido para formar sulfeto de hidrogênio, o qual pode formar mistura inflamável na presença de ar. Portanto, deve-se realizar o controle de pureza do enxofre de impurezas, inclusive de pós de sulfetos ferricos que são piroforicos.

Temperatura de auto-ignição = 190°C (poeiras), 221°C (pó) e 248° - 261° (líquido)

Limite inferior (LIE) e superior (LSE) de exposividade (poeira): 35 g/m³ e 1400 g/m³, respectivamente.

Solubilidade: Insolúvel em água, dependendo da estrutura cristalina.

Corrosividade: quando seco: não; quando úmido gera ácido sulfúrico.

Reatividade: queima formando dióxido de enxofre (gás irritante); pode formar misturas explosivas com oxidantes, tais como: cloratos e nitratos.

Toxicidade: DL₅₀ > 5000 mg/kg

Outros

- A temperatura normal manuseio do enxofre líquido é de 121 °C a 154°C, ligeiramente superior ao ponto de fusão (119 °C).

- No ponto de fusão o líquido é transparente e fluido, escurecendo do laranja para castanho opaco, conforme aumento da temperatura.

- Sua viscosidade diminui até cerca de 160 °C. Desta temperatura até 188 °C, o comportamento da viscosidade é inverso, ou seja, ela aumenta. A 188 °C a viscosidade atinge o seu máximo, onde o enxofre não flui e se torna castanho escuro opaco.

- Acima de 188 °C a viscosidade volta a diminuir com o aumento da temperatura.

- A transferência de enxofre líquido deve ser realizada preferencialmente por bombas ou gases inertes. Pois se utilizar ar comprimido pode-se provocar incêndio, devido concentração de oxigênio/sulfeto de hidrogênio.

Classificação de área para o enxofre, conforme NFPA 655 – Standard for prevention of sulfur fires and explosion⁹ é dada abaixo:

Depth of Dust Accumulation (in.)	Frequency	Housekeeping Requirement	Area Electrical Classification
Negligible ^a	N/A	N/A	Unclassified (general purpose)
Negligible to $<1/32$ ^b	Infrequent ^c	Cleanup during same shift.	Unclassified (general purpose)
Negligible to $<1/32$ ^b	Continuous/frequent ^d	Clean as necessary to maintain an average accumulation below $1/64$ in. ^e	Unclassified; however, electrical enclosures should be dusttight. ^{f, g}
$1/32$ to $1/8$	Infrequent ^c	Cleanup during same shift.	Unclassified; however, electrical enclosures should be dusttight. ^{f, g}

- A queima do enxofre ao ar gera o dióxido de enxofre (SO₂), um gás tóxico com odor sufocante. O SO₂ é relativamente denso, portanto, de difícil dispersão.

⁹ Este código estabelece os requisitos de segurança e de proteção saúde para eliminar ou reduzir os riscos de explosão e incêndio inerentes a manipulação do enxofre ou de compostos químicos que o contém. Maior ênfase é dado para o enxofre no seu estado sólido, mas também considera os principais riscos na manipulação do enxofre no seu estado líquido.

APÊNDICE A – Planilhas APR da Planta de SF₆ – Projeto conceitual

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO – APR									Pág	
Área: Fábrica piloto de SF ₆					Atividade: Projeto conceitual				Nº Rev	
									Data	
Equipe		Desenvolvimento de processos							Prox. rev	
									Aprovação	
E	Nº	Evento	Causas	Detecção	Danos	F	S	CR	Recomendações	
Energia química – gás tóxico	01	Vazamento de F ₂ externo a instalação.	Falha da tubulação por impacto; corrosão; conexões e válvulas e projeto.	- Odor. - Visual. - Ruído.	- Menores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (inalação de F ₂).	B	II	1	- Projetar tubulação considerando: tráfego de pessoas, equipamentos e materiais; minimizar quantidade de conexões e válvulas e código de projeto ASME para fluido letal. - Implantar sistema de exaustão do ambiente ou barreiras físicas, evitando a disseminação e contato com o trabalhador. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), NR13 e de manutenção. - Projetar sistema de intertravamento para isolamento do reator de síntese evitando entrada de ar (risco de incêndio do enxofre) e desvio do fluxo de flúor para abatimento (lavador de gases). - Projetar sistema de indicação e alarme de diferencial de pressão entre os equipamentos para o monitoramento do processo e eventos de vazamentos e entupimentos.	
	02	Vazamento de F ₂ interno a instalação.								
	03	Vazamento de SF ₆ não purificado interno a instalação								
Energia química – gás tóxico	04	Vazamento de SF ₆ purificado com/sem inertes, interno a instalação.	- Falha da tubulação ou vaso pulmão por impacto; corrosão; conexões; válvulas; fadiga térmica; projeto. - Falha humana (manobra de válvulas)	- Ruído. - Alarme diferencial de pressão do sistema.	- Menores a instalação - Menores ao Meio ambiente - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (queimadura por frio e atmosfera deficiente em oxigênio)	C	II	2	- Projetar tubulação considerando: tráfego de pessoas, equipamentos e materiais; minimizar quantidade de conexões e válvulas e código de projeto ASME para fluido letal. - Avaliar a implantação de sistema de exaustão do ambiente ou implantação em área abrigada, mas sem paredes (ventilação natural). - Implantar barreiras físicas, evitando a disseminação e contato com o trabalhador. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha); NR13 e de manutenção. - Projetar sistema de indicação e alarme de diferencial de pressão entre os equipamentos para o monitoramento do processo e eventos de vazamentos e entupimentos.	

Fonte: Autor

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO – APR									Pág	
Área: Fábrica piloto de SF ₆					Atividade: Projeto conceitual				Nº Rev	
									Data	
Equipe		Desenvolvimento de processos							Prox. rev	
									Aprovação	
E	Nº	Evento	Causas	Detecção	Danos	F	S	CR	Recomendações	
Energia Química – pH	05	Vazamento da solução de hidróxido de potássio do sistema de purificação.	- Falha da tubulação ou bomba de recirculação por impacto; corrosão; conexões e válvulas e projeto. - Falha humana (manobra de válvulas).	- Odor, Visual e Ruído. - indireta: queda abrupta do nível do lavador	- Menores a instalação - Menores ao Meio ambiente - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (queimadura química).	C	II	2	- Projetar bacia de contenção. - Projetar tubulação considerando:tráfego de pessoas, equipamentos e materiais; e minimizar quantidade de conexões e válvulas. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha) e de manutenção. - Utilização de uniforme contra respingos de ácidos/bases (algodão tratado com PTFE) nas atividades de rotina. - Utilização de EPI's, conforme definido em permissão de trabalho.	
Energia química – gás inerte /Energia Térmica- Frio	06	Vazamento de N ₂ líquido externo instalação.	- Falha da tubulação por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões e válvulas e projeto. - Falha humana na manobra de válvulas.	- Visual e ruído. - Alarme de queda de pressão do sistema.	- Menores a instalação - Menores ao Meio ambiente - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (queimadura por frio e atmosfera deficiente em oxigênio)	C	I	1	- Todo o sistema deverá ser projetado por empresa especializada (empresa de gases). Deve-se prever no contrato, a aprovação pela Engenharia do CTMSP das bases normativas utilizadas, o fornecimento dos procedimentos de montagem, testes, partida e manutenção dos sistemas. - Projetar barreira física que impeça choques de veículos e de entrada de pessoas não autorizadas. - Projetar tubulação considerando a minimização da quantidade de conexões e válvulas. - Utilização de EPI's, conforme definido em permissão de trabalho.	
	07	Vazamento de N ₂ líquido interno a instalação.	- Falha da tubulação /trocador de calor por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões e válvulas e projeto. - Falha humana na manobra de válvulas.	- Visual e ruído. - Alarme de queda de pressão do sistema.	- Menores a instalação - Menores ao Meio ambiente - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (queimadura por frio e atmosfera deficiente em oxigênio)	C	II	2	- Todo o sistema deverá ser projetado por empresa especializada (empresa de gases). Deve-se prever no contrato, a aprovação pela Engenharia do CTMSP das bases normativas utilizadas, o fornecimento dos procedimentos de montagem, testes e manutenção. - Projetar barreira física que impeça entrada e circulação de pessoas não autorizadas. - Utilização de EPI's, conforme definido em permis. de trabalho. - Avaliar a Instalação do sistema em área abrigada das intempéries, mas sem paredes.	

Fonte: Autor

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO – APR									Pág	
Área: Fábrica piloto de SF ₆					Atividade: Projeto conceitual				Nº Rev	
Equipe					Desenvolvimento de processos				Data	
									Prox. rev	
									Aprovação	
E	Nº	Evento	Causas	Detecção	Danos	F	S	CR	Recomendações	
Energia física – Fluidos em alta pressão.	8	Explosão do vaso pulmão ou de cilindros de SF ₆ .	<ul style="list-style-type: none"> - Falha do vaso pulmão ou cilindros por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões; válvulas e projeto. - Falha humana na transferência ou manobra de válvulas. 	- Visual e Ruído.	<ul style="list-style-type: none"> - Maiores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. - Severo a saúde do trabalhador (impacto de mísseis e atmosfera deficiente em oxigênio). 	B	IV	3	<ul style="list-style-type: none"> - Projetar o sistema utilizando-se o código ASME para equipamentos criogênicos e ciclo térmico, instalação de sistemas de alívio (disco de ruptura, válvula de segurança e etc); - Implantar o sistema considerando-se distância segura de outros sistemas, barreiras físicas contra projeção de mísseis e em área abrigada das intempéries, mas sem paredes. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), NR13 e de manutenção. - Estabelecer programa de inspeção e testes de cilindros e válvulas. - Minimizar e controlar a presença de operadores na área 	
	9	Explosão do vaso de armazenagem e tubulação de N ₂ líquido.	<ul style="list-style-type: none"> - Falha do vaso por impacto; corrosão; fadiga térmica; conexões; válvulas e projeto. - Falha humana transferência ou manobra de válvulas. 	- Visual e Ruído.	<ul style="list-style-type: none"> - Maiores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. - Severo a saúde do trabalhador (impacto de mísseis e atmosfera deficiente em oxigênio). 	A	IV	2	<ul style="list-style-type: none"> - O sistema deverá ser projetado por empresa especializada (empresa de gases). Deve-se prever no contrato, a aprovação pela Engenharia do CTMSP das bases normativas utilizadas, o fornecimento dos procedimentos de montagem, testes, partida e manutenção dos sistemas. - Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), NR13 e de manutenção - Implantar o sistema considerando-se distância segura de outros sistemas e/ou de barreiras físicas contra projeção de mísseis; impeça entrada e circulação de pessoas não autorizadas. 	
Energ. química - combustível	10	Explosão almoxarifado de enxofre.	- Presença de poeira e fonte de ignição	- Visual e Ruído.	<ul style="list-style-type: none"> - Maiores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. Potencialmente severo a saúde do trabalhador (impacto de mísseis)	A	III	1	<ul style="list-style-type: none"> - Manter o local limpo. - Projetar o sistema elétrico considerando: área classificada; fontes de calor; eletrostática; descargas atmosféricas e etc. - Implantação do almoxarifado em local distante de outras instalações e pessoas. - Substituir o enxofre em pó pelo enxofre em pastilhas. - Emissão de permissões de trabalho 	

Fonte: Autor

ANÁLISE PRELIMINAR DE RISCO - APR									Pág	
Área: Fábrica piloto de SF ₆					Atividade: Projeto conceitual				Nº Rev	
									Data	
Equipe		Desenvolvimento de processos							Prox. rev	
									Aprovação	
E	Nº	Evento	Causas	Deteccção	Danos	F	S	CR	Recomendações	
Energia química – Material combustível	11	Incêndio na sala do reator de síntese. (enxofre fundido ou vapores)	- Falha da tubulação ou reator de síntese por corrosão; conexões e válvulas e projeto.	- Visual. - Alarme de incêndio.	- Maiores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (exposição à HF, F ₂ , SO ₂).	C	III	3	- Projetar tubulação considerando: tráfego de pessoas, equipamentos e materiais; minimizar quantidade de conexões e válvulas e código de projeto ASME para fluido letal. - Sistema de combate por extintores de CO ₂ . - Considerar no lay-out, o distanciamento do reator em relação a outros sistemas e possível confinamento do reator. -Estabelecer programa de inspeção em serviço (busca da falha), de manutenção e NR13.	
	12	Incêndio no almoxarifado de enxofre.	- Contato do enxofre com fontes de calor.	- Visual. - Alarme de incêndio.	- Maiores a instalação. - Menores ao Meio ambiente. - Potencialmente severo a saúde do trabalhador (exposição a produtos tóxicos – SO ₂).	B	III	2	- Instalar sprinklers de névoa para combate a incêndios. - Estabelecer distância segura entre os paletes de carga. - Projetar o sistema elétrico considerando: área classificada; fontes de calor; eletrostática; descargas atmosféricas e etc. - implantação do almoxarifado em local distante de outras potenciais fontes de calor. - Manter o local limpo e elaboração de permissões de trabalho. - Avaliar a compra do enxofre em lentilhas.	

Fonte: Autor